PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Développement d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur l'emplacement des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales dans les municipalités québécoises
Auteur: Author:	Sandrine Lacroix
Date:	2025
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Lacroix, S. (2025). Développement d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur l'emplacement des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales dans les municipalités québécoises [Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/72089/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/72089/
Directeurs de recherche: Advisors:	Françoise Bichai, Danielle Dagenais, & Martijn Kuller
Programme: Program:	Génie civil

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Développement d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur l'emplacement des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales dans les municipalités québécoises

SANDRINE LACROIX

Département des génies civil, géologique et des mines

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*

Génie civil

Décembre 2025

© Sandrine Lacroix, 2025.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Cette thèse intitulée :

Développement d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur l'emplacement des infrastructures vertes et bleues de gestion des eaux pluviales dans les municipalités québécoises

présentée par **Sandrine LACROIX**

en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

Sarah DORNER, présidente
Françoise BICHAI, membre et directrice de recherche
Martijn KULLER, membre et codirecteur de recherche
Danielle DAGENAIS, membre et codirectrice de recherche
Roxane LAVOIE, membre
Perrine HAMEL , membre externe

DÉDICACE

À tous les passionnés d'un monde plus vert et plus bleu, pensé avec soin.

REMERCIEMENTS

J’ai eu la chance incroyable de croiser sur mon chemin des personnes inspirantes et bienveillantes tout au long de mon parcours académique. Je souhaite tout d’abord exprimer ma profonde gratitude à mes trois directeurs de recherche. Chacun d’entre vous m’a offert une perspective unique et la complémentarité de vos approches a enrichi mon projet, lui donnant une véritable dimension multidisciplinaire. Merci pour votre créativité, votre soutien constant et la richesse de vos enseignements.

Parmi ces rencontres marquantes, celle de Françoise. Merci, Françoise, de m’avoir ouvert les portes du passionnant domaine des infrastructures vertes, un sujet qui, par un heureux hasard, réunissait déjà plusieurs de mes intérêts. Ton écoute, ta bienveillance et ta confiance m’ont profondément touchée. Merci de nous avoir offert la liberté d’exprimer notre créativité, de m’avoir encouragée à postuler à des bourses et à participer à des congrès internationaux: cela a été une véritable source de motivation et dans les plus belles expériences de ce parcours. Merci pour ton soutien constant. Tu es pour moi un modèle en recherche et en sciences, qui m’inspire et m’a donné l’élan nécessaire pour entreprendre ce chemin (qui aurait cru que ce premier thé partagé à la cafétéria blanche du 2e étage avec Jonathan allait déboucher sur un parcours aussi riche dans les cycles supérieurs!).

Danielle, quelle chance j’ai eue de bénéficier de ton expertise reconnue dans le domaine. Être accompagnée par toi en tant que mentore a été une expérience profondément formatrice. Tes conseils avisés, ton regard rigoureux et ta capacité à apporter une perspective complémentaire à celle du génie ont grandement contribué à renforcer la qualité scientifique de mon travail. Je me sens sincèrement privilégiée d’avoir pu apprendre à tes côtés. Merci également pour ton accueil au sein de ton groupe de recherche, qui m’a permis de rencontrer des personnes marquantes et de tisser des liens précieux pour la suite de mon parcours.

Martijn, thank you for trusting me with your SSANTO and for allowing me to help it evolve. You have been an exceptional mentor: always present, engaged and attentive, making me feel that my project truly mattered. I have learned so much alongside you, both in terms of MCDA and in cultivating rigor and creativity in research. Thank you sincerely for your generous and inspiring guidance. Your support has been invaluable at every stage of this journey. Your quick reviews and consistently relevant and constructive feedback have greatly enriched my work. Your availability, consistency and unwavering support have left a lasting impression on me. I also feel so fortunate

to have shared international travel experiences with you, these in-person exchanges added an even more stimulating dimension to our collaboration.

Je souhaite également remercier Jonathan, qui m'accompagne depuis le début de ce parcours. C'est aussi grâce à toi que j'ai découvert le monde fascinant des infrastructures vertes en m'offrant ma première opportunité de stage. Boucler la boucle en collaborant avec toi sur mon dernier article et bénéficier à nouveau de tes précieux conseils en mathématiques est particulièrement gratifiant. Merci aussi pour ton accueil chaleureux au sein de ton groupe de recherche, qui a enrichi la fin de mon parcours. Je garderai d'excellents souvenirs de la cabane à sucre, des journées passées à travailler dans les bureaux du Pavillon André-Aisenstadt avec Justine, et de tous les moments partagés autour des dîners avec ton équipe, notamment Anne, Gabrielle, Sami et Justine.

Un immense merci à Garance, Alexandre, Florence, Sami et Pascale pour tous ces beaux moments partagés au fil des années et pour le soutien mutuel tout au long du projet PIIVO. Célébrer ensemble chaque petite victoire, comme si c'était des victoires communes, m'a permis de sentir cette véritable complicité dans nos projets. Alexandre, ton aide avec ArcGIS nous a souvent sauvées, et merci d'avoir continué à écrire à Justine et moi dans notre conversation de trio, nous donnant l'impression que tu étais toujours à nos côtés dans PIIVO. Garance, je garde de merveilleux souvenirs de notre expérience au Danemark. Pascale, quelle chance d'avoir vécu le congrès à Istanbul ensemble et d'apprendre à te connaître: une belle découverte cette année et des moments très marquants.

Justine, ma précieuse partenaire de doctorat et amie! Que de rires et de discussions marquantes. J'ai trouvé en toi bien plus qu'une collègue : une confidente, une alliée, une cheerleader inconditionnelle qui m'a toujours soutenue et motivée à persévérer. Pouvoir partager nos idées et solutions sur nos projets respectifs a vraiment tout changé. Savoir que nous traversions ensemble les hauts et les bas des études supérieures a rendu ce chemin beaucoup plus humain et encourageant.

Evelyne, quel plaisir d'avoir partagé ce parcours avec toi! Ta présence m'a aidée à rester concentrée et motivée, sachant que nous partagions le même objectif au sein de notre groupe d'amis. Il y a quelque chose de rassurant à vivre cette expérience ensemble, et c'est une véritable chance de l'avoir partagée avec une amie.

Enfin, un immense merci à tous mes amis, pour leur soutien moral constant, souvent sans même s'en rendre compte. Vous m'avez offert des moments de détente, d'écoute et de rires, m'aidant à garder énergie et équilibre tout au long de ce parcours.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à ma famille, mes parents et ma sœur, pour leur soutien inestimable : votre patience, vos encouragements sincères, votre présence constante, votre amour et même votre aide concrète (jusqu'à m'aider à lancer des simulations!). Vous avez été une base solide à chaque étape.

Un grand merci également à tout le groupe RAEV : Faezeh, Raja, Pouria, Olivier et Maira. Partager ce parcours avec des personnes qui vivent les mêmes expériences et pouvoir échanger nos idées et nos difficultés a été précieux.

Merci à l'équipe de Kevin Leumassi, Éric Kenmogne et Jean-Roger Guiala pour votre travail colossal sur l'outil. Votre expertise, votre réactivité pour corriger et ajouter de nouvelles fonctionnalités ont tout changé; merci infiniment pour votre aide précieuse.

Je tiens également à remercier tous les partenaires du projet PIIVO, ainsi que toutes les personnes ayant participé aux ateliers et consultations. Votre contribution a donné à cette recherche une portée concrète et un véritable ancrage dans la réalité.

Enfin, je remercie les membres du jury pour le temps qu'ils m'ont consacré et pour l'expertise précieuse qu'ils apportent afin d'enrichir et d'améliorer ce travail de doctorat.

RÉSUMÉ

Les infrastructures vertes et bleues (IVB) de gestion des eaux pluviales sont reconnues pour leur capacité à fournir une variété de co-bénéfices, tels que l'amélioration de la santé humaine, du bien-être social et économique, de la qualité environnementale et de la biodiversité. Leur intégration dans l'aménagement du territoire peut renforcer la résilience des villes en répondant simultanément aux défis posés par les pressions climatiques et anthropiques croissantes. Leur planification en contexte urbain, c'est-à-dire le choix de leur emplacement, demeure toutefois un problème décisionnel complexe. La multifonctionnalité caractérisant les IVB sous-entend l'implication d'une diversité de disciplines, incluant l'urbanisme, l'environnement, l'écologie urbaine, le transport, le génie, l'architecture de paysage, la géomatique, les sciences sociales et l'économie.

L'implantation des IVB est généralement guidée par une approche « opportuniste » privilégiant les opportunités ponctuelles et immédiates, ce qui peut aboutir à des résultats inefficaces et compromettre la durabilité des projets. Par opposition, une approche « stratégique » privilégie une vision à long terme visant à maximiser les co-bénéfices et à intégrer la pluralité des points de vue et besoins des parties prenantes.

Les outils d'aide à la planification (OAP; en anglais, *planning-support systems*, PSS) qui combinent les systèmes d'information géographique (SIG) et l'analyse de décision multicritère (ADMC) ont gagné en popularité dans les dernières années en raison de leurs avantages pour le soutien à une planification interdisciplinaire et stratégique. Développer des outils suffisamment flexibles pour s'adapter aux spécificités du contexte local, tout en restant applicables à divers contextes, demeure un enjeu. Les OAP pour les IVB sont souvent développés pour une étude de cas unique, ce qui limite leur transférabilité et leur applicabilité à d'autres contextes urbains et climatiques. Pour favoriser leur adoption, il est essentiel de les adapter aux réalités locales tout en s'appuyant sur des outils existants validés. La validation de ces outils est également souvent négligée, en particulier en ce qui concerne les incertitudes associées à l'ensemble des paramètres subjectifs. Une validation rigoureuse, incluant des analyses de sensibilité et d'incertitude, est pourtant nécessaire pour assurer la robustesse et la fiabilité des résultats des OAP. De plus, peu nombreux sont les OAP qui permettent une analyse de l'adéquation spatiale des IVB sophistiquée et l'intégration d'un ensemble complet d'objectifs.

L'outil SSANTO - **S**patial **S**uitability **AN**alysis **TO**ol (Kuller, Bach, et al., 2019) a été développé et testé à Melbourne (Australie) dans une optique de cartographier le potentiel d'implantation (aussi appelé l'*adéquation spatiale*) de sept types d'IVB sur un territoire urbain en fonction d'une variété de critères et des préférences des décideurs. Le cadre théorique de SSANTO aborde l'adéquation spatiale d'une IVB selon deux perspectives : les opportunités qu'offrent les sites (aussi définie par « une IVB a besoin d'un site ») et les besoins que possèdent les sites (aussi définie par « un site a besoin d'une IVB »).

Au Québec (Canada), l'intégration des IVB dans la planification urbaine suscite un intérêt croissant, porté par une prise de conscience accrue de l'importance d'une gestion durable des eaux pluviales et des enjeux sociaux et territoriaux. Toutefois, aucun OAP basé sur l'ADMC et les SIG n'est facilement accessible aux municipalités pour soutenir la planification stratégique des IVB sur leur territoire. Dans ce projet, l'adaptation et le (re)développement d'un OAP existant sont privilégiés, plutôt que la création d'un nouvel outil.

Ce projet de recherche vise à redévelopper l'OAP SSANTO, en l'adaptant au contexte des municipalités québécoises grâce à la théorie de la valeur multi-attributs (en anglais, *multi-attribute value theory*, MAVT). La MAVT est une théorie de l'ADMC simple et intuitive permettant d'intégrer à la fois des données qualitatives et quantitatives ainsi que les préférences des parties prenantes pour classer et orienter le choix entre de solutions dans un problème décisionnel complexe. Le projet vise également à renforcer la transférabilité de SSANTO en élaborant une démarche reproductible pour l'adaptation de ses paramètres d'entrée et l'intégration de nouvelles IVB, tout en y réalisant une analyse approfondie des incertitudes et de la sensibilité des cartes résultantes. Les objectifs du projet de recherche sont les suivants :

> **(1)** Développer un cadre structuré sous forme de hiérarchie d'objectifs pour la planification stratégique des IVB, incluant un ensemble d'objectifs mesurables reflétant les besoins des parties prenantes et les connaissances des experts, pour supporter l'adaptation de l'OAP SSANTO à différents contextes, en s'appuyant sur la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT).
>
> **(2)** Évaluer les préférences et le consensus de parties prenantes du milieu institutionnel, municipal, gouvernemental, professionnel et citoyen, par rapport aux objectifs de planification spatiale stratégique de trois groupes d'IVB : les petits systèmes (groupe A :

biorétention, système d'infiltration et noue), les gros systèmes (groupe B : marais artificiel, étang et lac) et les arbres urbains (groupe C).

(3) Quantifier l'influence de l'incertitude dans les paramètres d'entrée liés aux préférences des parties prenantes et experts, soit les poids des objectifs, la forme des échelles de valeurs et le degré d'additivité de la fonction d'agrégation, sur les cartes d'adéquation spatiale des IVB de l'OAP SSANTO.

Dans le **premier volet** du projet de recherche, un cadre hiérarchique d'objectifs pour la planification des IVB a été élaboré en collaboration avec les parties prenantes du milieu académique, institutionnel, gouvernemental et municipal. Cette démarche s'appuie sur la réflexion axée sur la valeur (en anglais, *value-focused thinking*, VFT) afin d'aligner le cadre avec ce qui est important pour les parties prenantes. Deux ateliers de co-création et de validation du cadre hiérarchique avec 37 parties prenantes ont permis d'identifier les préoccupations communes, en mettant l'accent sur les objectifs les plus et les moins pertinents à intégrer. Certains objectifs ont été suggérés par une majorité des parties prenantes participantes lors des activités de remue-méninges individuelles, tels que la réduction des îlots de chaleur et des inondations urbaines, soulevant la préoccupation partagée à propos de ces enjeux dans le choix des emplacements des IVB. La prise en compte des travaux et projets prévus est également un aspect qui a été largement soulevé par les parties prenantes, mettant en évidence l'importance d'intégrer les opportunités offertes par le territoire dans la planification des IVB. Des consultations avec 17 experts ont permis de valider et d'identifier les attributs et les données spatiales pour mesurer les objectifs identifiés dans le cadre hiérarchique. La performance de chacun des objectifs a ensuite été évaluée en collaboration avec 17 experts via la définition des «échelles de valeurs» (en anglais, *value scales*) de chacun des attributs. L'approche adoptée pour développer l'OAP existant et les entrées de l'outil peuvent être facilement transférées à d'autres villes au Québec (Canada), mais aussi à d'autres contextes urbains, permettant de valoriser les ressources et connaissances existantes.

Dans le **deuxième volet**, des ateliers de pondération des objectifs du cadre hiérarchique ont permis d'étudier les préférences des parties prenantes dans la planification urbaine de trois types d'IVB, soit les petits systèmes (biorétentions, systèmes d'infiltration et noues), les grands systèmes (marais artificiels et étangs et lacs) et les arbres urbains. Une étude de cas préliminaire avec la Ville de Trois-Rivières (Québec, Canada) a recueilli les préférences de 12 parties prenantes pour une

version préliminaire du cadre hiérarchique d'objectifs. Une étude de cas principale impliquant 20 parties prenantes d'organisations institutionnelles, gouvernementales, régionales et locales (organismes à but non lucratif et services de recherche), s'est ensuite concentrée sur l'obtention des préférences pour le cadre hiérarchique développé à l'objectif 1. Un nouvel outil en ligne basé sur une méthode de pondération swing a été utilisé. *Maximiser la facilité d'intégration des IVB dans l'aménagement urbain*, *maximiser la protection des ressources en eau* et *maximiser l'adaptation aux changements climatiques* ont émergé comme des objectifs principaux importants pour tout type d'IVB. Les préférences individuelles varient toutefois selon le type d'IVB, soulignant la nécessité d'adapter les politiques de planification par type de système. Un consensus plus marqué a été observé autour des objectifs répondant aux besoins qu'autour de ceux liés aux opportunités, ces derniers étant davantage associés au contexte urbain spécifique de la ville.

Dans le **troisième volet** du projet de recherche, l'analyse des incertitudes et de la sensibilité de l'OAP SSANTO a été réalisée par une approche globale grâce à des simulations Monte Carlo, afin d'évaluer systématiquement l'influence des poids des objectifs, des échelles de valeurs et du paramètre d'additivité (γ) de la fonction d'agrégation. En combinant une approche spatialisée de Sobol à une propagation d'incertitude basée sur 90 000 simulations Monte Carlo, nous avons quantifié comment ces sources de préférences influencent la variabilité et la structure spatiale des cartes d'adéquation spatiale de SSANTO. Les résultats montrent que le paramètre γ domine largement la sensibilité du modèle, suivi des poids des objectifs, tandis que les échelles de valeurs ont un effet plus limité. Ces résultats offrent des pistes concrètes pour mieux hiérarchiser les paramètres à déterminer avec les parties prenantes et experts lors de processus participatifs et renforcer la robustesse et la transparence des démarches SIG-ADMC.

Le développement d'un outil SIG-ADMC adapté au contexte des municipalités québécoises a permis d'acquérir des connaissances précieuses sur le transfert d'un cadre d'adéquation spatiale existant vers un nouveau contexte urbain et climatique, sur les préférences des acteurs impliqués dans les IVB au Québec, ainsi que sur la robustesse de l'OAP développé. L'intégration de ces outils dans le processus décisionnel et la gouvernance urbaine s'avère hautement pertinente pour guider les décideurs dans la planification des IVB et l'élaboration de plans d'action en matière d'adaptation aux changements climatiques. Leur utilisation pourrait ainsi favoriser la transition vers des villes plus résilientes vis-à-vis des enjeux liés aux eaux pluviales.

ABSTRACT

Blue-green infrastructure (BGI) for stormwater management is recognized for its ability to provide a variety of co-benefits, such as improving human health, social and economic well-being, environmental quality, and biodiversity. Their integration into land-use planning can strengthen urban resilience by simultaneously addressing various challenges posed by increasing climatic and anthropogenic pressures. However, their planning in an urban context, meaning the choice of their location, remains a complex decision-making problem. The multifunctionality characterizing BGI implies the involvement of a diversity of disciplines, covering biophysical, socio-economic, environmental, urban, and regulatory contexts. The implementation of BGI is generally guided by an "opportunistic" approach favoring immediate and ad hoc opportunities, which can lead to ineffective results and compromise the sustainability of projects. Conversely, a "strategic" approach prioritizes a long-term vision aiming to maximize co-benefits and integrate the plurality of viewpoints and needs of stakeholders.

Planning-support systems (PSS) that combine Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) have gained popularity in recent years due to their potential to support interdisciplinary and strategic planning. One of the challenges is to develop tools flexible enough to adapt to the specificities of the local context while remaining applicable to various contexts. Furthermore, few PSS allow for a sophisticated spatial suitability analysis of BGI and the integration of a comprehensive set of criteria. The SSANTO - Spatial Suitability ANalysis TOol (Kuller, Bach, et al., 2019) was developed and tested in Melbourne (Australia) to map the spatial suitability of seven types of BGI in an urban area based on a variety of criteria and decision-makers' preferences. The SSANTO framework approaches the spatial suitability of BGI from two perspectives: the opportunities offered by sites (also defined as "a BGI needs a place") and the needs of sites (also defined as "a place needs a BGI").

In Québec (Canada), the integration of BGI into urban planning is generating growing interest, driven by increased awareness of the importance of sustainable stormwater management and social and territorial challenges. However, no tool is easily accessible to municipalities to support the strategic planning of BGI in their territory. In this project, the adaptation and development of an existing PSS is prioritized rather than creating a new tool.

This research project aims to develop the SSANTO PSS and adapt it for Québec municipalities based on multi-attribute value theory (MAVT). MAVT is a simple and easily understandable MCDA method that allows for the integration of both qualitative and quantitative data, as well as decision-makers' preferences, to rank and guide the selection among complex alternatives. The research objectives are as follows:

> **(1)** Develop a structured framework in the form of an objectives hierarchy for the strategic planning of blue-green infrastructures (BGI), including a set of measurable objectives that reflect both stakeholder needs and expert knowledge, to support the adaptation of the SSANTO planning support system (PSS) to different contexts, based on multi-attribute value theory (MAVT).
>
> **(2)** Assess the preferences and level of consensus among stakeholders from institutional, municipal, governmental, professional, and citizen sectors regarding the strategic spatial planning objectives for three groups of BGI: small-scale systems (Group A: bioretention, infiltration systems, and swales), large-scale systems (Group B: constructed wetlands, ponds, and lakes), and urban trees (Group C).
>
> **(3)** Quantify the influence of uncertainty in input parameters related to stakeholder and expert preferences, namely, objective weights, the shape of value functions, and the degree of additivity in the aggregation function, on the spatial suitability maps of BGI generated by the SSANTO PSS.

In the **first part** of the research project, a hierarchical framework of objectives for BGI planning was developed in collaboration with stakeholders from academia, institutional, governmental, and municipal sectors. This approach is based on value-focused thinking (VFT) to align the framework with what is important to stakeholders. Two co-creation and validation workshops with 37 stakeholders helped identify common concerns, emphasizing the most and least relevant objectives to integrate. Some objectives were suggested by a majority of participating stakeholders during individual brainstorming activities, such as reducing urban heat islands and urban flooding, highlighting the shared concern for these issues in BGI site selection. Considering planned projects is also an aspect that was widely raised by stakeholders, underscoring the importance of integrating territorial opportunities into BGI planning. Consultations with 17 experts allowed for validation and identification of attributes and spatial data to measure the objectives identified in the

hierarchical framework. The performance of each objective was then evaluated in collaboration with 17 experts through the definition of "value scales" for each attribute. The approach adopted to develop the existing PSS and the tool's inputs can be easily transferred to other cities in Québec (Canada) but also to other urban contexts, allowing for the enhancement of existing resources and knowledge.

In the **second part** of the research project, objective weighting workshops were conducted to specifically study stakeholder preferences in urban planning for different types of BGI, namely small systems (bioretention, infiltration systems, and swales), large systems (constructed wetlands and ponds and lakes), and urban trees. A preliminary case study with the City of Trois-Rivières (Québec, Canada) collected the preferences of 12 stakeholders for a preliminary version of the hierarchical objective framework. A main case study with 20 stakeholders from institutional organizations, provincial governments, as well as regional and local organizations such as non-profit organizations (NPOs) and research services, then focused on obtaining preferences for the hierarchical framework developed in objective (1). A new online software based on a recognized MCDA weighting method, the swing method, was used. Maximizing the ease of integrating BGI into urban planning, maximizing the protection of water resources, and maximizing climate change adaptation emerged as key objectives important to stakeholders for all types of BGI. Individual preferences also vary by BGI type in general, highlighting the need to adapt planning policies by system type. A stronger consensus was observed for need-based objectives than for opportunity-based objectives, the latter being more dependent on the specific urban context of each city.

In the **third part**, uncertainty and sensitivity analyses of SSANTO were conducted using a global approach based on Monte Carlo simulations, to systematically evaluate the influence of objective weights, value scales, and the aggregation parameter (γ). Combining a spatial Sobol sensitivity method with 90,000 Monte Carlo simulations, the analysis quantified how these preference-related parameters affect the variability and spatial patterns of SSANTO's suitability maps. Results showed that the γ parameter had the strongest influence on model sensitivity, followed by objective weights, while value scales had a more limited effect. These findings provide concrete guidance for prioritizing which parameters should be co-defined with stakeholders and experts in participatory processes, thereby improving the robustness and transparency of GIS-MCDA approaches.

The development of a GIS-MCDA tool adapted to the context of Québec municipalities has enabled the acquisition of knowledge on the process of transferring an existing spatial suitability framework to a new urban and climatic context, on the preferences of stakeholders involved in BGI in Québec, and on the robustness of the developed PSS. The integration of these tools into the decision-making process and urban governance is highly relevant to guide policymakers in their BGI planning and in developing their climate change adaptation action plans. The use of such tools has the potential to encourage a transition toward more resilient and water-sensitive cities.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE V

REMERCIEMENTS VI

RÉSUMÉ IX

ABSTRACT XIII

LISTE DES TABLEAUX XXIII

LISTE DES FIGURES XXVII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XXXIV

GLOSSAIRE XXXV

AVANT-PROPOS III

LISTE DES ANNEXES VI

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Planifier stratégiquement les infrastructures vertes et bleues 1

1.2 Développer les outils d'aide à la planification ADMC-SIG 2

1.3 Tester les outils d'aide à la planification ADMC-SIG 4

1.4 Aperçu des objectifs de recherche de la thèse 5

1.5 Contexte général de la thèse : Insertion dans un projet multidisciplinaire et interuniversitaire 6

1.6 Structure de la thèse 7

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE 9

2.1 Enjeux de la gestion des eaux pluviales 9

2.1.1 Impacts sur la santé publique et les activités anthropiques 12

2.1.2 Impacts sur les écosystèmes naturels 13

2.2 Infrastructures vertes et bleues (IVB) 14

2.2.1 Terminologies 14
2.2.2 Types 16
2.2.3 Bénéfices 17
2.2.4 Défis de la planification spatiale des IVB 21
2.2.5 Au Québec 35
2.3 Théorie de la valeur multi-attributs (MAVT) 37
2.3.1 Structuration du problème décisionnel 39
2.3.2 Obtention des préférences 43
2.3.3 Fonction d'agrégation 48
2.3.4 Analyses d'incertitude et de sensibilité 50
2.4 Les outils d'aide à la planification (OAP) 61
2.4.1 Revue des OAP 62
2.4.2 Adaptation d'OAP existant à différents contextes 71
CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE 73
3.1 Écart de connaissance dans la littérature et la pratique 73
3.2 Objectifs de la recherche 77
3.3 Méthodologie 81
3.3.1 SSANTO : Un outil d'aide à la planification SIG-ADMC 81
3.3.2 Étapes suivies 88
CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : CAN WE STOP REINVENTING THE WHEEL IN BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE PLANNING ? USING VALUE-FOCUSED THINKING TO ENABLE TRANSFERABILITY OF A MULTICRITERIA PLANNING SUPPORT SYSTEM 93
4.1 Highlights 93
4.2 Abstract 94
4.3 Introduction 94

4.3.1 Background 94
4.3.2 Aim of the study 97
4.4 Methodology 97
4.4.1 Original Australian GIS-MCDA based PSS for BGI planning 98
4.4.2 Formulating and structuring the framework around VFT 99
4.4.3 Operationalization of the framework 104
4.4.4 Developing an objective-based hierarchical framework 106
4.5 Results 106
4.5.1 Means-ends network 106
4.5.2 Master list of objectives 108
4.5.3 Results of the validation and co-creation workshops (1.a and 1.b) 108
4.5.4 Objective hierarchies for BGI planning 110
4.5.5 Value scales 113
4.6 Discussion 115
4.6.1 Moving towards VFT 115
4.6.2 Operationalizing objectives with experts 118
4.6.3 Usability for other urban contexts 119
4.6.4 Limitations and further research 122
4.7 Conclusion 122
CHAPITRE 5 ARTICLE 2 : UNCOVERING STAKEHOLDER PREFERENCES FOR URBAN BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE SITING : INSIGHTS FROM ONLINE SWING WEIGTHS ELICITATION 126
5.1 Highlights 126
5.2 Abstract 127
5.3 Introduction 127

5.3.1 How to elicit weights from stakeholders? 129
5.3.2 Research aim 131
5.4 Methodology 132
5.4.1 Context 132
5.4.2 Data collection: swing weights elicitation 139
5.4.3 Design of workshops and questionnaires 140
5.4.4 Data analysis 142
5.5 Results 143
5.5.1 Importance of higher-level objectives 143
5.5.2 Importance of lower-level objectives 146
5.5.3 Stakeholders' consensus on specific objectives 150
5.5.4 Stakeholders' agreement on the general set of objectives 151
5.5.5 Stakeholder feedback 157
5.5.6 Summary 157
5.6 Discussion 160
5.6.1 Practical implications for BGI planning 160
5.6.2 Critical reflections on the preference elicitation procedure 162
5.6.3 Limitations and future research 165
5.7 Conclusion 166
CHAPITRE 6 ARTICLE 3 : ARE WE ELICITING THE RIGHT PREFERENCES ? INSIGHTS FROM SPATIAL MCDA SENSITIVITY AND UNCERTAINTY ANALYSIS ... 170
6.1 Highlights 170
6.2 Abstract 171
6.3 Introduction 171
6.3.1 Definitions 172

6.3.2 Review of UA and SA for GIS-MCDA models 173
6.3.3 Research aims 175
6.4 Methodology 176
6.4.1 Methodological overview 176
6.4.2 Case study settings 177
6.4.3 Simulation method 181
6.4.4 Sampling strategy for input parameters 181
6.4.5 Uncertainty analysis 188
6.4.6 Global sensitivity analysis 188
6.5 Results 191
6.5.1 Uncertainty analysis 192
6.5.2 Global sensitivity analysis 193
6.6 Discussion 200
6.6.1 Implications for elicitation process 201
6.6.2 Limits and future research 205
6.7 Conclusion 206
CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE 210
7.1 Synthèse des contributions du projet de recherche 210
7.2 Retour sur les questions de recherche 212
7.2.1 Apports de la structuration hiérarchique pour l'adaptation d'un OAP 215
7.2.2 Apports de la co-création dans la définition des objectifs d'un OAP 216
7.2.3 Opérationnalisation des objectifs avec des experts clés 220
7.2.4 Priorisation et consensus des objectifs par les parties prenantes 221
7.2.5 Optimisation de l'effort participatif par l'analyse d'incertitudes et de la sensibilité 223

7.3 Quel rôle joue le contexte local sur le développement et l'utilisation des OAP? 225
7.4 Comment intégrer dans la pratique un OAP pour les IVB au Québec? 228
7.5 Contribution aux plans climats 231
7.6 Limites et perspectives 234
CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 241
8.1 Recommandations 244
RÉFÉRENCES 249
ANNEXES 290

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Compilation de critères pour l'implantation des IVB selon quatre guides nord-américains 24

Tableau 2.2 Méthodes existantes pour définir les échelles de valeurs des attributs 44

Tableau 2.3 Méthodes de pondération les plus utilisées selon le classement de Riabacke et al. (2012b) 46

Tableau 2.4 Vue d'ensemble des études existantes sur les préférences et perceptions des parties prenantes en relation avec les IVB 47

Tableau 2.5 Règles d'agrégation communes en ADMC 49

Tableau 2.6 Revue d'études ayant réalisées des analyses d'incertitude (AI) et de sensibilité (AS) pour un modèle SIG-ADMC 58

Tableau 2.7 Études SIG-ADMC pour la planification spatiale des IVB 65

Tableau 2.8 Compilation des caractéristiques des cadres et outils. Les références A à T sont celles des cadres et outils présentés au tableau 2.7. Le type de critères suit la classification des facteurs déterminants l'adéquation spatiale d'un site de (Kuller et al., 2017) 69

Tableau 3.1 Objectifs, hypothèses et contribution du projet de recherche 78

Tableau 3.2 Questions de recherche abordées dans différentes sections de la thèse 81

Tableau 3.3 Caractéristiques de la première application de la version originale de SSANTO (Kuller, Bach, et al., 2019) 85

Tableau 3.4 Types d'attribut possibles dans SSANTO pour mesurer les objectifs 87

Tableau 3.5 Résumé des étapes suivies, la démarche entreprise et les résultats produits pour mener le projet de recherche 90

Tableau 4.1 Sequence of analyses conducted to select the objectives to be included in the framework based on the results from the two workshops with stakeholders (1.a and 1.b). 103

Table 5.1 Research questions, associated working hypotheses and references supporting the formulation of the hypotheses (see Appendix E for detailed explanation of the hypotheses) 139

Table 5.2 Coefficient of variation (CV) by lower-level objective for each BGI group for both suitability perspectives (opportunities: top; needs: bottom). The color scale reflects the range of values within each BGI group and perspective 151

Table 5.3 Implications for practice of decision-making in BGI planning 161

Tableau 5.4 Key challenges and recommendations for the preference elicitation process 164

Table 6.1 Selected objectives, attributes and geospatial data for UA and SA in the BGI suitability analysis based on Lacroix et al. (2024) 180

Table 6.2 Characteristics of input parameters 182

Table 6.3 Statistics on sensitivity analysis (first-order index Si and total effect STi) between pixels over the study area. STi-Si (%) quantifies the isolated effect resulting from interactions with other parameters 195

Tableau 6.4 Recommendations regarding the elicitation process of input parameters 204

Tableau 7.1 Retour préliminaire sur les avantages perçus d'un OAP comme SSANTO dans les pratiques au sein des municipalités du Québec 230

Tableau 7.2 Synergies entre le développement de l'OAP SSANTO et les stratégies gouvernementales 233

Tableau 7.3 Synergies entre le développement de l'OAP SSANTO et les stratégies gouvernementales (suite) 234

Tableau A.2.1 Exemples de parties prenantes (PP) pertinentes relevées dans des cas d'étude en contexte de décisions environnementales 285

Tableau A.3.1 Résumé de l'analyse d'incertitude et de sensibilité et les types 288

Tableau A.5.1 Études ADMC ayant réalisé des analyses d'incertitude (AI) et de sensibilité (AS) sur la variation de courbure des fonctions de valeurs (c) et du paramètre d'agrégation (γ) 294

Table D.2.1 Sources of decision criteria considered as values 313

Table D.2.2 Master list of objectives developed based on literature, existing frameworks and guidelines 315

Table D.2.3 Role, sector of activity and expertise of each expert consulted to define and validate measurable attributes 319

Table D.2.4 Geospatial datasets 320

Table D.2.5 Experts consulted to elicit the value scales of the attributes measuring objectives of the framework for BGI planning 324

Table D.3.1 Additional information about fundamental objectives 326

Table D.3.2 Rationales why criteria from the original GIS-MCDA framework were not considered as values at step 1 of our adaptation methodology 330

Table D.3.3 Grid for analyzing the master list objectives following co-creation and validating workshops (1.a and 1.b) with the 37 stakeholders. Four possible changes have been made to the objectives of our master list: excluded, converted as an overlay data, combined with another objective and kept as it was. 331

Table D.3.4 Analysis grid of the remaining 17 objectives suggested by stakeholders after sorting according to inclusion condition 1 and 2. The suggested objectives are presented in order of times generated by participants. 335

Table D.3.5 Insights from discussions with experts about suggested new objectives or attributes by stakeholders during workshops 1.a and 1.b 336

Table D.3.6 Summary of discussions from expert's consultation about measurable attributes for objectives framework 339

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst). 342

Table E.1.1 Stakeholder profiles participating in the swing weights elicitation workshops 363

Table E.5.1 Information on elicited swing weights 373

Table E.6.1 Interpretation of coefficient of variation CV, from Jayasooriya et al. (2019) 373

Table E.7.1 Interpretation of Spearman correlation coefficient ρ, adapted from Dancey and Reidy (2004) 374

Table E.8.1 Key considerations for interpreting the results 375

Table E.10.1 Preliminary case study weights statistics for BGI planning objectives through swing elicitation method (n=12) 410

Table E.10.2 Main case study individual stakeholder weights of objectives, BGI group A 412

Table E.10.3 Main case study individual stakeholder weights of objectives, BGI group B 413

Table E.10.4 Main case study individual stakeholder weights of objectives, BGI group B 414

Table E.11.1 Examples of qualitative feedback from stakeholders on the potential causes of their difficulties 421

Table F.1.1 Mean weights and standard deviation for each objective based on Lacroix et al. (2025) 423

Table F.1.2 Best-fitting “c” parameter value for each attribute and the range of variation of the normal distribution 424

Table F.1.3 Selected input characteristics of the sobol_indices() function from the R package sensobol 427

Table F.2.1 Summary of convergence and validity checks for Sobol sensitivity indices..... 430

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Aperçu de l'organisation de la thèse, divisée en huit chapitres 8

Figure 2.1 Thématiques et sections de la revue de la littérature 9

Figure 2.2 Exemples d'infrastructures vertes et bleues (sources : S. Lacroix) 17

Figure 2.3 Exemple d'une organisation hiérarchique des objectifs avec un objectif principal, des sous-objectifs, des attributs mesurables et des données associées en contexte spatial 40

Figure 2.4 Analyse des secteurs d'activité des parties prenantes potentielles en contexte de planification des IVB et de décisions environnementales 42

Figure 3.1 Cadre théorique de SSANTO selon la définition par Kuller et al. (2017) 82

Figure 3.2 Organigramme de fonctionnement de SSANTO selon l'utilisateur 86

Figure 3.3 Interface de l'OAP SSANTO 88

Figure 3.4 Organigramme de la méthodologie du projet de recherche selon les étapes de la MAVT de Bertsch et al. (2016) et Lienert and Aubert (2020) 89

Figure 4.1 Representation of our methodology based on VFT 98

Figure 4.2 Steps of the face-to-face workshops 1.a and 1.b for objectives validation. Approach adapted from Haag, Zürcher, et al. (2019) 102

Figure 4.3 Means-ends network supporting the organization of objectives in the proposed hierarchical framework for the siting of BGI (including objectives from the opportunities and needs perspectives) 107

Figure 4.4 Results from the analysis of master list objectives following the co-creation and validation workshops (1.a and 1.b) with 37 stakeholders. Four possible actions were applied to the objectives of our master list: excluded, converted as an overlay data, combined with another objective, or kept as it was 109

Figure 4.5 Hierarchy-based framework for BGI planning for the opportunities and for the needs perspectives. (A) Hierarchy of objectives for smaller systems mostly based on short-term detention and infiltration: bioretention & rain gardens, infiltration systems and swales 111

Figure 4.6 Hierarchy-based framework for BGI planning for the opportunities and for the needs perspectives. (B) Hierarchy of objectives for bigger systems with permanent water: constructed wetlands and ponds & lakes..... 112

Figure 4.7 Example of value scales obtained for the three types of attributes (categorical, boolean, and continuous) based on the objective, the attribute, and the type of BGI. On the right, an example of the value scale representation for the continuous attribute “distance to an existing green space” is shown. A suitability score of 1 represents the site most suitable for achieving the targeted objective, while a score of 0 represents the least suitable site..... 114

Figure 4.8 Potential transferability of the hierarchical objectives framework components and recommendations for further application to other urban contexts 119

Figure 4.9 Pros and cons of relative vs absolute value scales..... 122

Figure 5.1 Illustrative example of an objective hierarchy according to Lacroix et al. (2024).... 134

Figure 5.2 Overview of the composition of the hierarchies of objectives, illustrating the possible higher-level objectives (in grey boxes) based on opportunities and needs suitability perspectives and the number of lower-level (L-L) objectives per hierarchy within each branch for both case studies 136

Figure 5.3 Overview of the case studies process, linking the objective hierarchies’ sources used to elicit the weights, information about workshops and the outputs of each case study. The dotted lines are steps from past studies and full lines are the steps on which we focus in the present study (on weight elicitation). An example of a higher-level objective is to maximize climate adaptation and a related lower-level objective could be to minimize exposure to heat islands 138

Figure 5.4 Swing weights elicitation workshops sequence..... 142

Figure 5.5 Main case study weights for higher-level objectives for each BGI group type (top to bottom from A to C) for each suitability perspective; opportunities (left) and needs (right). BGI group A (n=14 for opportunities and n=13 for needs), BGI group B (n=14) and BGI group C (n=11). The boxplots are presented in decreasing order of mean weight. Horizontal line shows the weights median, X point shows the weights’ mean, I bar shows weights’ maximum and minimum and dots (empty circles) show the individual weights..... 145

Figure 5.6 Main case study weights by lower-level objective for each BGI group (top to bottom from A to C) for each suitability perspective: opportunities (left) and needs (right). BGI group A (n=14 for opportunities and n=13 for needs), BGI group B (n=14) and BGI group C (n=11). The boxplots are presented in decreasing order of mean weight. Horizontal line shows the median weight, X point shows the mean weight, I bar shows weights maximum and minimum and dots (empty circles) show the individual weights 149

Figure 5.7 Spearman correlation between weights sets derived for each stakeholder (SH; represented by their identification letter from Appendix E.1) from swing elicitation for the main case study, each BGI groups (A, B and C) and each suitability perspective (opportunities and needs). The top half of the matrices shows weights for the opportunities' perspective and the lower half for needs. The color scale reflects correlation strength: positive values indicate agreement, negative values indicate disagreement. **Bold numbers**: p-value<0.01, showing strong evidence against the null hypothesis 152

Figure 5.8 Lower-level objectives rankings from stakeholders grouped according to the categories of independent variables (field of study, professional role and organization type) for BGI group A (bioretention, infiltration system and swale)..... 156

Figure 5.9 Summary of results for the three main research questions (RQ). For RQ1, colors indicate the top 3 highest (green) and lowest (red) mean weights. For RQ2, colors indicate the top 3 highest (green) and lowest (red) consensus. For RQ3, the correlation level class for each majority of Spearman pairwise comparisons in opportunities and needs suitability perspectives is shown 159

Figure 5.10 Spatial suitability maps of BGI group A implementation according to two contrasting sets of weights (ρ=-0.61 for opportunities objectives) from stakeholder SH_I (left) and SH_R (right), applied in a small case study area(Quebec, Canada) 160

Figure 6.1 Overview of the approach used to perform sensitivity and uncertainty analyses on spatial suitability score maps derived from a GIS-MCDA PSS, based on three types of input parameters (n = 22) 177

Figure 6.2 Operating diagram of the PSS SSANTO 179

Figure 6.3 Procedures for generating samples of weights of objectives following two different strategies 183

Figure 6.4 Procedure for generating samples of value scales according to the attribute type 186

Figure 6.5 Uncertainty maps: Minimum (a), maximum (b), mean (c) and standard deviation (d) suitability maps 193

Figure 6.6 (a) Relationship between the mean Si (%) across pixels for weight of objective parameter and the mean stakeholder-assigned weights. (b) Relationship between the mean STi - Si (%) across pixels for value scale shape parameters and the spatial correlation 197

Figure 6.7 Sensitivity maps of first-order index Si 199

Figure 6.8 Sensitivity maps of Total effect index STi 200

Figure 7.1 Principales contributions académiques et pratiques des trois objectifs du projet de recherche au fil du processus ADMC (Belton & Stewart, 2010) 212

Figure 7.2 Organigramme illustrant le fil conducteur de la thèse, suivant les étapes clés de la MAVT de Bertsch and Fichtner (2016) et Lienert and Aubert (2020) et un retour sur les résultats clés 214

Figure 7.3 Coefficient de corrélation de Pearson entre la proportion de parties prenantes ayant voté pour l'exclusion d'un objectif ou l'ayant suggéré dans les remue-méninges individuels (CHAPITRE 4) et les pondérations moyennes attribuées aux objectifs par la méthode de pondération swing (CHAPITRE 5) par type d'IVB 219

Figure A.6.1 Exemple d'un échantillon quasi-aléatoire de Sobol basé sur un échantillonnage radial dans un espace d'entrées de deux dimensions [gauche] et de trois dimensions (Tarantola & Becker, 2016) [droite] 295

Figure A.7.1 Exemple d'une représentation des indices de sensibilité par des cartes adjacentes de cinq paramètres d'entrée [gauche] (Şalap-Ayça et al., 2021a) et d'une représentation par une carte coïncidente ou une carte de dominance [droite] (Şalap-Ayça et al., 2021a) 296

Figure B.1.1 Déroulement de la phase d'ateliers 1 299

Figure B.2.1 Exemple d'utilisation de la méthode de la notation directe pour définir l'échelle de valeurs d'un attribut catégorique 301

Figure B.2.2 Exemple d'utilisation de la méthode de la bissection inspiré du protocole PDF adapté de Lienert (2019) pour un attribut de type «continu» 302

Figure C.1.1 Explications de la méthode de pondération swing 305

Figure C.2.1 Déroulement de la phase d'ateliers 3 308

Figure D.1.1 Representation of stakeholders participating in workshop 1.a and 1.b. 311

Figure D.3.1 Concordance and evolution of criteria to objectives between: Original framework of GIS-MCDA tool SSANTO, guidelines, framework of Dagenais et al. (2014), and other literature, across first three methodological steps. The last section of the figure depicts the reasons why six criteria of the original SSANTO's framework were not considered. 329

Figure E.2.1 Preliminary case study: Hierarchies of objectives for small BGI systems (bioretention, infiltration system and swale, hereafter referred to as group A), large BGI systems (constructed wetland and pond & lake, hereafter referred to as group B), green roofs and rainwater tanks for strategic BGI spatial planning related to opportunities suitability perspective. 364

Figure E.2.2 Main case study: Hierarchies of objectives for bioretention, infiltration systems and swales (BGI group A) for strategic BGI spatial planning related to opportunities (top) and needs (bottom) suitability perspective. Adapted from Lacroix et al. (2024). 366

Figure E.2.3 Main case study: Hierarchies of objectives for constructed wetlands and ponds and lakes (BGI group B) for strategic BGI spatial planning related to opportunities (top) and needs (bottom) suitability perspective. Adapted from Lacroix et al. (2024). 367

Figure E.3.1 Overview of the ValuePreferences (Version: 3.1.4) (Aubert & Masson, 2021) software interface and the steps stakeholders follow in the questionnaires. 369

Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives 381

Figure E.9.2 Swing weight questionnaire excerpt for BGI group A and needs-related objectives 398

Figure E.9.3 Feedback questionnaire 403

Figure E.10.1 Preliminary case study resulting weights for higher-level objectives for each suitability perspective; opportunities (left) and needs (right) 407

Figure E.10.2 Preliminary case study resulting weights by higher-level objectives for each suitability perspective; opportunities (top) and needs (bottom) 411

Figure E.10.3 P-values resulting from hypothesis testing between pairs of stakeholders. P-values help to understand if the Spearman correlation is statistically significant. It varies between 0 and 1, with values close to 1 suggesting no significant relationship and close to 0 more unlikely due to chance and that there is a significant relationship. 415

Figure E.10.4 Lower-level objectives rankings from stakeholders grouped according to the categories of independent variables (field of study, professional role and organization type) for BGI group A (bioretention, infiltration system and swale) 416

Figure E.10.5 Lower-level objectives rankings from stakeholders grouped according to the categories of independent variables (field of study, professional role and organization type) for BGI group B (constructed wetland and pond & lake) 417

Figure E.11.1 Lower-level objectives rankings from stakeholders grouped according to the categories of independent variables (field of study, professional role and organization type) for BGI group C (urban trees) 418

Figure E.11.2 Stakeholder feedback compiled form the Google forms questionnaire on the main case study weight elicitation workshop 419

Figure E.11.3 Stakeholder feedback compiled form the Google forms questionnaire on the preliminary case study weight elicitation workshop 420

Figure F.1.1 Representation of the value scales elicited by experts in Lacroix et al. (2024), along with the best exponential function fit and the maximum and minimum variation range of each attribute 425

Figure F.1.2 Individual attribute suitability maps. 429

Figure F.2.1 Spatial correlation of value scales maps (i.e. geospatial dataset translated into its individual performance map using the best exponential approximation of the expert-elicited value scales; $\gamma = 1$) 431

Figure F.2.2 Sensitivity maps of first-order index S_i 432

Figure F.2.3 Sensitivity maps of Total effect index S_{Ti} 434

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADMC	Aide à la décision multicritère
AHP	Processus d'analyse hiérarchique (en anglais, *Analytic hierarchy process*)
AI	Analyse d'incertitude
ANP	Processus analytique en réseau (en anglais, *Analytical Network Process*)
AS	Analyse de sensibilité
ASL	Analyse de sensibilité locale
ASG	Analyse de sensibilité globale
BGI	*Blue-green infrastructure*
GIS	*Geographic information system*
IA	Intelligence artificielle
IVB	Infrastructures vertes et bleues
MAVT	Théorie de la valeur multi-attributs (en anglais, *Multi-attribute value theory*)
MCDA	Multicriteria decision analysis
MES	Matières en suspension
PGO	Pratiques de gestion optimale
PGOSV	Pratiques de gestion optimale à la source végétalisées
PSS	Planning-support system
OAP	Outil d'aide à la planification
OAT	Méthode un-à-la-fois (en anglais, *One-At-a-Time*)
OWA	Moyenne pondérée ordonnée (en anglais, *Ordered Weighted Averaging*)
SIG	Système d'information géographique
SE	Services écosystémiques
SSANTO	Spatial Suitability ANalysis Tool
WLC	Combinaison linéaire pondérée (en anglais, *Weighted Linear Combination*)

GLOSSAIRE

Le *glossaire* permet de définir les concepts clés abordés dans la thèse, tel que nous les utilisons.

Infrastructures vertes et bleues (IVB)	Les infrastructures vertes et bleues (IVB) combinent éléments verts et bleus à différentes échelles géographiques et leur connectivité en réseau est essentielle pour maximiser leurs bénéfices.
Adéquation spatiale (en anglais, *spatial suitability*) **:**	L'adéquation spatiale d'un site à l'implantation d'une infrastructure verte et bleue (IVB) fait référence au niveau de convenance d'un emplacement sur le territoire pour répondre à un ou des objectifs.
Planification spatiale:	La planification spatiale désigne le processus stratégique de gestion de l'espace et des ressources territoriales (Huxley, 2009). La planification spatiale des infrastructures vertes et bleues (IVB) fait référence ici au choix de l'emplacement optimal pour leur implantation.
Outil d'aide à la planification (OAP) :	Un outil d'aide à la planification (OAP) intègre des outils informatiques de système d'information géographique (SIG) afin de soutenir la planification d'initiatives futures dans un contexte de planification particulier et à une échelle spécifique (Geertman & Stillwell, 2003).
Partie prenante :	Les parties prenantes sont définies comme les personnes partageant un intérêt commun ou un enjeu particulier dans une problématique spécifique (Grimble & Wellard, 1997; Luyet et al., 2012). Pour la planification des infrastructures vertes et bleues (IVB), ces parties prenantes peuvent représenter des institutions impliquées dans la planification, telles que les municipalités, les gouvernements provinciaux, ainsi que des organisations régionales et locales, comme des organisations à but non lucratif et des services de recherche, ou des organisations citoyennes. Elles peuvent avoir un lien avec la zone d'étude ou être des acteurs clés de leur mise en œuvre, tels que les décideurs, les planificateurs d'IVB et les représentants d'institutions ayant un intérêt dans la planification.
Expert :	Les experts sont définis comme des personnes possédant des connaissances spécifiques sur les phénomènes liés à la mise en œuvre des infrastructures vertes et bleues (IVB). Le concept d'expert est parfois intimement lié à celui de partie prenante dans le cadre du projet de recherche, puisqu'un expert possédant les connaissances spécifiques ou l'expertise pratique sur un aspect de la planification des IVB peut également être une partie prenante touchée ou impliquée dans cette planification.
Théorie de la valeur multi-attributs (en anglais, *Multi-Attribute Value Theory; MAVT*)**:**	La théorie soutient que chacune des solutions de la décision peut être représentée par un score numérique traduisant la priorisation des solutions, généralement de 0 à 1 (Langhans & Lienert, 2016a).
Solution :	Les solutions représentent les options possibles dans une prise de décision, chacune entraînant des conséquences différentes. Elles doivent être mutuellement exclusives, c'est-à-dire qu'elles combinent des actions qui s'excluent mutuellement, on ne peut en choisir qu'une seule (Eisenführ et al., 2010).
Objectif :	Dans le cadre de l'ADMC, les objectifs sont composés de trois éléments : (1) ils sont cadrés dans un contexte décisionnel, (2) ils possèdent un «objet» (par exemple, îlots de chaleur) et (3) ils sont formulés selon une direction des préférences (par exemple, réduire) (Ferretti & Montibeller, 2016; Keeney, 1996).

Attribut :	Les attributs servent à mesurer objectivement dans quelle mesure un objectif est atteint, aussi appelés indicateurs (Eisenführ et al., 2010; Langhans & Lienert, 2016a; Langhans et al., 2014).
Échelle de valeurs :	Les échelles de valeurs, pouvant être sous forme d'une fonction de valeurs ou d'une échelle, représentent le degré d'atteinte de l'objectif, pour chaque attribut, sur une échelle commune normalisée allant de 0 à 1 (Langhans & Lienert, 2016a).
Analyse d'incertitude :	L'analyse d'incertitude permet de comprendre comment l'incertitude des paramètres d'entrée se propage à travers le modèle et affecte ses résultats (Saltelli et al., 2008).
Analyse de sensibilité :	L'analyse de sensibilité permet de comprendre comment les incertitudes des résultats peuvent être réparties qualitativement et quantitativement entre les différentes sources d'incertitude des entrées (Saltelli et al., 2008).

AVANT-PROPOS

Le projet de recherche a conduit à la publication de trois articles à titre d'auteure principale publiés ou soumis dans une revue évaluée par les pairs et un article diffusé dans le milieu pratique québécois à titre d'auteure principale. Le travail de recherche en parallèle a conduit à trois articles en tant que co-auteure. De plus, le travail a été présenté à 11 conférences, trois à l'international et huit au Canada.

Article publié en tant qu'auteure principale dans une revue évaluée par les pairs

Lacroix, S., Kuller, M., Gougeon, G., Petrucci, J., Lemieux-Chalifour, F., Rioux, A., Dagenais, D., & Bichai, F. (2024). Can we stop reinventing the wheel in blue-green infrastructure planning? Using value-focused thinking to enable transferability of a multicriteria planning support system. *Landscape and Urban Planning*, *252*, 105188 (16 pages). https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105188

Article soumis en tant qu'auteure principale dans une revue évaluée par les pairs

Lacroix, S., Kuller, M., Aubert, A., Dagenais, D., & Bichai, F. Uncovering stakeholder preferences for urban blue-green infrastructure siting: Insights from online swing weights elicitation. *Cities* (under revision)

Lacroix, S., Kuller, M., Jalbert, J., Dagenais, D., & Bichai, F. Are we eliciting the right preferences? Insights from spatial MCDA sensitivity and uncertainty analysis (submitted)

Articles co-écrits dans une revue évaluée par les pairs

Rioux, A., **Lacroix, S.**, Kuller, M., Bichai, F., & Dagenais, D. (2025). Strategic Urban Tree Planning in a Canadian metropolitan city: A Comparative Exploration of City-Planned and MCDA-Driven Approaches. *Trees, Forests and People*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5221185

Bousquet, M., Kuller, M., **Lacroix, S.**, & Vanrolleghem, P. A. (2023). A critical review of MCDA practices in planning of urban green spaces and NBS. Blue-green systems, 5(2), 200-219. https://doi.org/10.2166/bgs.2023.132

Gougeon, G., Bouattour, O., Formankova, E., St-Laurent, J., Doucet, S., Dorner, S., **Lacroix, S.**, Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. (2023). Impact of bioretention cells in cities with a cold climate: modeling snow management based on a case study. *Blue-Green Systems*, *5*(1), 1-17. https://doi.org/10.2166/bgs.2023.032

Publication dans une revue diffusée dans le milieu pratique du génie municipal

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. (2024). Développement d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur l'emplacement des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales dans les municipalités québécoises. *La revue Génial*, 129, 21-24. https://www.aimq.net/genial-la-revue/

Présentation à des conférences

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. Développement d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur les sites d'implantation d'infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales au Québec. **Journées québécoises étudiantes CentrEau: Demi-finales MP3min-Gouvernance et gestion de l'eau**, 04 mars 2021 (présentation virtuelle).

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. Développement d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur les sites d'implantation d'infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales au Québec. **88e Congrès de l'Acfas: colloque 214 - Gouvernance de l'eau à l'ère des changements globaux**, 05 mai 2021 (présentation virtuelle).

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. Adaptation et mise à l'épreuve d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur les sites d'implantation d'infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales au Québec. **Conférence nationale de l'ACRH 2021**, 03 juin 2021 (présentation virtuelle).

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. Le choix des sites d'implantation des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales: Un processus multicritère. **Canadian IWA Young Water Professionals Conference**, 25 juin 2021 (présentation virtuelle).

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. Adaptation of a spatial multicriteria analysis tool for decision support on green stormwater infrastructure siting: from an

Australian to Canadian urban context. **15th International Conference on Urban Drainage, Melbourne**, 28 octobre, 2021 (présentation virtuelle).

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. Développement d'un outil d'analyse spatiale multicritère pour l'aide à la décision sur l'emplacement des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales dans les municipalités québécoises. **Forum sur les infrastructures végétalisées**, 17 février 2022 (présentation virtuelle).

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. Development of a multi-criteria spatial analysis tool for decision support on the location of blue-green stormwater management infrastructure in Canadian context. **IWA World Water Congress & Exhibition, Copenhagen-Denmark**, 11-15 septembre 2022.

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. Adaptation d'un cadre d'analyse spatiale multicritère pour la planification des infrastructures bleues-vertes à un contexte urbain québécois. **Congrès INFRA 2023, Saint-Hyacinthe, Québec**, 04 et 05 décembre 2023.

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. How to stop reinventing the wheel in blue-green infrastructure planning? A spatial multi criteria analysis framework based on value-focused thinking. **16th International Conference on Urban Drainage (ICUD2024), Delft, Netherlands**, June 2024.

Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. How important are stakeholder preferences in BGI planning? **SURE 4th World Conference, "Cities under global social transformations: Embracing change for a greener future" (SURE 2025)**, Istanbul, Turkey, July 2025.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Complément à la revue de littérature 285

ANNEXE B Complément à la méthodologie de l'objectif 1 300

ANNEXE C Complément à la méthodologie de l'objectif 2 306

ANNEXE D Supplementary material, Article 1: Can we stop reinventing the wheel in blue-green infrastructure planning? using value-focused thinking to enable transferability of a multicriteria planning support system 312

ANNEXE E Supplementary material, Article 2: Uncovering stakeholder preferences for urban blue-green infrastructure siting: Insights from online swing weights elicitation 364

ANNEXE F Supplementary material, Article 3: Are we eliciting the right preferences? Insights from spatial MCDA sensitivity and uncertainty analysis 421

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La pression croissante exercée par l'urbanisation et les changements climatiques amplifie les défis liés au drainage de l'eau en milieu urbain. Grandement caractérisée par l'imperméabilisation des surfaces, l'urbanisation a transformé le milieu naturel en milieu bâti. Les impacts néfastes sur le climat, le cycle hydrologique, la santé des écosystèmes et les activités humaines sont nombreux et à risque d'être exacerbés par les changements des régimes de précipitations et de températures anticipés. Selon les prévisions, l'intensité et la fréquence des événements de pluie et de chaleur extrêmes augmenteront avec les changements climatiques (IPCC, 2023; Mailhot et al., 2012; Ouranos, 2015), amplifiant la vulnérabilité des communautés urbaines et des milieux naturels (par exemple, inondations, îlots de chaleur, débordement des réseaux d'égouts unitaires, perte d'habitats naturels, etc.). Pour renforcer la résilience urbaine, la gestion des eaux pluviales doit être partie intégrante de la planification du territoire. Dans cette optique, la transition vers des villes plus vertes encourage l'émergence de solutions innovantes, telles que les infrastructures vertes et bleues (IVB), qui favorisent une approche intégrée et durable de la gestion des eaux pluviales (Ghofrani et al., 2017; Przestrzelska et al., 2024). Contrairement aux infrastructures grises, souvent conçues pour répondre à un seul objectif, comme la gestion des eaux de ruissellement, les IVB se distinguent par leur capacité à générer des co-bénéfices et à remplir plusieurs fonctions simultanément (Matsler et al., 2021; Sobhaninia et al., 2025).

1.1 Planifier stratégiquement les infrastructures vertes et bleues

Le concept d'IVB gagne en popularité à différents endroits dans le monde depuis quelques années (Kopp et al., 2021; Przestrzelska et al., 2024). Les IVB regroupent des systèmes naturels ou semi-naturels interconnectés imitant les processus naturels grâce à des éléments végétalisés et aquatiques (Ghofrani et al., 2017). Vues comme des alternatives plus durables aux infrastructures grises traditionnelles de gestion de l'eau, leur intégration à l'aménagement des villes est de plus en plus préconisée en raison des nombreux bénéfices qui en découlent (Almaaitah et al., 2021). Cette montée en popularité des IVB s'accompagne d'une prise de conscience de l'importance des services écosystémiques (SE) en milieu urbain, soit l'ensemble des bénéfices directs et indirects que les écosystèmes fournissent à la population (Russo et al., 2017). Les IVB permettent la diminution des volumes et débits de ruissellement et l'amélioration de leur qualité en favorisant des processus tels que l'infiltration, l'évapotranspiration, la décantation et la réutilisation de l'eau

(Ghofrani et al., 2017; MDDEFP, 2011). Elles offrent également de multiples bénéfices socio-environnementaux : amélioration de la qualité de l'air et de l'eau, mitigation des îlots de chaleur et des inondations urbaines, accroissement de la biodiversité, amélioration de la qualité de vie et de la santé des populations par un environnement plus esthétique, des espaces verts récréatifs ou en favorisant la mobilité active (Autixier et al., 2014; Dagenais et al., 2017; Kuller, Bach, et al., 2018; Rayfield et al., 2015).

Étant donné le caractère multifonctionnel des IVB, l'enjeu pour les municipalités est d'intégrer les préoccupations et avis de toutes les parties prenantes concernées, de briser les silos entre les services municipaux limitant les démarches participatives multidisciplinaires et de réussir à considérer tous les critères pertinents permettant de maximiser ces bénéfices socio-environnementaux. En raison de nombreux obstacles, les IVB sont souvent mises en place de manière opportuniste et *ad hoc* (Kuller, Bach, et al., 2018; Kuller, Farrelly, et al., 2018; Kuller et al., 2021; Madénian & Van Neste, 2024). Toutefois, privilégier les sites où des travaux sont prévus ou des investissements engagés limite le potentiel des IVB à répondre de manière adéquate aux besoins du territoire urbain (Kuller et al., 2021).

1.2 Développer les outils d'aide à la planification ADMC-SIG

Des outils et stratégies d'analyse spatiale ont été développés pour supporter la planification spatiale des IVB (par exemple : Bach et al. (2015); Lerer et al. (2015); Meerow and Newell (2017); Kuller et al. (2017); Kuller, Bach, et al. (2019); Shojaeizadeh et al. (2021)). Les outils informatiques basés sur l'aide à la décision multicritère (ADMC) qui utilisent des systèmes d'information géographique (SIG) offrent des capacités importantes en matière de stockage d'information, de vitesse de traitement, d'organisation et d'interprétation de données variées, d'identification des compromis, de participation, ainsi que d'exploration des priorités des parties prenantes. Ils fournissent des résultats cartographiés facilement interprétables, facilitant la résolution de problèmes spatiaux (Kiker et al., 2005; Wang & Zou, 2010). En intégrant une variété de connaissances différentes essentielles à l'aménagement du territoire, ces outils permettent de réduire la charge cognitive, de soutenir le dialogue entre les parties prenantes impliquées et d'inclure les préférences de celles-ci, par exemple sous forme de poids de critères de décision (Jelokhani-Niaraki, 2021a; Kambites & Owen, 2006). Ces outils ont donc le potentiel de soutenir le processus décisionnel sur le choix de l'emplacement des IVB en favorisant une planification stratégique, interdisciplinaire et interactive.

Toutefois, le développement des outils d'aide à la planification (OAP) pour les IVB repose souvent sur un engagement limité des parties prenantes tout au long du processus ADMC et s'appuie sur des méthodes ADMC peu robustes (Bousquet et al., 2023). Une approche collaborative, impliquant les parties prenantes depuis la définition du problème décisionnel jusqu'à l'évaluation des solutions, est reconnue pour favoriser la prise en compte de diverses priorités et expertises, ce qui contribue à maximiser le succès des projets (Axelsson et al., 2021; Ferretti & Montibeller, 2016; Gregory & Wellman, 2001; Luyet et al., 2012).

L'ADMC est largement utilisée pour résoudre des problèmes spatiaux(Malczewski & Jankowski, 2020), puisqu'elle permet de prendre en compte un large éventail de critères pour évaluer des alternatives dont la performance varie selon ces critères. La théorie de la valeur multi-attributs (en anglais *multi-attribute value theory; MAVT*) repose sur l'idée que la décision peut être modélisée à l'aide de fonctions de valeur traduisant les préférences des parties prenantes, ce qui permet de convertir chaque solution en une valeur unique et de les classer (Ferretti et al., 2014; Keeney & Raiffa, 1976). Une décision est définie par des objectifs à atteindre (par exemple, réduire l'effet des îlots de chaleur). Chaque objectif doit être mesurable par des attributs (par exemple, la température maximale enregistrée), afin de classer les solutions potentielles (par exemple, le choix d'un site d'implantation d'une IVB). Le jugement d'experts peut être représenté à l'aide d'« échelles de valeurs », où la performance de chaque solution par rapport aux objectifs est évaluée sur une échelle de 0 à 1. Par exemple, l'implantation d'une IVB sur un site *Y*, où l'*indice de vulnérabilité aux vagues de chaleur est très élevé*, correspond à la valeur d'adéquation maximale pour l'objectif de *réduction de la vulnérabilité aux îlots de chaleur,* et reçoit ainsi la note de 1. À l'inverse, si *l'indice de vulnérabilité est très faible*, l'implantation sur ce site recevrait une note minimale de 0, indiquant une contribution nulle à cet objectif. L'importance relative des objectifs est évaluée par leur pondération (par exemple, réduire l'effet des îlots de chaleur est plus important que réduire les inondations urbaines). La fonction d'agrégation permet ensuite de combiner l'ensemble des informations pour produire un score final par solution, reflétant son niveau d'adéquation vis-à-vis de la décision. La MAVT s'articule autour de trois étapes principales, soit (i) la structuration du problème décisionnel sous la définition d'objectifs, d'attributs, de données et de solutions, (ii) la modélisation des préférences sous l'évaluation de la performance des solutions à répondre à chacun des objectifs (échelles de valeurs) et de l'importance relative des objectifs (pondération) et (iii) l'agrégation de l'information et l'analyse des résultats, des incertitudes et de

la sensibilité (Bertsch & Fichtner, 2016). La MAVT est une méthode privilégiée en raison de sa transparence et de sa capacité à combiner des données quantitatives et qualitatives, ce qui la rend particulièrement adaptée pour le développement d'un OAP dans le cadre de la planification spatiale des IVB, un problème complexe et multisectoriel.

Généralement, les OAP pour les IVB sont développés à partir d'une étude de cas unique, ce qui limite leur portée (Bousquet et al., 2023). De plus, ces outils sont rarement accessibles et adaptables à divers contextes urbains et climatiques (Bousquet et al., 2023). Pour maximiser leur adoption, il est essentiel d'adapter les OAP aux spécificités locales (Kuller et al., 2022). Partir d'un OAP existant pour application dans un nouveau contexte permettrait de bénéficier de ses avantages, tels que les ressources, recherches et validations déjà existantes (Street et al., 2019), tout en l'adaptant aux besoins et aux réalités de ce contexte urbain et climatique différent.

1.3 Tester les outils d'aide à la planification ADMC-SIG

La validation des OAP par l'analyse rigoureuse des incertitudes et des erreurs associées est souvent négligée dans leur développement (Malczewski & Jankowski, 2020). Cette validation repose notamment sur l'analyse de la sensibilité et des incertitudes liées aux paramètres d'entrée. Les préférences des parties prenantes, souvent imprécises et difficiles à quantifier, sont généralement modélisées à l'aide d'hypothèses simplificatrices sur la structure des modèles de préférences, qui ne reflètent pas toujours la réalité (Haag, Lienert, et al., 2019; Haag, Reichert, Maurer, Lienert, et al., 2019). Par simplification, les incertitudes sont souvent ignorées (Durbach & Stewart, 2009; Haag, Reichert, Maurer, Lienert, et al., 2019). Parmi celles-ci, les pondérations reflétant l'importance relative des objectifs représentent un paramètre subjectif clé, souvent considéré comme la principale source d'incertitude dans les OAP, ainsi que comme la plus facile à étudier et, par conséquent, la plus fréquemment étudiée (Chen, J.Yu, et al., 2010; Haag et al., 2022a). L'impact des pondérations des objectifs sur la variabilité des résultats des OAP ne devrait pas être étudié seul, puisque l'ensemble des paramètres d'entrée, ainsi que leurs interactions peuvent avoir un impact (de Brito et al., 2019a; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a; Plata-Rocha et al., 2012a). Les échelles de valeurs, utilisées pour normaliser les données sur une échelle commune, reflètent également le jugement des experts, et constituent ainsi une source potentielle d'incertitude (Haag, Reichert, Maurer, & Lienert, 2019; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). Bien que la fonction d'agrégation soit souvent fixée, elle traduit elle aussi des préférences, notamment en ce

qui concerne le degré de compensation accepté entre les objectifs. Ce paramètre, lié à la manière dont les informations sont combinées, peut être quantifié et discuté avec les parties prenantes (Haag, Lienert, et al., 2019).

Une validation complète et rigoureuse des OAP devrait inclure une analyse d'incertitude, ainsi qu'une analyse de sensibilité, afin d'évaluer la stabilité du modèle et la confiance que l'on peut accorder à ses résultats (Lilburne & Tarantola, 2009a; Şalap-Ayça et al., 2021a).

1.4 Aperçu des objectifs de recherche de la thèse

Le projet de recherche vise à approfondir les connaissances sur la planification stratégique des infrastructures vertes et bleues (IVB) pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain par les outils d'aide à la planification (OAP). Plus spécifiquement, le développement et l'adaptation de l'OAP existant Spatial Suitability ANalysis TOol (SSANTO; Kuller, Bach, et al. (2019)), développé dans sa version originale à Melbourne (Australie), ont été préconisés pour le contexte québécois, plutôt que le développement d'un nouvel OAP. Les municipalités du Québec ne disposent pas encore d'un OAP adapté et facilement accessible pour appuyer la prise de décision sur l'emplacement des IVB en milieu urbain. Ainsi, elles sont souvent implantées de manière aléatoire et opportuniste, dans une approche réactive. Afin de permettre une gestion plus efficace des conflits et compromis, conduire à des processus décisionnels plus équitables et maximiser et distribuer stratégiquement les co-bénéfices des IVB, leur planification spatiale doit se baser sur une approche intersectorielle.

Sous la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT), le projet de recherche suit l'ensemble des étapes de modélisation en SIG-ADMC (Ferretti & Montibeller, 2016), soit (i) la conception et la structuration du processus décisionnel, (ii) la détermination des fonctions de normalisation spatiale (échelles de valeurs), (iii) la détermination des poids des objectifs (importance relative des objectifs) et (iv) l'agrégation des performances et l'analyse des incertitudes et de la sensibilité des résultats. Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont les suivants :

Objectif 1 | Développer un cadre structuré sous forme de hiérarchie d'objectifs pour la planification stratégique des IVB, incluant un ensemble d'objectifs mesurables reflétant les besoins des parties prenantes et les connaissances des experts, pour supporter l'adaptation de l'OAP SSANTO à différents contextes, en s'appuyant sur la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT).

Objectif 2 | Évaluer les préférences et le consensus de parties prenantes du milieu institutionnel, municipal, gouvernemental, professionnel et citoyen, par rapport aux objectifs de planification spatiale stratégique de trois groupes d'IVB : les petits systèmes (groupe A : biorétention, système d'infiltration et noue), les gros systèmes (groupe B : marais artificiel, étang et lac) et les arbres urbains (groupe C).

Objectif 3 | Quantifier l'influence de l'incertitude dans les paramètres d'entrée liés aux préférences des parties prenantes et experts, soit les poids des objectifs, la forme des échelles de valeurs et le degré d'additivité de la fonction d'agrégation, sur les cartes d'adéquation spatiale des IVB de l'OAP SSANTO.

1.5 Contexte général de la thèse : Insertion dans un projet multidisciplinaire et interuniversitaire

Cette thèse s'insère dans un projet de recherche plus large en transition écologique et valorisation des territoires financé par le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie du Québec sur une période de trois ans (2022-2025). Le projet **PIIVO** (**P**lanification **I**ntégrée des **I**nfrastructures **V**ertes en innovation **O**uverte) fait appel à une collaboration entre cinq établissements de recherche, soit Polytechnique Montréal (Montréal, QC, Canada), l'Université de Montréal (Montréal, QC, Canada), l'Université du Québec en Outaouais (Gatineau, QC, Canada), l'Institut national de la recherche scientifique (INRS; Montréal, QC, Canada), ainsi que l'Université d'Utrecht (Utrecht, Pays-Bas). Neuf organisations issues du milieu municipal, provincial et professionnel de domaines liés à l'environnement, aux changements climatiques, à la santé publique, aux infrastructures urbaines et à la biodiversité sont partenaires du projet : Ville de Trois-Rivières, Ville de Montréal, Habitat, Ouranos, Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU), CRE-Montréal, Réseau Environnement et Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Le projet **PIIVO** vise à améliorer la planification stratégique des IVB au Québec, par (i) le développement et la mise à l'essai d'un outil d'analyse spatiale multicritère et (ii) l'étude des contextes sociaux et institutionnels et des enjeux de gouvernance intervenant dans la planification de ces systèmes au Québec.

1.6 Structure de la thèse

La thèse est structurée en huit chapitres et comporte trois articles scientifiques publiés ou soumis en tant que première auteure. Les trois articles scientifiques sont liés chacun aux trois objectifs principaux et définissent le cœur du projet de recherche divisé en trois grandes étapes, soit 1) le développement et la structuration du problème décisionnel de planification des IVB en milieu urbain, 2) la modélisation des préférences par la détermination de l'importance relative des objectifs et la détermination des échelles de valeurs des attributs mesurant les objectifs et 3) la validation de l'OAP par l'analyse de sensibilité et des incertitudes. La thèse se divise selon les sections suivantes (Figure 1.1) :

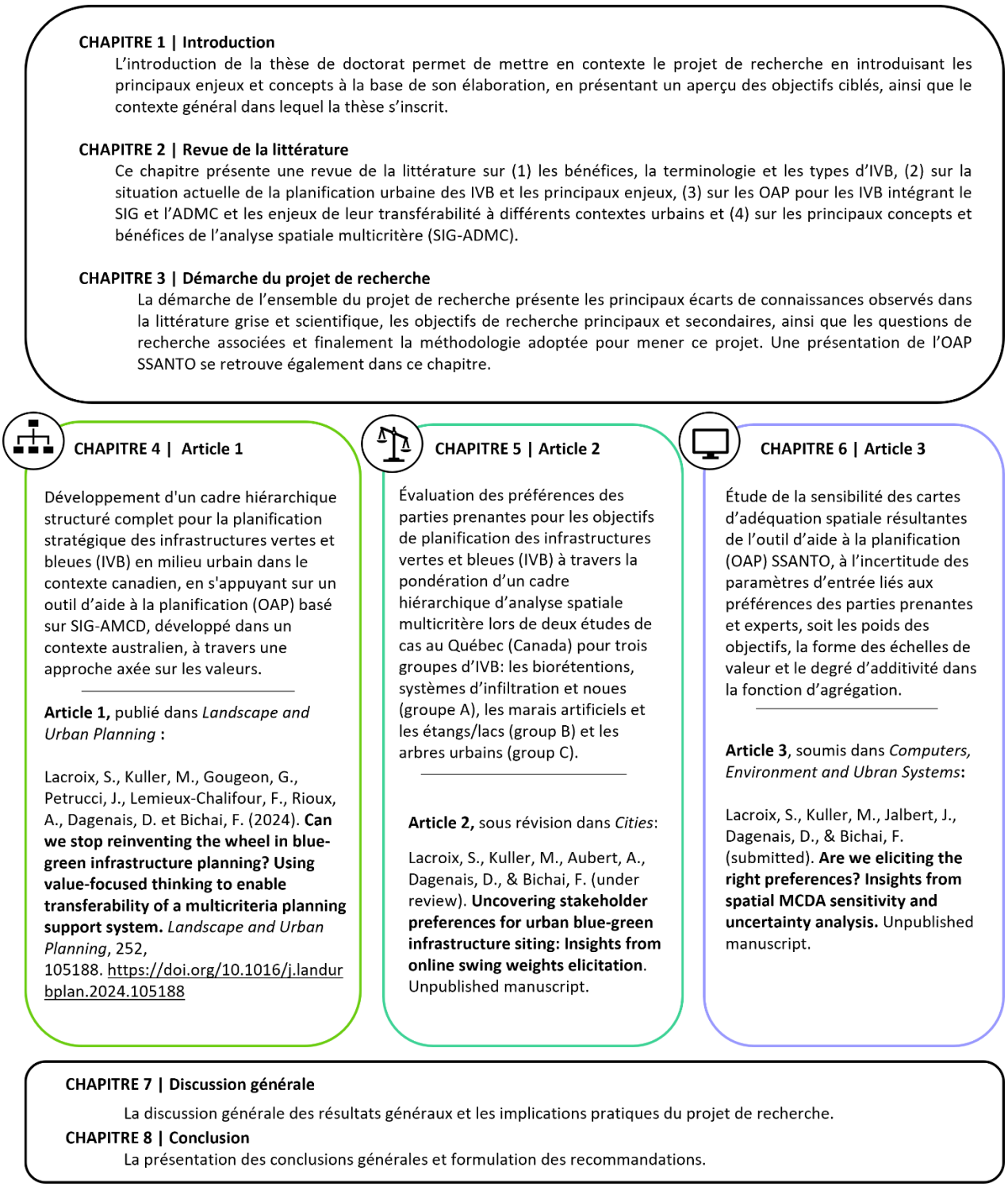


Figure 1.1 Aperçu de l'organisation de la thèse, divisée en huit chapitres

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le CHAPITRE 2 permet de dresser un portrait de la littérature des quatre grandes thématiques à la base du projet de recherche (voir Figure 2.1). La section 2.1 approfondit les enjeux de la gestion des eaux pluviales résumés au CHAPITRE 1. La planification des IVB est un problème décisionnel complexe en raison des caractères multicritère et multidisciplinaire qui entrent en jeu. La section 2.2 aborde donc les défis de la planification spatiale des IVB, les bonnes pratiques et l'état de la situation. La section 2.3 présente une synthèse de l'approche de la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT) utilisée pour guider l'ensemble des étapes de développement du projet de recherche. Les outils d'aide à la planification (OAP) basés sur l'aide à la décision multicritère (ADMC) présentent plusieurs avantages pour tendre vers une planification spatiale plus stratégique, considérant l'ensemble des variables en amont de la décision. Des OAP et des outils basés sur l'ADMC ont été développés à travers le monde, la section 2.4 fait donc état des avantages et des outils développés.

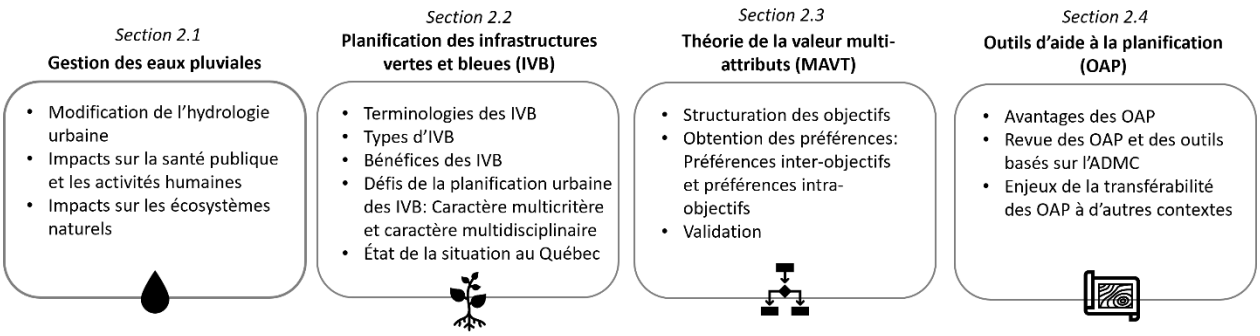


Figure 2.1 Thématiques et sections de la revue de la littérature

2.1 Enjeux de la gestion des eaux pluviales

Le phénomène d'urbanisation a contribué à une densification de la population et des infrastructures dans les villes ayant pour conséquence une augmentation des besoins de consommation en eau et une imperméabilisation du territoire (MDDEFP, 2011). Ce phénomène entraîne des répercussions sur plusieurs facettes des milieux urbains, notamment sur hydrologie urbaine. L'*hydrologie* se définit comme l'étude du cycle de l'eau, c'est-à-dire ses origines, sa répartition, ses mouvements, ses propriétés et ses interactions avec son environnement physique, biologique, ainsi qu'avec l'Homme (Anctil et al., 2012; Deeprose, 2006). Ainsi, l'*hydrologie urbaine* fait référence à l'étude

de l'eau spécifique aux bassins versants en milieux urbanisés, soit des milieux ayant de fortes interactions entre les activités humaines et les processus naturels (Niemczynowicz, 1999). La transformation des surfaces végétales en surfaces imperméables, engendrée par le développement urbain, a contribué à modifier le cycle naturel de l'eau dans les villes en diminuant les capacités d'infiltration du sol et en diminuant l'interception et l'évaporation de l'eau de pluie par la végétation (Boucher, 2010). La diminution du couvert végétal aux dépens de surfaces minérales caractérisant les routes, bâtiments et stationnements, entraîne un accroissement du ruissellement des eaux pluviales. Dans un milieu naturel, environ 10% de l'eau de pluie ruisselle à la surface comparativement à 55% dans un milieu urbain dense et artificiel où entre 75% et 100% du territoire est imperméabilisé (Boucher, 2010; Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG), 1998). Ainsi, plus le pourcentage d'imperméabilité croît, plus l'infiltration décroît (MDDEFP, 2011). L'imperméabilisation des territoires a aussi pour impact d'augmenter les débits de pointe, et ce, même après des événements de pluie modérés (Semadeni-Davies et al., 2008), pouvant atteindre deux à cinq fois les débits observés avant l'urbanisation (MDDEFP, 2011).

Avec les changements climatiques, une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des événements extrêmes est prévue ayant pour impact d'augmenter les événements de pluie abondante et de déficit hydrique (Ouranos, 2015). Sur le territoire québécois, l'ensemble des régions recevra une quantité maximale annuelle de précipitations plus élevée pour toute période de retour (Leveque et al., 2021; Ouranos, 2015). Ce changement dans les régimes de précipitations a directement pour effet d'augmenter le ruissellement de l'eau, ayant plusieurs conséquences subséquentes, telles qu'une augmentation de l'érosion, du lessivage du sol et des contaminants dans les réseaux d'égouts (Leveque et al., 2021). En saison hivernale, l'augmentation des précipitations sera également synonyme d'une augmentation de l'accumulation de la neige au sol et d'une augmentation des débits moyens dans les rivières (Ouranos, 2010).

De plus, dans les villes en Amérique du Nord, les systèmes traditionnels de drainage des eaux pluviales sont basés sur un principe d'efficacité de l'évacuation de l'eau dans les cours d'eau récepteurs afin de réduire les risques face aux inondations (Roy et al., 2008). L'augmentation du ruissellement urbain combiné à la conception historique des réseaux de drainage a pour impact de favoriser entre autres les problèmes de débordements des réseaux d'égout unitaires et les inondations (MDDEFP, 2011). Les réseaux d'égout de type unitaires sont conçus pour recueillir à la fois les eaux usées domestiques, industrielles et commerciales, en plus des eaux pluviales

(Environmental Protection Agency (EPA), 2021). Transportant des volumes d'eau importants, ces réseaux sont particulièrement à risque de débordements face à l'augmentation des volumes et débits d'eaux de ruissellement en milieu urbain. Les débordements de réseaux d'égouts unitaires surviennent lorsque la capacité du réseau est atteinte (Environmental Protection Agency (EPA), 2021; Jalliffier-Verne et al., 2016; Semadeni-Davies et al., 2008). Ces débordements se produisent par le biais d'ouvrages de surverses, conçus pour déverser les eaux usées non traitées du réseau dans les milieux récepteurs lors d'un événement comme la fonte des neiges, des inondations ou des événements de pluie importants (MELCC, 2021c). Ces eaux déversées contiennent des concentrations élevées de matières en suspension (MES), de microorganismes pathogènes, de polluants toxiques, de nutriments, d'huile et de graisse et autres polluants (Field et al., 2003). De plus, la présence de MES favorise une concentration croissante d'autres éléments comme les métaux, les sels, les éléments nutritifs, l'huile et la graisse et les microorganismes (MDDEFP, 2011). Cet apport en contaminants dans les cours d'eau récepteurs a un impact néfaste sur la santé des écosystèmes et les activités humaines.

Les enjeux soulevés pour la gestion des eaux pluviales concernent également les inondations. Les débordements de réseaux d'égouts peuvent être une cause importante des inondations en milieu urbain (Joshi et al., 2021). Les débordements de réseau d'égout augmenteront de manière exponentielle sous les changements climatiques (Petrucci, Jalbert, et al., 2025). Les zones en dépression (ou en « cuvettes ») sont particulièrement vulnérables aux pluies abondantes, amenées aussi à s'intensifier avec les années, accumulant l'eau de ruissellement et pouvant causer des inondations urbaines et des refoulements (Ville de Montréal, consulté le 16 avril 2025). En plus de diminuer les qualités esthétiques des paysages, les déchets et débris transportés par le ruissellement urbain peuvent également obstruer et colmater les réseaux et les cours d'eau, causant des inondations (MDDEFP, 2011). Les inondations de tout type, dont les remontées de la nappe phréatique et les refoulements de conduites verront leur récurrence et leur intensité modifiées avec les changements climatiques (Ouranos, 2018). Phénomène récurrent au Québec, les inondations touchent 80% des municipalités de manière directe et indirecte (Gachon, 2020).

Les sous-sections suivantes abordent plus spécifiquement les impacts de la gestion des eaux pluviales sur la santé publique, les activités anthropiques et les écosystèmes naturels.

2.1.1 Impacts sur la santé publique et les activités anthropiques

La contamination des cours d'eau par divers polluants a directement un impact sur les activités humaines, comme sur l'approvisionnement en eau potable, les activités récréatives nautiques, l'alimentation, l'agriculture et la qualité esthétique des paysages urbains (Leveque et al., 2021; MDDEFP, 2011). Les débordements de réseaux d'égout sont considérés comme la principale source de pollution des plans d'eau de surface dans les villes (Joshi et al., 2021) et l'une des principales causes de la contamination microbienne affectant les activités récréatives, les espèces aquatiques comestibles et le coût de traitement de l'eau potable (MDDEFP, 2011). Au Québec, pour les bassins versants urbanisés, ce phénomène de surverses est particulièrement préoccupant puisqu'il constitue aussi la principale source de pollution de l'eau destinée à l'approvisionnement, ce qui soulève un enjeu de santé publique (Leveque et al., 2021). Pour l'eau potable, la présence de sédiments dans les cours d'eau augmente la turbidité. Pour les municipalités dont la nappe phréatique permet l'approvisionnement en eau potable, la variation des débits de base dans les cours d'eau a également un impact sur la recharge de celle-ci. Cette préoccupation est exacerbée par les changements climatiques projetés, puisque les débordements d'égouts unitaires seront influencés par l'augmentation de l'intensité des précipitations et de la fonte des neiges (Madoux-Humery et al., 2013). Pour les activités récréatives, la pollution des cours d'eau diminue leur valeur, en plus de restreindre leur usage pour des fins récréatives (MDDEFP, 2011). La concentration de polluants retrouvée dépasse souvent les seuils définis par la santé publique. Pour l'alimentation, la contamination microbienne menace la survie et impacte la comestibilité des espèces aquatiques comestibles (MDDEFP, 2011).

Outre les nombreuses répercussions de l'urbanisation et des changements climatiques liés aux modifications dans le cycle de l'eau, la régulation du climat constitue un enjeu majeur pour la santé des communautés urbaines. Le développement actuel des villes contribue à l'amplification des îlots de chaleur urbains par l'augmentation des températures et la diminution de l'humidité dans l'air (Vijayaraghavan, 2016). La prépondérance de surfaces imperméables en milieu urbain cause une augmentation de l'absorption des radiations solaires, puis à une retransmission de celles-ci menant à une augmentation des températures. En effet, en milieu urbain les surfaces imperméables sont en moyenne plus chaudes de 2°C en été (Bounoua et al., 2015). Ce phénomène d'îlots de chaleurs est d'autant plus préoccupant avec les prévisions climatiques caractérisées par une augmentation des températures moyennes annuelles et une « forte augmentation de la température maximale de la

journée la plus chaude de l'année » (Ouranos, 2015). Le Québec suivra également cette tendance où le climat se réchauffera dans l'ensemble de la province, surtout en hiver (Ouranos, 2010). Avec les changements climatiques, ces événements de chaleur extrême en ville seront plus fréquents, plus intenses et de plus longue durée, exacerbant la vulnérabilité des piétons notamment (Norton et al., 2015). Cette hausse de température contribue aux problèmes respiratoires et cardiovasculaires et influence de manière négative la mortalité et morbidité (Ouranos, 2015). Les îlots de chaleur pourraient également avoir un impact sur la température de l'eau potable dans les conduites sous terre, pouvant impacter la qualité de l'eau approvisionnée (Absalan et al., 2024).

Les enjeux sur les êtres humains sont également de nature économique. Par exemple, l'augmentation de la turbidité et des contaminants dans l'eau augmente les coûts de son traitement (MDDEFP, 2011). La gestion des dommages liés aux inondations entraîne aussi des coûts importants, soit 70 millions en moyenne par année entre 1991 et 2013 au Québec (Ouranos, 2018).

2.1.2 Impacts sur les écosystèmes naturels

Les eaux de ruissellement en milieu urbain contribuent de manière significative à détériorer la qualité des eaux de surface en agissant comme un vecteur de polluants jusqu'aux milieux récepteurs (MDDEFP, 2011; Müller et al., 2020). Outre les événements de surverses, plusieurs activités humaines en milieu urbain, tel que le transport, ont un impact sur la quantité de pollution retrouvée dans les eaux pluviales (Semadeni-Davies et al., 2008). Les dépôts atmosphériques, le drainage des surfaces imperméables (ex : routes, toits, structures, terrains récréatifs, etc.) et les activités anthropiques comme le transport, l'entretien des routes et bâtiments, les activités industrielles et l'élimination des déchets représentent des sources de pollution des eaux de ruissellement (Müller et al., 2020). L'apport de contaminants aux cours d'eau affecte les espèces aquatiques et leur habitat. L'augmentation des nutriments dans les cours d'eau favorise le phénomène d'eutrophisation par la prolifération d'algues et engendre des impacts sur les habitats aquatiques par la diminution de l'oxygène dissous dans l'eau (MDDEFP, 2011). Les eaux de ruissellement contiennent également certains polluants qui utilisent de l'oxygène (Field et al., 2003), amplifiant la pression sur les espèces aquatiques.

L'augmentation de la température et de l'imperméabilisation du territoire ont aussi un impact sur les écosystèmes aquatiques par le réchauffement des cours d'eau, puisque les variations de température peuvent affecter certaines espèces aquatiques (MDDEFP, 2011; Ouranos, 2015).

L'urbanisation a non seulement des impacts sur les habitats aquatiques, mais également sur ceux à proximité des cours d'eau. L'augmentation des volumes d'eau et des débits de pointe peut entraîner une augmentation de la section hydraulique des cours d'eau, l'érosion des berges, la modification des caractéristiques du lit des cours d'eau comme la granulométrie et une augmentation des sédiments, résultant à une perte de végétation et d'habitats (MDDEFP, 2011).

L'urbanisation est également à la source de la fragmentation des milieux et est la cause principale de disparition de milieux naturels par la destruction et l'altération des espaces naturels (Beatley, 2000). Les pressions sur ces écosystèmes s'amplifieront selon les prédictions des changements climatiques, montrant des impacts sur la biodiversité à tous les niveaux et pouvant même mener à des extinctions d'espèces (Bellard et al., 2012).

2.2 Infrastructures vertes et bleues (IVB)

Plusieurs techniques de drainage des eaux pluviales plus soucieuses de l'environnement ont émergé depuis les dernières années à travers le monde. Le contexte anthropique et climatique présenté précédemment met en évidence la nécessité d'intégrer et de privilégier l'implantation des infrastructures vertes et bleues (IVB) afin de tenter de se rapprocher des conditions précédant le développement urbain.

2.2.1 Terminologies

La terminologie des pratiques et principes de gestion urbaine des eaux pluviales est de plus en plus diversifiée et plusieurs termes sont utilisés à travers le monde pour les désigner (Fletcher et al., 2015). Des différences peuvent également être observées dans différentes parties du monde pour un même terme, contribuant à la complexité de la classification des terminologies existantes (Fletcher et al., 2015). Bien que nommés de plusieurs manières différentes, les différents systèmes ont des objectifs de gestion des eaux pluviales similaires comme la réduction des débits et volumes de ruissellement et le contrôle de sa qualité (MDDEFP, 2011). Parmi les termes fréquemment retrouvés dans la littérature, quelques définitions sommaires sont présentées:

- La conception sensible à l'eau, «**Water Sensitive Urban Design (WSUD)**», originaire d'Australie (Fletcher et al., 2015), se base sur une gestion des eaux pluviales favorisée par le drainage de l'eau, soit en diminuant les surfaces imperméables, en augmentant l'infiltration de l'eau de pluie, en favorisant une captation à la source et en favorisant

l'évapotranspiration (Roy et al., 2008). Bien qu'à l'origine le concept ait été développé dans une optique de gestion des eaux pluviales, l'approvisionnement en eau et l'assainissement sont également des objectifs que visent les WSUD (Fletcher et al., 2015).

- Les principes du développement à faible impact, «**Low Impact Development (LID)**», utilisés davantage en Amérique du Nord et en Nouvelle-Zélande (Fletcher et al., 2015), sont basés sur une vision de gestion des eaux pluviales à la source par des stratégies à petite échelle et distribuées sur un territoire (TRCA/CVCA, 2010). Des aménagements qui visent une hydrologie plus «naturelle», c'est-à-dire qui imite les conditions qui prévalaient avant le développement urbain, sont favorisées (Fletcher et al., 2015).
- Les systèmes de drainage urbain durable, «**Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)**», sont des technologies se voulant plus durables que les systèmes traditionnels pour gérer les eaux de ruissellement, en imitant des principes de drainage naturel comme le LID (Fletcher et al., 2015).
- Les villes éponges, «**Sponge cities**», est un concept né en Chine désigne des villes capables de s'adapter aux variations du cycle de l'eau en absorbant, stockant et redistribuant les eaux pluviales de manière naturelle, à l'image d'une éponge (Guan et al., 2021).
- Les «**Best Management Practices (BMP)**» ou « **Pratiques de gestion optimales des eaux pluviales (PGO)** », utilisées en Amérique du Nord (Fletcher et al., 2015), sont gouvernées par des mécanismes de décantation, de filtration, d'infiltration, d'assimilation biologique par les végétaux et la rétention à travers ceux-ci (MDDEFP, 2011). Ces pratiques sont divisées en deux grandes classes, celles structurales et celles non structurales. Alors que la première catégorie implique la construction d'ouvrages de contrôle pour les réseaux de drainage, la seconde considère l'aménagement du territoire, la réglementation, etc. (MDDEFP, 2011). Elles diffèrent également par les processus qu'elles utilisent pour la gestion des eaux pluviales.
- Les «**infrastructures vertes (IV)**», terme originaire des États-Unis, sont des systèmes qui intègrent non seulement la gestion des eaux pluviales, mais qui se basent également sur l'architecture et l'écologie du paysage selon une vision de maximisation des bénéfices par l'identification des SE qu'ils fournissent (Fletcher et al., 2015). Ce sont des systèmes de milieux naturels et semi-naturels qui fournissent de multiples bénéfices et SE (Rayfield et al., 2015).

- Les «**infrastructures vertes et bleues (IVB)**» sont très étroitement liées au concept d'«infrastructures vertes». Les IVB existent à différentes échelles géographiques, que ce soit à l'échelle régionale, urbaine, ou au niveau des bassins versants. La connectivité est un élément central des IVB, car les bénéfices qu'elles procurent sont souvent maximisés lorsque leurs composantes forment un réseau interconnecté (Ghofrani et al., 2017). Elles intègrent des éléments verts (zones végétalisées, plantes et arbres) avec les éléments bleus (cours d'eau, étangs, lacs et systèmes de drainage des eaux pluviales).
- Les solutions basées sur la nature, «**nature-based solutions (NBS)**», sont un concept plus large, émergent des deux dernières décennies, dont les IVB font partie. Elles désignent des interventions inspirées des processus naturels, caractérisées par leur simplicité technologique, leur faible besoin d'entretien et leur rentabilité. Ces solutions visent à fournir des bénéfices multiples à la fois pour l'environnement et les communautés humaines (Bonciarelli et al., 2025; Kopp et al., 2021).

Fletcher et al. (2015) ont réalisé une classification de la terminologie des différents systèmes de drainage urbain qui met en évidence le caractère englobant de la terminologie «infrastructures vertes». Ainsi, la terminologie «infrastructures vertes et bleues (IVB)» est adoptée dans le cadre de la thèse afin d'inclure les éléments végétalisés et aquatiques.

2.2.2 Types

La gestion des eaux pluviales se divise en quatre principaux objectifs, soit le contrôle quantitatif, qualitatif, la réduction de l'érosion des cours d'eau et la recharge de la nappe phréatique (MDDEFP, 2011). La gestion des débits de ruissellement et la réduction des volumes de ruissellement font également partie désormais des objectifs de gestion des eaux pluviales (MDDEFP, 2011). Plusieurs types d'IVB existent, variant selon les fonctions qu'elles accomplissent et selon les processus sur lesquelles elles sont basées. Des exemples de ces types d'infrastructures sont : les forêts urbaines, les toits et murs végétalisés, les milieux humides, les jardins de pluie, les noues, les bassins de biorétention, les barils récupérateurs d'eau de pluie, etc. (EPA, 2021; Meerow & Newell, 2017; Rayfield et al., 2015; Roy et al., 2008). La Figure 2.2 présente des exemples de photos d'IVB au Québec (Canada) et dans le monde.



Figure 2.2 Exemples d'infrastructures vertes et bleues (sources : S. Lacroix)

2.2.3 Bénéfices

L'implantation d'IVB sur le territoire urbain a le potentiel d'offrir une variété de bénéfices hydrologiques et socio-environnementaux, tels que l'amélioration de la qualité de l'eau et de l'air, la sécurité contre les inondations, la création d'espaces esthétiques et récréatifs, la réduction des effets des îlots de chaleur, l'amélioration de la biodiversité et la réduction des débordements des égouts unitaires (Autixier et al., 2014; Dagenais et al., 2017; Kuller, Bach, et al., 2018). Ces bénéfices tirés par les IVB sont le fruit des différents services écosystémiques (SE) essentiels rendus par ces systèmes, une partie inhérente à leur définition. La valeur des services urbains rendus par les IVB joue un rôle majeur dans la résilience des villes par l'atténuation de la vulnérabilité des communautés urbaines aux perturbations et aux aléas climatiques (McPhearson et al., 2015). Ils diffèrent selon le type de système dû à leurs différentes fonctions et caractéristiques (Kuller et al., 2017) et selon leur emplacement sur le territoire urbain (Kremer et al., 2016). Ces bénéfices offerts par les IVB sont présentés dans les prochaines sections sous les quatre groupes de SE : régulation, soutien, approvisionnement et culturels.

2.2.3.1 Services écosystémiques de régulation

Les SE de régulation réfèrent aux bénéfices obtenus de la régulation de processus naturels, tels que la régulation du climat et de l'eau, de la qualité de l'air et des sols, ainsi que la séquestration du

carbone, la réduction de l'érosion, le contrôle des maladies et la pollinisation (FAO, 2021; U.S. Department of agriculture). En milieu urbain, ces services rendus permettent d'une part de réguler le cycle de l'eau et d'ainsi contribuer à la gestion de risques naturels et climatiques comme les inondations (Gómez-Baggethun & Barton, 2013). La présence de végétation dans ces systèmes favorise l'interception, la rétention et l'infiltration de l'eau (MDDEFP, 2011). Ces systèmes permettent également la libération d'une partie de l'eau dans l'atmosphère par le processus d'évapotranspiration, issu de deux étapes : l'*évaporation* de l'eau interceptée par la végétation et le sol et la *transpiration* de la végétation (Coutts & Hahn, 2015; MDDEFP, 2011). Par ces divers mécanismes biologiques, physiques et chimiques, les IVB permettent la réduction des volumes et débits de pointe des eaux de ruissellement (MDDEFP, 2011). Certains systèmes de gestion des eaux pluviales, tels que les barils récupérateurs d'eau de pluie, vont également permettre la rétention de l'eau malgré l'absence de végétation en fournissant un espace de stockage pour récolter l'eau pluviale et permettre de retarder et atténuer les débits de ruissellement arrivant au réseau d'égout.

L'assimilation biologique et la décantation sont des processus sur lesquels se basent les IVB et qui favorisent le traitement et la filtration de l'eau pluviale permettant de réduire la charge de polluants transportée (Coutts & Hahn, 2015; MDDEFP, 2011). Les sols jouent un rôle très important dans la sorption des particules, soit la capacité des sols à retenir des substances et dans l'activité microbienne (MDDEFP, 2011). À divers degrés, les IVB se sont montrées performantes vis-à-vis de l'amélioration de la qualité des eaux pluviales par la réduction des matières en suspension, de phosphore total, de nitrates totaux, d'azote total Kjeldahl, de cuivre total, de zinc total, de plomb total et de bactéries (Blecken et al., 2011; MDDEFP, 2011). Les racines des végétaux jouent un rôle clé dans les systèmes par le transport de l'eau et de l'oxygène, la rétention des sédiments, l'absorption des nutriments, la libération de composés organiques et la croissance des microbes (Dagenais et al., 2018). Outre l'amélioration de la qualité de l'eau, certains types d'IVB, particulièrement les arbres, favorisent l'amélioration de la qualité de l'air en captant les polluants et particules atmosphériques (Coutts & Hahn, 2015). L'amélioration de la qualité de l'air passe également par la production d'oxygène et la séquestration du CO_2 par les végétaux (Drapeau et al., 2021). La purification de l'air par les IVB serait toutefois un bénéfice controversé dans la littérature, puisque des paramètres comme la direction du vent, la densité de végétation, la géométrie du cadre bâti environnant et la région climatique (région froide vs région chaude)

peuvent influencer la performance de purification de la qualité de l'air et même dans certains cas pourraient conduire à une détérioration plutôt qu'une amélioration (Abhijith et al., 2017). Les murs et toits végétalisés par exemple ont le potentiel d'améliorer la qualité de l'air dans des rues de type canyon urbain (Abhijith et al., 2017), c'est-à-dire encadrées par des bâtiments de hauteur élevée de part et d'autre, alors que les arbres pourraient au contraire être nuisibles en réduisant la ventilation (Hewitt et al., 2020). Bien qu'un nombre réduit de preuves empiriques valident la performance de ces systèmes pour l'amélioration de la qualité de l'air en milieu urbain, les IVB peuvent dans certains cas favoriser cette amélioration (Hewitt et al., 2020).

L'un des bénéfices, important et grandement documenté, offerts par les IVB constitue le potentiel de régulation du climat et de gestion du stress thermique (Coutts & Hahn, 2015; Drapeau et al., 2021; Gómez-Baggethun & Barton, 2013; MDDEFP, 2011). La régulation des températures en milieu urbain n'agit pas seulement sur le confort thermique, mais peut également aider à l'amélioration de la santé, ainsi que de la demande en énergie et en eau potable (Drapeau et al., 2021). La rétention d'eau par le sol et les végétaux permet de refroidir et d'humidifier l'environnement permettant la mitigation des effets des îlots de chaleur urbains (Drapeau et al., 2021; MDDEFP, 2011). De plus, la végétation a des vertus rafraichissantes par l'ombrage, l'évapotranspiration et la régulation des écarts de température au sol qu'elle offre (Drapeau et al., 2021). Cause majeure de la hausse des températures, l'imperméabilisation des surfaces urbaines qui limite l'infiltration et l'absorption de l'eau peut également être directement réduite par l'implantation de ces systèmes composés de végétation et de sols perméables.

2.2.3.2 Services écosystémiques d'approvisionnement

Les SE d'approvisionnement réfèrent aux aspects tangibles produits par les écosystèmes, tels que l'approvisionnement en eau, en nourriture et autres ressources (FAO, 2021; U.S. Department of agriculture). Les eaux de ruissellement peuvent être collectées par certains types de systèmes de gestion des eaux pluviales à des fins de réutilisation, tel que pour l'irrigation, l'arrosage ou pour des usages intérieurs pour l'approvisionnement en eau des toilettes (MDDEFP, 2011). La collecte de l'eau de pluie peut être un avantage pour les régions souffrant de pénurie d'eau, comme en Australie où la variabilité des précipitations est importante et influence la durée des périodes de sécheresse (Keywood et al., 2016; Khastagir & Jayasuriya, 2010). La récupération des eaux pluviales a le potentiel de contribuer à minimiser les impacts des crises hydriques (Helmreich &

Horn, 2009) et permettre une économie d'eau potable, cohérente avec la vision de résilience et développement durable qu'adoptent certains gouvernements, notamment celui du Québec (*Stratégie québécoise d'économie en eau potable*; Gouvernement du Québec (2019)). En utilisant des méthodes de désinfection appropriée, l'eau pluviale collectée peut servir aussi pour l'agriculture (Helmreich & Horn, 2009). Le potentiel d'approvisionnement en nourriture est un second service fourni par les IVB, par exemple en maximisant la multifonctionnalité des toits verts en combinant leurs multiples fonctions à de l'agriculture urbaine (Hui, 2011).

2.2.3.3 Services écosystémiques culturels

Les SE culturels réfèrent aux bénéfices immatériels que peuvent tirer les communautés des IVB (FAO, 2021). La présence d'IVB et d'espaces verts en milieu urbain, notamment par leur valeur esthétique, favorise la participation sociale, physique et récréative de la population et contribue ainsi à l'amélioration de la santé des communautés (Coutts & Hahn, 2015; Mansor et al., 2012a). L'intégration de ces systèmes végétalisés dans le paysage urbain crée une diversité attrayante et anime l'environnement (Mansor et al., 2012a). Les principaux avantages potentiels de leur implantation sur la mobilité active (cyclisme et marche) seraient l'augmentation des déplacements actifs, l'amélioration de la sécurité routière et l'embellissement des rues (Lemieux et al., 2023).
Ces services contribuent aussi à soutenir la santé sociale, soit un déterminant majeur de la santé, par le sentiment d'identité et d'appartenance qu'amènent les espaces verts au sein de la communauté urbaine (Coutts & Hahn, 2015; Kim & Kaplan, 2004; Mansor et al., 2012a). Pour des secteurs plus défavorisés, le verdissement serait d'autant plus essentiel au soutien du capital social (Coutts & Hahn, 2015). Les IVB peuvent d'ailleurs contribuer à diminuer la vulnérabilité de la population plus sensible et démunie du point de vue de la capacité à faire à des événements climatiques. Par exemple, l'implantation de certaines IVB permet de réduire la vulnérabilité aux îlots de chaleur, grâce aux services écosystémiques de régulation du climat, ce qui peut par exemple améliorer le confort des piétons et donc exercer une influence positive sur la santé et le bien-être (Norton et al., 2015). La végétalisation peut également favoriser une meilleure santé mentale en diminuant le stress, en améliorant le fonctionnement cognitif et en favorisant des états affectifs positifs (Coutts & Hahn, 2015). L'exposition à des éléments de la nature serait particulièrement pertinente pour la «restauration mentale», comme la concentration ou l'attention (Coutts & Hahn, 2015). Chez les enfants, l'exposition aux espaces végétalisés pourrait favoriser l'attention et ainsi

améliorer certains troubles comportementaux issus de la fatigue mentale, tels que les troubles du déficit de l'attention avec hyperactivité (Coutts & Hahn, 2015). L'implication des citadins auprès de ces espaces, par exemple par leur entretien, permet également de retirer des bénéfices personnels comme la détente, le bien-être cognitif et le sentiment de responsabilisation, en plus de l'intégration dans la communauté et des interactions informelles créées (Mansor et al., 2012a).

2.2.3.4 Services écosystémiques de soutien

Les SE de soutien permettent de soutenir les autres services écosystémiques, par exemple en supportant la diversité d'espèces (FAO, 2021). Les IVB permettent une amélioration considérable de la biodiversité comparativement aux infrastructures «grises» (Filazzola et al., 2019). La présence de végétation dans les systèmes amène une diversité d'espèces floristiques et d'habitats. Elles offrent également des habitats au biote en procurant aux végétaux et aux champignons un substrat et aux animaux et insectes un refuge, des zones de reproduction ainsi que des ressources en eau et en nourriture (Filazzola et al., 2019). Les fleurs profitent aux pollinisateurs et la présence d'IVB, comme les toits végétalisés, aurait un impact sur la conservation des pollinisateurs et l'agriculture urbaine (Colla et al., 2009).

2.2.4 Défis de la planification spatiale des IVB

À l'issue du survol des bénéfices de régulation, d'approvisionnement, de soutien et culturels offerts par les IVB présentés à la section 2.2.3 , il est possible de cerner l'importance de leur rôle dans le cycle hydrologique en milieu urbain, dans l'atténuation d'événements climatiques et naturels, dans l'approvisionnement en eau, dans la santé mentale, sociale et physique des communautés et dans l'amélioration de la biodiversité et des habitats. Leur implantation à des endroits stratégiques sur le territoire urbain a le potentiel de maximiser ces multiples bénéfices. Le besoin en IVB varie spatialement sur un territoire (Kuller, Bach, et al., 2018). Le choix de leur emplacement détermine où seront concentrés les bénéfices des SE (Kremer et al., 2016) et qui en profitera (Sobhaninia et al., 2025). L'emplacement des IVB peut donc avoir un impact sur la question de la justice sociale et environnementale du territoire (Hansen & Pauleit, 2014; Hoover et al., 2021; Meerow & Newell, 2017). Par exemple, une meilleure répartition de ces systèmes a un impact sur leur accessibilité et a donc une influence sur la santé et l'activité physique dans la communauté (Coutts & Hahn, 2015). La variation spatiale des valeurs des SE urbains soulève l'importance d'une planification spatiale stratégique des IVB pour un accès équitable à ces bénéfices (Kremer et al., 2016). Actuellement,

des lacunes subsistent quant aux connaissances sur la planification urbaine des IVB, notamment en ce qui concerne les processus décisionnels permettant de déterminer leur emplacement optimal et les fonctions à prioriser (Sobhaninia et al., 2025).

La planification spatiale des IVB repose sur un processus plus complexe que la planification urbaine traditionnelle, ce qui conduit souvent à des approches réactives plutôt que proactives (Downes & Storch, 2014; Kambites & Owen, 2006; Kuller et al., 2017). Dans la pratique, l'implantation des IVB repose le plus souvent sur des approches opportunistes, non stratégiques et sur un seul objectif, généralement la gestion des eaux pluviales (Finewood et al., 2019; Kremer et al., 2016; Meerow & Newell, 2017). Plus spécifiquement, une majorité d'études priorise la mitigation des inondations (Sobhaninia et al., 2025). Cette priorisation du contrôle des eaux pluviales dans le choix de l'emplacement des IVB peut être associée à un manque de flexibilité auquel les experts sont confrontés pour se conformer aux réglementations en matière de gestion des eaux de ruissellement (Meerow, 2020). Lorsque les IVB sont développées seulement dans une optique de contrôle des eaux pluviales, cela réduit le potentiel de démocratisation des services et des avantages dans les communautés (Finewood et al., 2019) et limite les multiples bénéfices socio-environnementaux et économiques que la population pourrait tirer (Dagenais et al., 2014; Dagenais et al., 2017; Kuller et al., 2017). Bien que reconnus comme des enjeux urbains majeurs, les objectifs de réduction des îlots de chaleur et de gestion des eaux pluviales sont encore souvent abordés de manière distincte, alors que la multifonctionnalité des IVB devrait être considérée (Sobhaninia et al., 2025).

Selon Kambites and Owen (2006), le processus de planification des IVB devrait être (i) holistique, en la considérant dans sa globalité avec l'inclusion de l'ensemble des fonctions des systèmes et des aspects géographiques et politiques, (ii) stratégique, en considérant les changements sociaux et écosystémiques à plus long terme, (iii) inclusif, pour impliquer l'ensemble des parties prenantes pertinentes dans le processus, puis (iv) qualitatif, en considérant une variété de concepts comme la biodiversité, l'acceptabilité sociale et la qualité de l'eau. L'intégration de tous ces principes dans les processus décisionnels de planification spatiale des IVB s'avère un défi. Les sections qui suivent présentent les défis liés au caractère multicritère de la planification des IVB (section 0), au caractère multidisciplinaire (section 2.2.4.2), puis abordent les freins qui persistent pour l'implantation des IVB (section 2.2.4.3).

2.2.4.1 Caractère multicritère de la planification des IVB

Le choix de l'emplacement des IVB est souvent guidé par les critères biophysiques, c'est-à-dire des facteurs physiques tels que la pente, le type de sol ou l'hydrologie (Kuller et al., 2017) ou par des opportunités de travaux (Kuller, Bach, et al., 2018; Kuller, Farrelly, et al., 2018; Kuller et al., 2021; Madénian & Van Neste, 2024). Toutefois, il a été montré que les critères socio-économiques et de forme urbaine engendrent eux aussi des impacts sur la planification de la gestion urbaine des eaux pluviales (Kuller et al., 2017). Les critères identifiés par Kuller et al. (2017) comme étant déterminant dans l'adéquation spatiale des sites d'IVB sont de nature biophysique (les sols, la pente, l'hydrologie, le climat, le cadre bâti et le type d'écosystème), socio-économique (la gestion des déchets, la démographie, la sensibilisation et les valeurs du public, la cohésion sociale et la stabilité politique), urbaine (la disponibilité des terrains, les opportunités de développement, les contraintes de développement et le type de développement) et liés aux SE. Le concept d'adéquation spatiale d'un site (c.-à-dire, la pertinence d'un site) pour l'implantation d'IVB est de plus en plus étudié, mettant de l'avant la nécessité de prendre en considération tous ces aspects qui influencent la performance des IVB, mais également les bénéfices qu'elles produisent (Kuller, Bach, et al., 2018; Martin et al., 2007).

Conformément aux observations de Kuller, Bach, et al. (2018), les guides nord-américains de gestion des eaux pluviales mentionnent principalement des critères biophysiques et liés à la forme urbaine pour leur implantation et planification (voir Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Compilation de critères pour l'implantation des IVB selon quatre guides nord-américains

	Guides nord-américains sur l'implantation d'IVB			
Critères	MDDEFP (2011)	U.S. Environmental Protection Agency (2014)	New Jersey Department of Environmental Protection (2018)	CSA Group (2018)
Milieux récepteurs	X			
Caractéristiques du site	X			
Cours d'eau et éléments de drainage, infrastructures du réseau d'égout			X	X
Plaines inondables			X	X
Topographie		X	X	X
Utilisation des terres		X		X
Types de sol				X
Capacité d'infiltration du sol		X	X	X
Surfaces imperméables			X	
Sites contaminés	X	X	X	
Projets de développements municipaux		X	X	
Limites des bassins versants			X	
Servitudes d'utilité publique			X	
Sites de pratiques de gestion optimale existantes			X	
Acceptabilité sociale		X		
Facteurs financiers et institutionnels (ex. autorité légale)		X		
Opportunités de partenariats		X		
Terrains municipaux		X	X	
Terrains vacants			X	
Zonage		X	X	X
Zones à recharge importantes				X
Profondeur de la nappe phréatique			X (et du lit des roches)	X
Zones de protection des têtes de puits				X
Zones humides				X
Zones de conservation du patrimoine naturel et des habitats fauniques importants				X

Les **critères biophysiques**, bien qu'ils ne doivent pas constituer les seuls à être considérés, sont essentiels dans le processus de planification des IVB. Les caractéristiques du site comme la topographie, les types de sols, la profondeur du roc ou la profondeur de la nappe phréatique permettent de déterminer les possibilités d'implantation d'une IVB (MDDEFP, 2011). Quelques exemples de critères biophysiques retrouvés dans la littérature et les guides d'implantation des IVB sont présentés ci-dessous :

- **Topographie :** Les éléments qui influencent le plus le drainage urbain sont les surfaces imperméables et la pente des terrains, ceux-ci ont un impact sur la rapidité d'évacuation de l'eau et la concentration de débits (MDDEFP, 2011; New Jersey Department of Environmental Protection, 2018). La topographie joue également un rôle sur l'implantation des IVB, puisque les pentes élevées contraignent les implantations (Rahman et al., 2012). La connaissance des dépressions naturelles sur un terrain présente aussi un aspect économique, puisque ces sites permettent de minimiser l'excavation et le nivellement requis (CSA Group, 2018).
- **Nappe phréatique :** La nappe phréatique est une ressource importante à protéger puisqu'elle permet d'approvisionner en eau potable 25% de la population au Québec. L'une des raisons qui rend cette ressource convoitée est la bonne qualité de l'eau souterraine (MELCC, 2018; Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2020). Les mesures de gestion des eaux pluviales qui sont basées sur un processus d'infiltration peuvent constituer une source de contamination pour les eaux souterraines. L'infiltration des eaux de ruissellement contaminées à travers le sol peut affecter la qualité de l'eau de la nappe phréatique. Il est donc important de considérer le niveau de la nappe phréatique, ainsi que les sources de contamination du territoire (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018). D'un autre côté, l'objectif visé par une implantation d'IVB peut être de soutenir l'assainissement de l'eau souterraine puisée par des puits d'extraction. Toutefois dans un tel cas, des études doivent démontrer l'absence de contamination potentielle (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018). La profondeur de la nappe peut aussi permettre de cibler des zones où la recharge est prioritaire ou à éviter. La recharge de la nappe phréatique par infiltration peut entraîner certaines complications, notamment lorsque le niveau de la nappe dépasse celui du réseau de drainage ou d'égout. Dans ces conditions, l'eau souterraine peut s'infiltrer dans les conduites non étanches (Fletcher et al., 2013). Finalement, la profondeur de la nappe phréatique est cruciale pour choisir un site d'implantation d'IVB, puisque les différents guides imposent généralement une distance minimale entre l'infrastructure et la nappe phréatique (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018).
- **Précipitations :** Les précipitations influencent l'implantation des IVB par la quantité d'eaux pluviales et de ruissellement générée sur un territoire. Pour gérer les eaux urbaines, il est

important de considérer un ensemble d'événements de pluie et la distribution des précipitations dans l'année sur le territoire (MDDEFP, 2011).

- **Qualité du sol :** L'utilisation passée des sites permet d'identifier les zones où le ruissellement peut être hautement pollué, une donnée jugée pertinente à considérer lors du choix des sites d'implantation des IVB (Dagenais et al., 2014). La qualité des eaux de ruissellement peut être affectée par des zones d'entretien, d'alimentation, de démolition de véhicules, des stations-service, des zones d'entreposage ou manipulations extérieures de matériels dangereux ou des sites d'industries lourdes puisqu'elles sont sujettes à des charges élevées de contaminants (Dagenais et al., 2014; MDDEFP, 2011; TRCA/CVCA, 2010). Les eaux de ruissellement provenant de ces sites peuvent transporter des polluants jusqu'aux IVB qui peuvent alors diffuser cette pollution à travers le sol et l'eau (Kuller et al., 2017). L'accumulation de polluants peut également favoriser le colmatage par les sédiments et diminuer la durée de vie des systèmes (Yavari et al., 2021) et la performance hydrologique de systèmes comme les systèmes de biorétention (Lucke & Nichols, 2015).

- **Type de sols :** Pour les IVB basées sur des processus d'infiltration, la caractérisation du site est un élément essentiel. Le type de sols et les propriétés en surface et sous la surface des sols représentent les aspects ayant le plus grand impact sur la capacité d'infiltration du sol (MDDEFP, 2011). Les sols ayant une capacité d'infiltration élevée sont plus appropriés pour une implantation d'IVB basées sur des processus d'infiltration (Rahman et al., 2012). En effet, les IVB implantées sur un sol bien drainé ont un plus grand potentiel d'infiltration (Northeast Ohio Regional Sewer District, 2012). Les sols classés parmi les groupes hydrologiques de sol A et B sont ceux ayant un plus grand potentiel d'infiltration et constituent donc les sols qui mènent à une plus grande réduction des volumes de débordements lors d'une implantation d'IVB (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018). Des sols de sable et de gravier permettent une plus grande réduction du ruissellement, ainsi qu'une meilleure recharge de la nappe phréatique puisqu'ils ont un potentiel d'infiltration plus élevé (MDDEFP, 2011). Ces sols ont une granulométrie plus grossière ce qui permet d'éviter un ralentissement de la vitesse d'infiltration (Nathalie Bédard, 2012). Les sols formés de particules fines, comme les sols d'argile, réduisent quant à eux l'infiltration de l'eau dans le sol et réduisent donc le potentiel d'infiltration de certains types d'IVB (U.S. Environmental Protection Agency, 2014). Ces sols ne conviennent

généralement pas pour implanter des mesures de gestion des eaux pluviales (MDDEFP, 2011). Lorsque possible, c'est-à-dire lorsqu'une recharge complète de la nappe phréatique est possible, les sols en place à prioriser devraient avoir un taux d'infiltration supérieur à 25 mm/h (MDDEFP, 2011; Rahman et al., 2012), soit des sols de sable et de limon sablonneux. Selon la fonction souhaitée des systèmes, la conductivité hydraulique saturée des sols, soit leur capacité à laisser circuler l'eau lorsqu'ils sont saturés sous l'effet d'un gradient hydraulique, doit être considérée. Pour réduire les volumes d'eau, une conductivité hydraulique saturée minimale de 15 mm/h est recommandée (CSA Group, 2018). Pour maximiser la filtration des eaux, une conductivité hydraulique saturée de moins de 15 mm/h peut être préférable (CSA Group, 2018). L'article 11.17 du *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales* (MDDELCC, 2017) mentionne également que la valeur minimale de conductivité hydraulique à saturation devant être utilisée pour la conception d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales doit être au minimum de 15 mm/h lors des essais au terrain. En-dessous d'une conductivité hydraulique de 15 mm/h, un ouvrage basé sur une infiltration partielle peut être implanté (article 11.20; MDDELCC, 2017).

- **Contexte climatique** : Des considérations supplémentaires sont liées au contexte climatique lors du choix des végétaux, de l'emplacement et de la conception des IVB. Contrairement aux régions à climats tempérés, les infrastructures implantées en climat plus froid doivent résister à des conditions extrêmes telles que la sécheresse, l'inondation et le gel. L'apport en sels de déglaçage et les embruns salins peuvent affecter la croissance et la survie des végétaux et les propriétés physiques du sol (Chlela & Brodeur, 2008; MDDEFP, 2011). Bien que certaines études concluent que l'écoulement d'eau saline dans des systèmes comme les biorétentions n'endommagerait pas les végétaux (Beral et al., 2023), l'exposition des parties extérieures des végétaux aux embruns salins devrait être considérée (Caplan et al., 2023). Les sels de voirie utilisés en période hivernale affectent également à différents degrés les nappes aquifères, le sol, la flore, la faune aquatique et terrestre et les infrastructures en place (MELCC, 2021). L'infiltration d'eau de ruissellement chargée en sels peut également être un enjeu pour la protection des têtes de puits d'eau potable (CSA Group, 2018). Bien que les IVB permettent d'agir comme une zone tampon en retenant temporairement les eaux de ruissellement et les sels qu'elles contiennent, celles-ci ne

permettraient pas d'éliminer la charge de sels et agiraient plutôt comme une voie de transport des sels vers les eaux souterraines (Burgis et al., 2020). La neige usée peut être une source de contamination en raison de l'épandage de sels, d'abrasifs, de roc concassé et d'ordures ou particules de métal (Bäckström & Viklander, 2000; MELCC, 2021b). La manière dont la neige usée est gérée peut affecter les systèmes de biorétention (CSA Group, 2018). Bien qu'il soit possible d'utiliser les biorétentions pour stocker la neige, il y a un risque de compaction lorsque les systèmes ne sont pas conçus avec des végétaux adéquats (CSA Group, 2018). La priorisation de déneigement des rues peut permettre de cibler les sites où la neige usée est le plus rapidement enlevée. L'efficacité des biorétentions dépend de l'utilisation du sol et des stratégies de déneigement, avec une performance optimale sur les routes des zones industrielles ou celles où la neige est poussée plutôt que collectée (Gougeon et al., 2023).

Les **critères liés au contexte urbain** des IVB permettent de considérer les limites imposées par certains sites d'un territoire donné et d'un autre côté, de considérer ceux qui peuvent constituer des opportunités pour l'implantation d'une IVB. Quelques exemples de critères liés au contexte urbain retrouvés dans la littérature et les guides d'implantation des IVB sont présentés ci-dessous :

- **Droits de propriété :** La délimitation des lots cadastraux permet de considérer la taille des terrains, mais donne également des indications sur les droits de propriété (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018). Les droits de propriété influencent l'implantation des IVB, puisqu'il est généralement plus compliqué d'implanter des mesures de gestion des eaux pluviales sur des terrains privés que publics (Voskamp & Ven, 2015). Au Québec, les municipalités ont le pouvoir de réglementer certaines activités, constructions et ouvrages sur leur territoire, selon la *Loi sur les compétences municipales* (article 6). Ce pouvoir détenu par les municipalités facilite donc l'implantation des IVB sur les terrains municipaux et représente donc de bonnes opportunités d'implantation (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018; Paquin, 2009). Lorsque le terrain appartient déjà à la municipalité, les processus de transfert de propriété, la gestion des servitudes et l'entretien sont facilités (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018). La mise en place d'IVB sur des lots privés comporte pour sa part des enjeux supplémentaires notamment en raison de l'entretien puisque ces aspects pourront impliquer une certaine responsabilité de la part du propriétaire. Par ailleurs, l'entretien peut avoir un

impact sur la performance des systèmes (MDDEFP, 2011) et pour cette raison, un accord est généralement nécessaire entre la municipalité et le propriétaire pour assurer le respect de la stratégie d'entretien, la charge de responsabilités et les droits d'accès (MDDEFP, 2011).

- **Valeur des terrains :** Les coûts liés à l'acquisition de terrains doivent parfois être considérés dans les coûts de construction d'IVB (MDDEFP, 2011). La superficie et l'emplacement des terrains constituent des éléments pouvant influencer le coût d'acquisition de ceux-ci. Lorsque différentes solutions sont considérées, la prise en compte du coût d'achat du terrain influence souvent leur évaluation (MDDEFP, 2011) et il peut alors être souhaité de minimiser ces coûts. Le taux de taxes foncières générales de la municipalité permet de donner une indication du prix du terrain et de la valeur au rôle d'évaluation. La catégorie d'immeuble et le secteur où se situe la propriété influencent le taux de taxation (Ville de Trois-Rivières, 2021).
- **Réseau routier :** Certains types d'IVB sont parfaitement adaptés pour une implantation sur le réseau routier et offrent une opportunité de réduire l'emprise des surfaces imperméables en réduisant la largeur des rues. Toutefois, la réduction de la largeur des rues par l'implantation d'IVB doit permettre de conserver un espace suffisant pour une largeur de voies de circulation minimale, des stationnements sur rue et des accès pour les véhicules d'urgence (MDDEFP, 2011). Les rues ne sont pas nécessairement conçues selon les besoins actuels et futurs de sorte que leur largeur est souvent surdimensionnée, particulièrement en zones résidentielles. Ces secteurs représentent d'ailleurs d'excellentes opportunités pour y réduire la largeur de l'emprise des rues (MDDEFP, 2011). L'emprise de la route est un élément important à considérer pour l'implantation d'une IVB pour indiquer l'espace disponible. L'emprise minimale d'une rue est généralement de 12 mètres (Regroupement des organismes de bassin versants du Québec, 2018). Le type de rue (par exemple, artère principale, rue locale, rue piétonne, autoroute, etc.) conditionne l'espace disponible pour l'aménagement et permet également d'identifier le type de propriétaires impliqués. Par exemple, les rues de types « artères » représentent généralement de bonnes opportunités pour y implanter des mesures de gestion des eaux pluviales, l'espace disponible y étant plus important.

- **Développement urbain prévu :** Les nouveaux développements urbains prévus sur le territoire peuvent inclure la construction de nouvelles rues et la construction de nouveaux bâtiments, représentant des occasions d'y faire la gestion du volume et de la qualité des eaux de ruissellement et d'y intégrer des IVB (MDDEFP, 2011). Les barils de récupération d'eau de pluie peuvent particulièrement bien s'intégrer par exemple dans le cas de sites de redéveloppement dont l'espace disponible est petit (TRCA/CVCA, 2010). La réglementation de ces nouveaux développements peut également faciliter l'implantation de mesures de gestion des eaux pluviales. En effet, la *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme* (article 145.9) octroie le droit à la municipalité d'établir des objectifs de développement. Pour créer des «développements de moindre impact», il est recommandé de drainer les eaux pluviales en maximisant l'infiltration par des noues végétalisées, des jardins de pluie et des aires de biorétention (Regroupement des organismes de bassin versants du Québec, 2018). Les travaux d'infrastructures, tels que sur le réseau routier représentent des opportunités pour l'implantation d'IVB (Dagenais et al., 2017). En effet, l'intégration d'IVB dans des travaux de réfection est une pratique de planification opportuniste adoptée par les municipalités (Kuller, Bach, et al., 2018).
- **Utilisation du sol :** Certains types d'utilisation du sol sont plus propices pour l'implantation de certains types d'IVB. Par exemple, les aires de stationnement, les centres sportifs, les parcs, les bibliothèques et les théâtres sont des sites qui, lorsqu'ils appartiennent à la municipalité, représentent de bonnes opportunités pour y faire la gestion des eaux pluviales. De plus, certains types d'IVB sont plus appropriés pour certains secteurs. Par exemple, les barils de récupération d'eau de pluie sont appropriés pour les secteurs résidentiels, commerciaux, institutionnels et industriels (MDDEFP, 2011; TRCA/CVCA, 2010), alors que les noues engazonnées ou plantées peuvent être mieux adaptées pour les aires de stationnement, les routes ou les secteurs résidentiels (MDDEFP, 2011).
- **Infrastructures de drainage existantes** : La présence d'infrastructures de drainage sous la terre influence d'une part l'implantation des IVB par la contrainte d'espace disponible (Voskamp & Ven, 2015). D'autre part, le réseau de drainage existant est pertinent à considérer lorsqu'une modélisation hydrologique ou hydraulique doit être réalisée parallèlement (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018).

- **Servitudes d'utilité publique** : Une autre contrainte territoriale concerne les terrains soumis à une servitude d'utilité publique qui permet d'offrir à la population l'accès à des services publics, tels que l'approvisionnement en gaz, en électricité ou en eau potable. Un site affecté à une servitude permet donc à la municipalité ou à des entreprises comme Hydro-Québec d'utiliser une partie d'un terrain afin d'y implanter des infrastructures de services publics comme des conduites de gaz, des conduites d'eau potable et des câbles électriques et de télécommunication (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, 2020). Certaines activités peuvent également être prescrites sur ces terrains en raison de la présence d'une telle infrastructure. Par exemple, en présence de lignes de distribution aériennes pour l'électricité, les piscines et les champs d'épuration sont interdits (Hydro-Québec, 2020).

La prise en compte du **contexte socio-économique** peut aider à améliorer l'acceptabilité sociale d'une implantation d'IVB (New Jersey Department of Environmental Protection, 2018). Ces critères ne sont que très peu mentionnés dans la littérature grise. Des exemples de critères socio-économiques sont présentés ci-dessous :

- **Défavorisation matérielle et sociale:** L'implantation des IVB peut augmenter la valeur des propriétés limitrophes (MDDEFP, 2011), il est donc important de considérer les conditions socio-économiques afin de soutenir les populations plus défavorisées, tout en évitant un éco-embourgeoisement.
- **Vulnérabilité aux aléas:** Certaines populations ont une vulnérabilité plus importante aux aléas climatiques en raison du manque d'accès à des infrastructures de santé ou selon des facteurs sociodémographiques (par exemple, l'état matrimonial, l'âge, etc.) (Université Laval, 2018).

Les **services écosystémiques (SE)** devraient être considérés dans le choix des sites d'implantation des IVB, puisque les bénéfices que ceux-ci apportent aux communautés varient dans l'espace et sont influencés par la présence d'IVB dans la ville (Kremer et al., 2016). En plus de permettre de favoriser des implantations multi-perspectives et multi-objectifs (Kremer et al., 2016), l'inclusion des SE dans la planification urbaine peut aider à soutenir une équité dans leur accès en milieu urbain, une problématique actuelle dans les villes. Les relations et interactions qui existent entre les différents SE peuvent s'avérer complexes à considérer dans un processus décisionnel

d'implantation d'IVB et c'est pour cette raison que l'ADMC peut constituer un moyen efficace de les intégrer (Kremer et al., 2016).

2.2.4.2 Caractère multidisciplinaire de la planification des IVB

La planification des IVB implique la prise en compte d'un large éventail de disciplines en raison de la multiplicité des enjeux environnementaux, sociaux et urbains qu'elle recouvre. Pour garantir l'efficacité et la pertinence de ces projets, il est essentiel d'intégrer les préférences des parties prenantes, ce qui permet de s'assurer que les besoins spécifiques des communautés et des différents acteurs soient reflétés dans les décisions (Axelsson et al., 2021; Luyet et al., 2012). En favorisant une approche collaborative, la planification des IVB devient plus inclusive et adaptative, ce qui renforce l'acceptation et la légitimité des décisions prises (Baker & Chapin Iii, 2018; Gonzalez & Enríquez-de-Salamanca, 2018). Par ailleurs, la prise en compte de la diversité des acteurs permet de limiter les biais décisionnels en intégrant une pluralité de connaissances et d'expertises, contribuant ainsi à la réussite des projets (Hämäläinen, 2015; Lienert et al., 2016). Les acteurs impliqués peuvent appartenir à divers domaines, tels que la gestion des espaces verts et des parcs, les transports et la circulation, la gestion de l'eau, l'ingénierie, les sciences environnementales, l'urbanisme, l'administration, la biologie, l'écologie, l'économie, les initiatives communautaires, l'adaptation aux changements climatiques et les SE, entre autres.

Étant donné que le travail en silos est défavorable à la planification des IVB (Kambites & Owen, 2006), une collaboration et une coordination entre les services municipaux et les autres parties prenantes seraient nécessaires pour bénéficier des avantages qui peuvent en être tirés, ce qui a d'ailleurs été identifié comme une clé pour des implantations réussies (Dagenais et al., 2011). Le travail multidisciplinaire n'est toutefois pas simple à intégrer dans la planification des IVB en raison de la complexité du système urbain actuel. La planification des IVB doit également tenir compte des préférences des parties prenantes (Hansen & Pauleit, 2014).

2.2.4.3 Freins à l'implantation des IVB

Dû à l'étendue des aspects devant être considérés pour l'intégration d'IVB, la planification de ces systèmes en milieu urbain peut s'avérer un processus complexe, à laquelle s'ajoutent plusieurs défis. Sont discutés ci-dessous les freins rencontrés par les municipalités pour mettre en œuvre des projets d'IVB.

- **Travail en silos**; **manque de communication, de collaboration et de partage de connaissances** : Le travail en silos entre différents services et expertises, caractérisé par un manque de communication, de partage des connaissances et de collaboration entre la multitude d'acteurs impliqués et entre les services municipaux, freine l'implantation des IVB (Bissonnette et al., 2018; Frantzeskaki et al., 2020; Kambites & Owen, 2006; Kauark-Fontes et al., 2023; Kuller et al., 2022; Van Neste et al., 2021). Cela contraste avec le processus de planification souhaité pour l'implantation de ces systèmes, qui devrait être multidisciplinaire (Van Neste et al., 2021), holistique, stratégique et intégré (Kambites & Owen, 2006; White & Alarcon, 2009), et avec la multifonctionnalité qui les caractérise (Meerow & Newell, 2017). Toutefois, en raison de la complexité des systèmes urbains actuels, le travail multidisciplinaire représente un défi pour les municipalités. Les modes de gouvernance sont traditionnellement centralisés, ce qui limite la multidisciplinarité et la représentation d'une diversité adéquate d'acteurs (Dhakal & Chevalier, 2017). La dépendance des municipalités à des entités institutionnelles plus importantes peut complexifier le processus d'implantation d'IVB (par exemple, une implantation d'IVB sur le réseau routier sous la juridiction du *Ministère des Transports du Québec* peut être plus complexe). Au contraire, une trop grande fragmentation de la gestion de la ressource en eau peut également nuire. Par exemple, un même bassin versant peut être géré par plusieurs entités ou municipalités ce qui entraîne un manque de coordination entre les actions et qui complexifie les approches et la gestion des fonds (Roy et al., 2008). Il peut également y avoir une incompréhension du rôle à jouer dans ces projets pour certains acteurs appelés à contribuer ou investir, ce qui rend cette collaboration multidisciplinaire plus ardue (Fredette, 2023).
- **Dépendance au chemin emprunté et modes de gouvernance :** Dans un contexte de planification des infrastructures d'eau urbaines, la dépendance au chemin peut expliquer les difficultés auxquelles les institutions sont confrontées, comme le manque d'adaptation et de flexibilité (Van Neste et al., 2021). La notion de dépendance au chemin emprunté soutient que les choix faits dans le passé peuvent affecter les décisions politiques dans le présent (Van Neste et al., 2021). La dépendance au chemin a d'ailleurs été identifiée comme un frein important aux changements institutionnels par des professionnels en urbanisme de l'Angleterre et de l'Irlande (Matthews et al., 2015). L'implantation non stratégique des IVB

et basée sur un seul objectif peut être associée à ce manque de flexibilité auquel les experts sont confrontés pour se conformer aux réglementations en matière de gestion des eaux de ruissellement (Meerow, 2020). Pour surmonter ce frein, il est essentiel d'assurer une meilleure coordination entre la vision à long terme et la planification (Bichai et al., 2018). Une intégration plus stratégique des outils et processus d'urbanisme permettrait également de mieux gérer les compromis, les conflits et les enjeux d'équité sociale (Bush & Doyon, 2019).

- **Manque de diffusion des connaissances :** Bien que les bienfaits des IVB soient reconnus, une méconnaissance des fonctions et des bénéfices est encore observée (Fredette, 2023). L'un des constats expliquant ce manque d'application est la méconnaissance et le manque d'expériences sur le territoire[1]. Le manque de connaissances sur l'état des milieux naturels a également été soulevé comme étant un obstacle à leur implantation (Bissonnette et al., 2018), tout comme la connaissance des besoins sur le territoire (Bissonnette et al., 2018) et des IVB de manière générale (White & Alarcon, 2009). Outre les connaissances, le manque de compréhension entre le contexte urbain et l'emplacement des IVB (Kuller, Bach, et al., 2018) et l'absence de prise en compte des avancées de la recherche sur les IVB dans le processus de planification urbaine entravent la mise en œuvre de stratégies optimales et intégratives (Norton et al., 2015). Il y a un manque de formation, de diffusion et de transfert de connaissances sur ces concepts (Fredette, 2023) Le manque de compréhension vis-à-vis du concept d'IVB peut favoriser le manque d'actions d'adaptation aux changements climatiques et contribuer en retour à la dépendance au chemin emprunté (Matthews et al., 2015).
- **Manque de fonds et d'encadrement politique :** L'un des aspects les plus difficiles pour les municipalités souhaitant implanter des IVB est de trouver les fonds pour financer les projets et assurer leur entretien (Fredette, 2023). Outre les coûts de construction et de conception, des coûts liés à l'entretien, de remplacement d'infrastructures en place et de formation, peuvent être impliqués et, combinés ensembles, peuvent limiter et voire empêcher l'implantation d'IVB (Roy et al., 2008). L'entretien constitue l'une des préoccupations les plus importantes dans certains cas (White & Alarcon, 2009). Le manque

[1] Provient du webinaire suivant : David Viens (12 novembre 2021). *Ville Éponge : un réseau et les phytotechnologies au service des villes résilientes, par David Viens*. Société de Phytotechnologies du Québec.

de capacité des institutions à assurer un financement pour l'entretien, notamment pour former et mobiliser le personnel et les citoyens à l'entretien, impacte la pérennité des infrastructures. Le manque de réglementations, de normes, de directives ou de cadres politiques freine également l'application des IVB (Roy et al., 2008). Le coût de l'eau potable dans le réseau municipal peut nuire à l'utilisation d'approches de réutilisation de l'eau de pluie par les villes, par exemple. Sans incitatifs financiers ou réglementation, les villes doivent faire preuve d'une grande motivation pour mettre en œuvre ce genre de projets écologiques par eux-mêmes (Boyer et al., 2013; Montginoul, 2006). Ce manque d'exigences réglementaires limite aussi la promotion de l'utilisation d'IVB (Fredette, 2023; Roy et al., 2008).

- **Acceptabilité sociale des projets :** La réceptivité des projets d'IVB par les décideurs et les citoyens joue un rôle dans la capacité à implanter ces systèmes (Fredette, 2023; Roy et al., 2008). La réticence aux changements, identifiée comme un obstacle à l'implantation des IVB, autant pour les citoyens que pour les praticiens, peut être causée par les sources de risques que ces projets amènent comme les risques de pénalité de coût, de perte de fonctionnalité, de défaillance, de perte de revenus, de maladie, de non-conformité avec les normes (Roy et al., 2008). L'entretien des infrastructures occupe une place centrale dans l'acceptabilité du public, puisque des infrastructures dont l'entretien est négligé peuvent gêner les citoyens (Fredette, 2023; Roy et al., 2008). L'incompréhension des bénéfices, la réticence des coûts engendrés, la peur de la perte de stationnement et la peur de l'éco-embourgeoisement sont également des appréhensions pouvant limiter l'acceptabilité sociale des projets (Fredette, 2023). L'acceptabilité sociale passe alors aussi par l'amélioration de la compréhension du rôle des IVB auprès des citoyens (Fredette, 2023).

2.2.5 Au Québec

Au Québec (Canada), il y a un intérêt croissant pour l'intégration des IVB dans la planification urbaine, car l'importance de la gestion durable des eaux pluviales est de plus en plus reconnue (MELCC, 2021a). Des études antérieures ont montré l'efficacité des IVB en climat froid (Kratky et al., 2018; MDDEFP, 2011; Muthanna, 2007; Toronto and Region Conservation, 2009) malgré les défis supplémentaires que peuvent représenter les températures froides, le sol gelé, la neige usée et les sels de déglaçage (Bäckström & Viklander, 2000; Gougeon et al., 2023; MDDEFP, 2011).

À l'horizon 2030, le Québec souhaite mettre en place des mesures pour lutter contre les changements climatiques. Pour ce faire, les grandes lignes de la stratégie à adopter ont été élaborées dans le *Plan pour une économie verte 2030* (Gouvernement du Québec, 2023). Face aux effets déjà ressentis des changements climatiques au Québec, variant selon les régions du territoire, le gouvernement souhaite encourager le développement d'outils d'adaptation et miser sur une approche préventive. Les IVB sont d'ailleurs soulevées à titre de méthode réduisant les risques des changements climatiques. On y mentionne que les municipalités auront un rôle important à jouer dans l'aménagement du territoire. Afin de favoriser spécifiquement une gestion intégrée, durable et équitable de l'eau et ses ressources au Québec, *la Stratégie québécoise de l'eau 2018-2030* (Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018) a été élaborée pour présenter les orientations visées. Cette stratégie fait suite à la *Politique nationale de l'eau* (Gouvernement du Québec, 2002). Au niveau des municipalités, le *Regroupement des organismes de bassins versants du Québec* a réalisé un guide d'accompagnement municipal pour la gestion durable des eaux pluviales (ROBVQ, 2017). Selon ce guide, les motivations des municipalités en matière de gestion des eaux pluviales dans les milieux urbanisés seraient l'amélioration de la qualité de l'eau, la gestion des inondations, la réduction de la consommation d'eau potable, la diminution de la pression sur le réseau de traitement et la mise à profit des écosystèmes naturels.

L'utilisation d'outils et d'approches pour la mise en œuvre des IVB a le potentiel de faciliter leur planification (Bach et al., 2020; Dagenais et al., 2011; Kuller, Bach, et al., 2019). Le développement des pratiques et outils est toutefois désynchronisé à travers les pays et les villes, mais même également au sein d'une même ville comme Montréal où les acteurs développent leurs propres méthodes (Madénian & Van Neste, 2024). Dans la pratique, un fort consensus a été observé concernant le manque d'alignement entre les outils et les mécanismes socio-écologiques (Bissonnette et al., 2018). De plus, bien que des guides aient été développés pour guider les praticiens comme les ingénieurs dans la conception ou l'implantation d'IVB sur le territoire, ceux-ci ne permettent pas toujours de les supporter adéquatement dans l'atteinte de leurs objectifs (Roy et al., 2008). Au Québec, les municipalités manquent d'outils d'aide à la décision (Dagenais et al., 2014). Sans outil ou cadre stratégique pour guider les décideurs, la prise en compte de la variété de critères pertinents à considérer complexifie l'implantation d'IVB. Ces outils sont toutefois souvent

exigeants en données (Kuller, Farrelly, et al., 2018) et le manque de données géospatiales et de leur accessibilité peut ajouter un obstacle (Dagenais et al., 2014).

Certaines ressources existent afin de guider les preneurs de décision dans l'implantation d'IVB sur leur territoire, tels que le *Guide de gestion des eaux pluviales* (MDDEFP, 2011) qui présente une grille basée sur six étapes qui permet de guider la sélection des pratiques optimales de gestion des eaux pluviales au Québec. Toutefois, bien que spécifiquement développé pour le Québec, ce guide de travail n'est ni automatisé ni supporté par des outils cartographiques ce qui ne permet pas de supporter adéquatement les planificateurs au niveau de l'emplacement de ces systèmes (Dagenais et al., 2014; MDDEFP, 2011). Une démarche d'aide à la décision participative et itérative par cartographie, basée sur les principes du *Low Impact development* (LID) a été développée pour permettre d'identifier les sites d'implantation des IVB où les bénéfices secondaires sont maximisés. Développé et testé au Québec (Beauport, ville de Québec) au cours d'un projet pilote multidisciplinaire, ce cadre considère les aspects techniques, la vulnérabilité de la population et du territoire et l'amélioration du cadre de vie (Dagenais et al., 2017).

Dans un contexte de grande ville comme Montréal (Québec), plusieurs objectifs sont visés dans les plans de verdissement comme une meilleure qualité de vie, la qualité esthétique, l'augmentation de la canopée, la lutte contre les îlots de chaleur et la biodiversité. Il demeure que dans la pratique l'implantation des IVB par opportunisme est très présente et est réalisée de manière systématique pour tout projet de réfection de rues propices à l'implantation des IVB (Madénian & Van Neste, 2024). Plusieurs enjeux de gouvernance entravent l'implantation des IVB en milieu urbain dans le contexte montréalais, comme le travail en silos, la coordination entre les échelles territoriales, le financement et la responsabilité partagée entre le public et le privé et le manque de visibilité des enjeux sociaux (Madénian & Van Neste, 2024).

2.3 Théorie de la valeur multi-attributs (MAVT)

L'aide à la décision multicritère (ADMC) permet l'évaluation des solutions d'une décision en tenant compte de divers critères simultanément. L'objectif général de l'ADMC est de soutenir les décideurs dans la prise de décision complexe, soit des décisions pouvant impliquer des critères flous, imprécis et contradictoires (Eisenführ et al., 2010). Sous l'ADMC, chaque solution peut être associée à un score numérique permettant de les classer afin de prendre une décision systématique, transparente et justifiable dans un contexte décisionnel donné représentant le système de valeurs

des décideurs. Elle permettra de comparer des solutions selon les critères et préférences définis. Il existe plusieurs approches de l'ADMC, pour lesquelles le type de méthode d'agrégation ou de pondération peut différer. Les sept méthodes d'ADMC les plus utilisées (Marttunen et al., 2017) sont : le processus analytique hiérarchique (AHP) (Saaty, 1977), le processus de réseau analytique (ANP) (Saaty, 2005), ELECTRE (Roy, 1991), les théories de la valeur et de l'utilité multi-attributs (MAVT/MAUT) (Keeney & Raiffa, 1976), PROMETHEE (Brans et al., 1986) et TOPSIS (Hwang & Yoon, 1981). Les approches les plus courantes se divisent en deux catégories: les méthodes à fonction de valeur (par exemple, MAVT/MAUT, AHP/ANP, combinaison linéaire pondérée - *WLC* et méthodes à point de référence - *RP*) et les méthodes de surclassement (par exemple, ELECTRE et PROMETHEE) (Malczewski & Jankowski, 2020).

La MAVT est une théorie spécifique de l'ADMC (Ferretti et al., 2014; Keeney & Raiffa, 1976). Elle est particulièrement avantageuse pour classer et guider le choix de diverses solutions dans des problématiques environnementales complexes, ce qui en fait l'une des méthodes ADMC les plus largement utilisées dans ce domaine (Cegan et al., 2017). Un de ses atouts majeurs réside dans son adaptabilité aux processus décisionnels, tout en permettant la prise en compte à la fois de données qualitatives et quantitatives et des préférences des parties prenantes (Stefanopoulos et al., 2014). Dans sa forme additive simple, la méthode MAVT est simple à comprendre et à appliquer (Stefanopoulos et al., 2014). Elle repose sur le principe que la décision peut être représentée par des fonctions de valeurs reflétant les préférences et permettant de transformer les performances de différentes solutions en un score numérique afin d'établir un ordre de préférence (Ferretti et al., 2014). La pondération des critères de décision, permettant de déterminer l'importance respective et relative des critères, est un moyen d'obtenir ces préférences sous la MAVT (Eisenführ et al., 2010). La théorie se base sur trois étapes principales (Bertsch & Fichtner, 2016):

(1) Structurer le problème décisionnel : Identifier les critères et leurs attributs, les structurer de manière hiérarchique et identifier les données pour mesurer les attributs.

(2) Recueillir les informations préférentielles : Recueillir les préférences intra-critères (c.-à-d., les fonctions de valeur) et inter-critères (c.-à-d., les poids).

(3) Agrégation et analyse de sensibilité : Interpréter les résultats selon des critères de décision et analyser la sensibilité des résultats à la variation des paramètres.

2.3.1 Structuration du problème décisionnel

Une décision est motivée par un désir d'atteindre certains objectifs où différentes solutions sont possibles afin de s'y rapprocher (Eisenführ et al., 2010). La structuration du problème de décision vise à définir d'abord quels sont les acteurs à impliquer (par exemple via une analyse des parties prenantes), quels sont les objectifs visés ou quelles sont les solutions possibles (Scholten et al., 2015). Cette étape est souvent négligée dans le développement des OAP et en ADMC en général (Malczewski & Jankowski, 2020; Marttunen et al., 2019). Les parties prenantes sont rarement impliquées à ce stade, malgré l'importance reconnue de leur participation dès les premières phases du processus (Allain et al., 2017; de Brito & Evers, 2016; Jelokhani-Niaraki, 2021b).

2.3.1.1 Pensée axée sur les valeurs

Dans le cadre de l'ADMC et plus spécifiquement sous la MAVT, la pensée axée sur les valeurs (*value-focused thinking*, VFT) (Keeney, 1996) est l'une des méthodologies de structuration du problème décisionnel qui met l'accent sur l'identification et l'intégration explicite des valeurs et préférences des parties prenantes dans le processus de prise de décision (Marttunen et al., 2017). Le VFT propose de formuler les problèmes de décision en fonction des objectifs que les parties prenantes cherchent à atteindre pour formuler les solutions à évaluer (Belton & Stewart, 2010; Marttunen et al., 2017). Les étapes principales sont : (i) identifier les valeurs des parties prenantes, (ii) convertir les valeurs en objectifs, (iii) organiser en une hiérarchie d'objectifs, (iv) développer le réseau de moyens et de fins (Françozo & Belderrain, 2022). Certaines études incluent également l'identification des attributs mesurant les objectifs et le développement des solutions (Françozo & Belderrain, 2022). Pour plus de détails sur le VFT et les motivations derrières, voir l'Annexe A.1.

L'organisation hiérarchique des objectifs selon un diagramme permet de structurer la décision d'une manière permettant aux décideurs de mieux comprendre les objectifs de cette décision (Eisenführ et al., 2010). La Figure 2.3 présente un exemple de représentation hiérarchique des objectifs, où les objectifs principaux figurent au niveau supérieur, tandis que chaque branche contient plusieurs sous-objectifs au niveau inférieur, lesquels sont mesurés à l'aide d'attributs associés à des données géospatiales.

La réalisation d'un réseau de moyens et de fins (Keeney, 1996) est une méthode qualitative qui permet de souligner les relations, la complémentarité et les redondances entre les objectifs formulés

et d'éviter ainsi le double comptage des actions qui visent le même problème (Gregory & Wellman, 2001; Marttunen et al., 2019). Afin de maximiser leur compréhension, les objectifs doivent être simples, non redondants, compréhensibles, concis et clairs (Eisenführ et al., 2010).

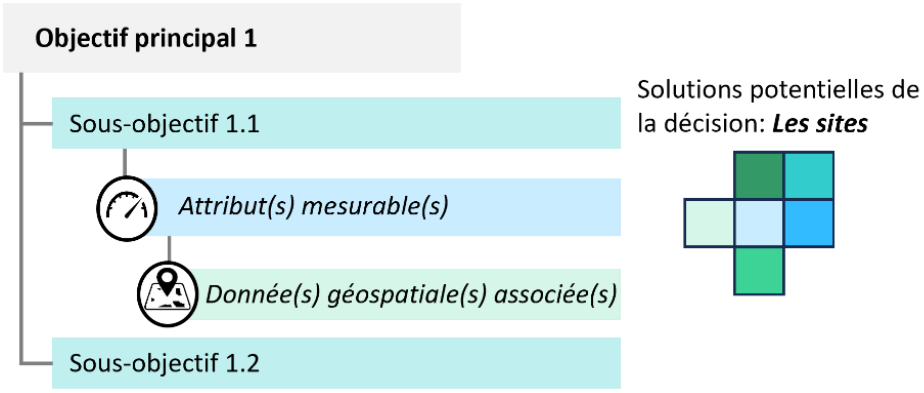


Figure 2.3 Exemple d'une organisation hiérarchique des objectifs avec un objectif principal, des sous-objectifs, des attributs mesurables et des données associées en contexte spatial

2.3.1.2 Analyse des parties prenantes

Une partie prenante est toute personne partageant un intérêt ou un enjeu commun pour une question ou un système en particulier (Harrison & Qureshi, 2000). Il n'existe ni de règle définie pour savoir qui représentera un groupe ou plusieurs groupes de parties prenantes, ni de règle pour définir la taille de l'échantillon. Ces choix dépendent des objectifs de l'étude, de l'utilité, des résultats recherchés, du temps et des ressources disponibles (Harrison & Qureshi, 2000). La participation de parties prenantes dans les études sur les OAP et l'ADMC pour la planification des IVB est surtout observée à l'étape de pondération des objectifs dans la littérature (Bousquet et al., 2023). Le type et le nombre de parties prenantes, ainsi que le format d'ateliers pour l'obtention des préférences d'objectifs d'une décision peuvent permettre de réduire les biais engendrés par la méthode de pondération des critères utilisée, par exemple, en incluant différents types de parties prenantes pour réduire les conflits d'intérêts (Lienert et al., 2016) ou en optant pour des questionnaires individuels si l'on veut réduire la pensée de groupe.

À partir d'une revue non exhaustive de la littérature (voir Annexe A, Tableau A.2.1), une identification des parties prenantes impliquées dans des cas d'étude a été réalisée sur la planification et l'évaluation spatiale des IVB, solutions basées sur la nature et des SE (Bellamy et al., 2017; Billaud et al., 2020; Goodspeed et al., 2022; Meerow, 2019; Sturiale et al., 2022), sur la

classification et le choix de types d'IVB ou de paysages fournissant des SE, d'IVB et de systèmes d'eau urbains (Jayasooriya et al., 2019; Latifia et al., 2019; LeBrasseur, 2022; Sabbaghian & Nejadhashemi, 2020), et sur l'étude de la participation des parties prenantes en contexte de décisions environnementales et leurs perceptions de la gestion de l'eau urbaine et des SE (Skrydstrup et al., 2020; van der Jagt et al., 2019). Le Tableau A.2.1 a permis de classifier les parties prenantes identifiées dans la littérature en cinq groupes, soit les services publics, le secteur de l'industrie et du privé, les organismes non gouvernementaux (ONG), le secteur de la recherche et les groupes communautaires. La Figure 2.4 présente une organisation en réseau de l'analyse des parties prenantes du Tableau A.2.1 et les sous-catégories identifiées dans chacun des cinq groupes.

Pour la taille de l'échantillon de parties prenantes à impliquer, dans les enquêtes Delphi, qui sont des séries de questionnaires permettant la prise de décision en groupe et l'interaction entre chercheurs et experts, il n'y a pas de nombre standard de participants à considérer, mais la majorité dans la littérature en considère 10 (Day & Bobeva, 2005 ; Gordon & Pease, 2006 ; Hung et al., 2008). Dans les contextes de décision environnementale, Jayasooriya et al. (2019) ont considéré de 10 à 15 parties prenantes et Skrydstrup et al. (2020) ont considéré 14 parties prenantes.

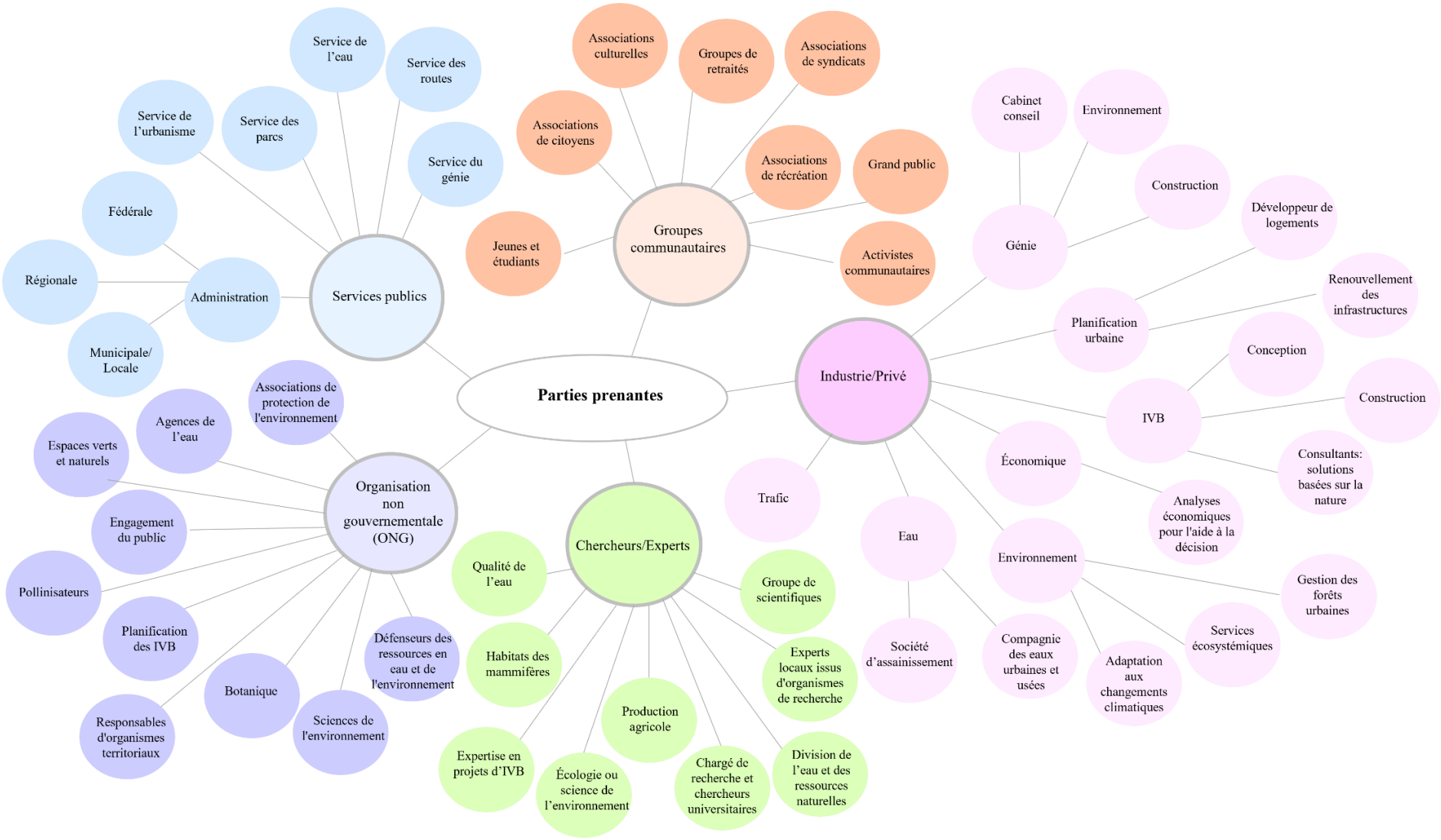


Figure 2.4 Analyse des secteurs d'activité des parties prenantes potentielles en contexte de planification des IVB et de décisions environnementales

2.3.2 Obtention des préférences

En aide à la décision multicritère (ADMC), modéliser les préférences de décideurs constitue un élément clé, surtout dans le cadre de décisions impliquant plusieurs parties prenantes (Bertsch & Fichtner, 2016). Sous la MAVT, on retrouve deux types de préférences, soit les *préférences intra-objectifs* qui permettent d'indiquer la performance de chaque objectif par les fonctions de valeurs ou échelles de valeurs des attributs (section 2.3.2.1) et les *préférences inter-objectifs* qui indiquent l'importance relative entre les objectifs par la pondération des objectifs (section 2.3.2.2).

2.3.2.1 Intra-objectif : Les échelles de valeurs des attributs

Pour être en mesure de prendre des décisions complexes avec plusieurs objectifs, la performance de chaque objectif individuellement doit être préalablement déterminée (Eisenführ et al., 2010). Les échelles de valeurs permettent d'évaluer à quel point chaque solution de la décision remplit un objectif donné sur une échelle normalisée, généralement de 0 à 1, où 1 est la solution la plus favorable et 0 la moins favorable (Bertsch & Fichtner, 2016). Cette normalisation reflète le jugement des décideurs par rapport à la performance des solutions pour chaque objectif et permet de comparer des objectifs de natures différentes en les ramenant sur une même échelle de performance.

En contexte de décision spatiale, les solutions possibles de la décision sont les sites potentiels dans la zone d'étude. Ainsi, les échelles de valeurs traduisent la performance d'un site pour atteindre un objectif spécifique. Lorsque l'objectif est mesuré par un attribut avec des valeurs continues (ex : le pourcentage de pente dans la zone d'étude), les échelles de valeurs sont présentées sous forme de fonctions continues, appelées fonctions de valeurs. Lorsque l'objectif est plutôt mesuré par un attribut avec des valeurs discrètes (ex : les catégories d'utilisation du sol dans la zone d'étude), les échelles de valeurs sont présentées sous forme d'échelle catégorique. Les échelles de valeurs des sous-objectifs (voir Figure 2.3 pour la structure d'une hiérarchie d'objectifs) sont déterminées en fonction des attributs pertinents pour ces objectifs et peuvent être de forme linéaire ou non linéaire (Haag, Lienert, et al., 2019).

Bien que de nombreuses études présument une relation linéaire entre l'attribut et l'atteinte de l'objectif, il est souvent plus réaliste d'ajuster les fonctions ou les échelles aux préférences d'experts pour chaque objectif (Schuwirth et al., 2012). Une analyse de sensibilité permet ensuite de mesurer l'impact de la linéarité ou non-linéarité des échelles de valeurs dans le modèle global.

Il existe trois principales méthodes pour définir les échelles de valeurs (Eisenführ et al., 2010), présentées au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Méthodes existantes pour définir les échelles de valeurs des attributs

Méthode	**Description**	**Étapes**	**Avantages (+) et inconvénients (-)**
Méthode de notation directe (en anglais, *direct rating method*)	Consiste à évaluer directement chaque niveau de l'attribut pour mesurer la performance des solutions.	1. Définir les valeurs de l'attribut les plus favorables et les moins favorables. 2. Classer les solutions selon l'ordre de préférence des décideurs par rapport aux niveaux de chaque attribut. 3. Évaluer directement les solutions classées. La meilleure solution est évaluée à 1 et la moins adéquate est évaluée à 0. Les solutions intermédiaires reçoivent un score entre 0 et 1, représentant l'ordre de préférence.	+ Méthode la plus simple + Permet d'évaluer des attributs discrets - Méthode la plus exigeante cognitivement et offrant le moins de support au décideur (Eisenführ et al., 2010)
Technique de la séquence de la différence standard (en anglais, *difference standard technique*)	Consiste à déterminer des niveaux d'attributs de manière progressive par la formulation de déclarations d'indifférence.	1. Définir les valeurs de l'attribut les moins favorable (x_0). Ce niveau est évalué à 0. 2. Définir une unité correspondant à environ 1/5 de la plage totale des valeurs de l'attribut. 3. Augmenter le niveau de l'attribut le moins favorable (x_0) de cette unité définie précédemment afin d'obtenir un second niveau de l'attribut (x_1) correspondant à un score de 1. Cette transition entre le niveau le moins favorable et l'addition de l'unité de transition (c.-à-dire 1/5 de la plage de valeurs de l'attribut) est donc évaluée à 1. 4. Évaluer d'autres transitions en cherchant un nouveau niveau de l'attribut (y) où la transition serait équivalente à la transition de x_0 à x_1. Cette transition serait évaluée à 2. Ensuite, un nouveau niveau y' peut être évalué de sorte que la transition entre y et y'serait équivalente à celle entre x_0 à x_1. 5. Normaliser les valeurs des transitions afin d'obtenir des scores entre 0 et 1.	+ La formulation des déclarations d'indifférence est plus facile que la méthode de bissection, puisque le décideur ne doit ajuster qu'une transition à la fois (Eisenführ et al., 2010)
Méthode de la bissection (en anglais, bisection method ou mid-value splitting technique)	Consiste à identifier, par des déclarations d'indifférence, le niveau d'attribut intermédiaire qui divise une transition en deux parties équivalentes en termes de préférence.	1. Définir les valeurs de l'attribut les plus favorables (x_1) et les moins favorables (x_0). La solution avec la meilleure conséquence est évaluée à 1 et celle avec la moins bonne conséquence est évaluée à 0. 2. Diviser la plage de valeurs x_1 à x_0 en deux, pour obtenir une première plage de valeurs de l'attribut x_1 à $x_{0,5}$ et une seconde de $x_{0,5}$ à x_0. Le niveau de l'attribut $x_{0,5}$ est évalué à 0,5. 3. Chercher la valeur de l'attribut pour laquelle une transition entre x_1 et $x_{0,5}$ serait équivalente à une transition entre $x_{0,5}$ et x_0. 4. De manière similaire, chercher les valeurs de l'attribut correspondant à $x_{0,75}$, divisant la plage x_1 à $x_{0,5}$ en deux, et les valeurs de l'attribut correspondant à $x_{0,25}$, divisant la plage $x_{0,5}$ à x_0 en deux.	+ Fournit des résultats plus fiables que d'autres méthodes, telles que la notation directe (Schuwirth et al., 2012)

2.3.2.2 Inter-objectifs : Les poids relatifs des objectifs (w_i)

Les préférences des décideurs peuvent être modélisées par des facteurs de pondération normalisés, attribués aux différents objectifs de la décision. Obtenir ces préférences sous forme de poids est l'une des étapes principales en aide à la décision multicritère (ADMC) (Aubert et al., 2020; Eisenführ et al., 2010; Keeney & Raiffa, 1976). Cette étape est primordiale puisqu'elle permet de traduire le niveau d'importance relative et de pertinence des objectifs (Németh et al., 2019). Un poids plus élevé indique une importance accrue de l'objectif dans les processus d'agrégation. La somme des poids de chacun des objectifs équivaut à un.

L'expression des préférences est exigeante sur le plan cognitif et sujette à des biais. Plusieurs méthodes de pondération en ADMC existent afin de supporter les décideurs dans cette tâche. Le choix de la méthode de pondération employée est important puisqu'elle peut avoir impact sur les préférences déterminées (Lienert et al., 2016). Les poids peuvent être déterminés par des méthodes de pondération *subjectives*, basées sur l'opinion des décideurs, *objectives*, basées sur de l'information dérivée du modèle étudié, ou *intégrée*, jumelant la subjectivité et l'objectivité (Odu, 2019). En contexte SIG-ADMC, la majorité des études utilisent des méthodes subjectives, avec la comparaison par paires étant la plus populaire (Boroushaki, 2017; Malczewski, 2006). Des poids basés sur l'entropie des données, sur l'écart-type ou la méthode du point idéal (en anglais, *Ideal Point method*) sont des exemples de méthodes objectives (Odu, 2019). Sous l'approche MAVT, on retrouve des méthodes de pondération telles que la notation directe, la comparaison par paires, la méthode swing ou les techniques de pondération des compromis, qui existent pour faciliter ce processus. Le Tableau 2.3 présente les méthodes de pondération subjectives les plus populaires en ADMC, basé sur la recension de Odu (2019), Riabacke et al. (2012b) et Eisenführ et al. (2010). Une revue non exhaustive d'études existantes sur les préférences et perceptions des parties prenantes en relation avec les IVB est présentée au Tableau 2.3, mettant en évidence le type de méthode de pondération utilisée et le format d'obtention des préférences.

Tableau 2.3 Méthodes de pondération les plus utilisées selon le classement de Riabacke et al. (2012b)

Classe de méthodes	Description de la classe	Méthode de pondération	Description la méthode de pondération	Avantages (+) et inconvénients (-)
Techniques d'attribution de ratios (en anglais, *ratio assignement techniques*)	Un score est attribué à chaque objectif, indiquant soit son niveau d'importance absolu vis-à-vis d'un point de référence spécifique, soit son importance relative par rapport aux autres attributs évalués (Ezell et al., 2021). Ces méthodes ont en commun la normalisation des poids à 1.	Notation directe (en anglais, *direct rating*)	Attribution directe des poids à chaque objectif entre 0 et 100.	+ Plus simple des méthodes (utilisée souvent en pratique) - Produit des poids moins fiables que d'autres méthodes plus sophistiquées (Eisenführ et al., 2010)
		Allocation des points (en anglais, *point allocation*)	Distribution d'un total de 100 points parmi les objectifs.	- Suivre le nombre de points restants entre les attributions de points alourdi le processus - Les poids seraient moins fiables que la méthode de notation directe (Riabacke et al., 2012b)
		La technique de classement multi-attributs simple (SMART)	Attribution des poids en fonction d'un ordre de préférences, en spécifiant l'objectif le moins important et en pondérant les critères restants de manière relative.	- Sujet aux inconsistances. La pondération peut différer significativement d'une fois à l'autre, puisqu'aucune limite supérieure d'attribution des poids n'est fixée (Riabacke et al., 2012b)
		Méthode swing	Attribution des poids en fonction d'un gain perçu du passage d'un objectif de son pire niveau à son meilleur niveau.	+ Intègre explicitement les plages d'attributs, réduisant ainsi certains biais cognitifs.
		Méthode des compromis (en anglais, *trade-off*)	Comparaison par paires à l'aide de deux solutions hypothétiques où des compromis explicites doivent être faits sur l'amélioration ou la réduction de la performance d'une solution.	- Plus complexe sur le plan opérationnel et plus exigeant cognitivement en raison du grand nombre de comparaisons par paires. - Sujet à mener à l'attribution de poids plus élevés aux objectifs prioritaires comparativement à swing. (Riabacke et al., 2012b)
Techniques approximatives (en anglais, *approximate techniques*)	Obtention des préférences de manière imprécise par des classements, des catégories sémantiques ou l'évaluation d'intervalles	Méthodes d'ordre de rang	Classement des objectifs par des valeurs ordinales, ensuite traduites en points.	+ Le classement allège l'effort cognitif requis par les décideurs. - Ne permet pas de capturer l'importance de différence entre deux objectifs. - Les différences de poids traduites des classements ne reflètent pas nécessairement la pensée du décideur (Riabacke et al., 2012b)
		Comparaison par paires (AHP)	Comparaisons par paires d'objectifs, où un objectif est évalué par rapport à un autre par une échelle sémantique (par exemple, «beaucoup plus important »).	- Imprécision dans la conversion et l'interprétation de l'échelle sémantique à l'échelle numérique. Les termes peuvent avoir une signification différente d'un décideur à l'autre. - Devient rapidement lourde dans des contextes complexes avec de nombreux objectifs (Riabacke et al., 2012b)
		Intervalles de valeurs	Présentation d'une plage de valeurs en intervalles et utilisation d'une méthode tierce comme la méthode des compromis ou la notation directe.	+ Moins demandant pour les décideurs. - Produit des intervalles et non des poids précis (Riabacke et al., 2012b)

Tableau 2.4 Vue d'ensemble des études existantes sur les préférences et perceptions des parties prenantes en relation avec les IVB

Sujet des préférences ou perceptions collectées		**Participation de parties prenantes**	**Préférences pondérées**	**Méthode**	**Format**	**Références**
Perspectives citoyennes sur les différentes dimensions des IVB pour atténuer les impacts des changements climatiques	Types d'IVB et connaissances sur leurs bénéfices et les impacts climatiques	Oui	Non	Choix d'options et classement	Sondages en présentiel (n=200)	(Derkzen et al., 2017)
	Rôles des IVB	Oui	Non	Questions qualitatives	Sondages Google Docs et entrevues en présentiel (n=500)	Sturiale et al. (2023)
Préférences et perceptions du type et du design des IVB dans les paysages de rue urbains	Services écosystémiques fournis par les accotements routiers urbains	Oui	Non	Questions qualitatives	Entrevues semi-dirigées en présentiel et échelles de Likert (n=30)	Ligtermoet et al. (2022)
	Types et conceptions d'IVB	Oui	Non	Questions qualitatives	Sondage en ligne et huit groupes de discussion (n=339)	Phillips et al. (2023)
	Influence des éléments naturels à petite échelle dans les rues résidentielles et leur configuration	Oui	Non	Questions qualitatives, tâche de choix et tâche d'évaluation	Sondage en ligne (n=4 956)	Van Dongen and Timmermans (2019)
Préférences en matière de sélection des types d'IVB	Sélection d'IVB dans les zones industrielles	Oui	Oui	Pondérations par méthode Delphi avec la méthode swing	Ateliers en présentiel avec sondages et discussions	Jayasooriya et al. (2019)
	Types d'IVB dans différents sites urbains	Non	Oui	Comparaison par paires (AHP)	N/A	Orta-Ortiz and Geneletti (2023)
	Sélection des mesures IVB à différentes échelles	Oui	Oui	Évaluation directe en trois étapes	Questionnaires en ligne	Ruangpan et al. (2021)
Préférences en matière de priorités de planification des IVB	Zones prioritaires pour la mise en œuvre des IVB	Non	Oui	Pondérations directement appliquées par les auteurs (critères = 2)	N/A	Madureira and Andresen (2014)
	Valeurs des services écosystémiques urbains	Non	Oui	Pondérations basées sur les priorités actuelles en matière de politiques	N/A	Kremer et al. (2016)
	Priorités de planification pour un outil de planification spatiale des IVB	Oui	Oui	Comparaison par paires (AHP), évaluation et classement (critères = 6)	Rencontre en présentiel avec sondages (n=23)	(Meerow, 2019; Meerow & Newell, 2017)
		Non	Oui	Pondérations égales, pondérations par entropie et pondérations directes (25 critères)	Pondérations d'experts issues d'un cabinet de planification	Kuller, Bach, et al. (2019)
	Identification des zones prioritaires pour les IVB à l'aide d'un modèle spatial détaillé à haute résolution	Non	Oui	Pondérations égales et pondérations basées sur la capacité des écosystèmes	N/A	Van Oorschot et al. (2021)

2.3.3 Fonction d'agrégation

La fonction d'agrégation rassemble les entrées d'un modèle en une seule valeur de sortie sur une même échelle (Haag et al., 2022b). Elle a pour objectif de combiner les préférences intra-objectifs (fonctions de valeurs et échelles de valeurs) et préférences inter-objectifs (pondérations) afin de faciliter la comparaison entre les objectifs et générer un score numérique global pour chaque solution. Lorsque le problème décisionnel est structuré sous forme de hiérarchie d'objectifs, l'agrégation est réalisée progressivement à chacun des niveaux, par branche afin d'obtenir un score global agrégé pour chacun des sous-objectifs (Haag et al., 2022b). Les objectifs principaux (niveau supérieur) sont décomposés en sous-objectifs (niveau inférieur) où les échelles de valeurs individuelles des attributs mesurant les objectifs peuvent être agrégées par la fonction d'agrégation (Langhans et al., 2014).

La fonction d'agrégation la plus couramment utilisée dans le cadre de la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT) est le *la moyenne arithmétique pondérée avec agrégation additive* (Belton & Stewart, 2002; Haag et al., 2022b). La deuxième approche fréquemment utilisée est la méthode d'*agrégation par le minimum* (aussi appelée, «tout ou rien») (Langhans et al., 2014). Le Tableau 2.5 présente les règles d'agrégation communes en ADMC. Il existe des variantes de ces méthodes d'agrégation. L'idée sous-jacente à l'hypothèse de l'*additivité* est que la performance de chaque solution peut être mesurée, avec la solution ayant le score global le plus élevé étant considérée comme le meilleur choix (Triantaphyllou & Baig, 2005). Le concept d'*additivité* en ADMC signifie que le score global peut être obtenu en additionnant les contributions individuelles des différents objectifs. Un modèle complètement *additif* est celui où le score global est la somme des performances de chaque objectif, pondéré, mais sans interaction entre eux. Dans les modèles complètement additifs, *l'indépendance préférentielle* est assumée, c'est-à-dire que l'évaluation d'un objectif ne dépend pas de la performance d'un autre objectif, d'où la possibilité d'additionner leurs performances individuelles. Chaque objectif est évalué indépendamment et la valeur totale est la somme de ces évaluations individuelles. Une faible performance sur un objectif peut être équilibrée par une performance élevée sur un autre, selon l'importance relative des poids attribués. Si les poids ne sont pas égaux, une diminution de la performance sur un objectif à forte pondération nécessite une amélioration plus importante sur un objectif moins pondéré pour être compensé. Un modèle *non-additif* prend en compte les interactions entre les objectifs, de sorte que les changements sur

un objectif peuvent influencer la performance d'un autre objectif. L'avantage des modèles additifs est leur simplicité. Cependant, cette méthode ne reflète pas toujours avec précision les préférences des parties prenantes et certaines hypothèses sous-jacentes ne sont pas toujours acceptées dans la pratique (Haag et al., 2022b). Les types de fonctions d'agrégation permettent de modéliser différents types d'interactions entre les objectifs (Haag et al., 2022b).

Tableau 2.5 Règles d'agrégation communes en ADMC

Fonction d'agrégation	**Paramètres à déterminer**	**Description**	**Caractéristique particulière**
Agrégation additive avec moyenne arithmétique pondérée (en anglais, *simple additive value model or weighted arithmetic mean*)	● Poids (w_i) ● Échelles de valeurs (v_i)	La règle d'agrégation la plus utilisée est le *modèle simple de valeur additive* (en anglais, *simple additive value model*), où le score final d'une solution est obtenu par la moyenne pondérée de la valeur des attributs (Eisenführ et al., 2010; Zheng & Lienert, 2018): $V(A) = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot v_i(a)$ (2.1) Où $V(A)$ est le score final (entre 0 et 1), $v_i(a)$ est l'échelle de valeur normalisée entre 0 et 1 qui représente le degré de performance de la solution pour l'objectif i, et w_i est le poids de l'objectif *i*.	Sujet à masquer la faible performance d'un objectif par d'autres objectifs ayant une meilleure performance (compensation), pouvant conduire à ignorer des impacts spécifiques qui, en réalité, nécessiteraient des actions correctives (Langhans et al., 2014).
Agrégation minimale (en anglais, *one-out, all-out method*)	● Échelles de valeurs (v_i)	L'*agrégation minimale* reflète le pire objectif, puisqu'elle consiste à déterminer la valeur minimale du score des objectifs individuels pour obtenir le score final (Langhans & Lienert, 2016a): $V(A) = \min[v_1(a), v_2(a), \ldots, v_n(a)]$ (2.2)	● Sujet au biais pessimiste, c'est-à-dire que la fonction peut mener à une évaluation plus pessimiste des solutions qu'en réalité; ● Aucune compensation n'est possible. (Langhans et al., 2014)
Moyenne géométrique pondérée	● Poids (w_i) ● Échelles de valeurs (v_i)	L'agrégation par la moyenne pondérée géométrique (Langhans et al., 2014) : $V(A) = \prod_{i=1}^{n} v_i(a_i)^{w_i}$ (2.3) Une variante à cette règle d'agrégation est la moyenne géométrique pondérée avec décalage (en anglais, *multiplicative aggregation* ou *weighted geometric mean with offset*) (Haag, Lienert, et al., 2019) qui introduit un décalage pour éviter que le score global ne soit 0 lorsqu'un des éléments est 0 : $V(A) = (\prod_{i=1}^{n}(v_i(a) + \delta)^{w_i}) - \delta$, où $\delta \in \mathbb{R} \geq 0$	Sujet à entraîner une grande variation des scores globaux lorsqu'il y a de faibles changements dans les performances des objectifs (Langhans et al., 2014).
Moyenne harmonique pondérée (en anglais, *weighted harmonic mean*)	● Poids (w_i) ● Échelles de valeurs (v_i)	La moyenne harmonique pondérée est l'une des méthodes les plus importantes, mais elle est toute de même rarement utilisée par exemple dans les évaluations écologiques (Langhans et al., 2014) : $V(A) = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{w_i}{v_i(a_i)}} & si\ tous\ les\ v_i(a_i) > 0 \\ 0 & si\ un\ v_i(a_i) = 0 \end{cases}$ (2.4)	● Si les pondérations sont égales, la version pondérée revient exactement à la moyenne harmonique non pondérée ● Particulièrement sensible aux valeurs proches de zéro (Langhans et al., 2014).

Tableau 2.5 Règles d'agrégation communes en ADMC (suite)

Fonction d'agrégation	Paramètres à déterminer	Description	Caractéristique particulière
Puissance moyenne pondérée (en anglais, *weighted power mean*)	● Poids (w_i) ● Échelles de valeurs (v_i) ● Constante d'échelle additive (γ)	La puissance moyenne pondérée introduit le paramètre de non-additivité permettant de modifier le degré d'additivité (Haag, Lienert, et al., 2019) : $V(A_i) = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^{n} w_i v_i(\mathrm{a})^{\gamma}\right)^{\frac{1}{\gamma}} & pour \quad \gamma \neq 0 \\ \prod_{i=1}^{n} v_i(a_i)^{w_i} & pour \quad \gamma = 0 \\ \min(v) & pour \quad \gamma = -\infty \\ \max(v) & pour\ \gamma = \infty \end{cases}$ (2.5) Où pour $\gamma = 1$ on est dans un cas de modèle additif (Haag, Lienert, et al., 2019).	Un mauvais choix du paramètre d'additivité pourrait biaiser les résultats et mener à des résultats trop compensatoires ou pas assez compensatoires.

2.3.4 Analyses d'incertitude et de sensibilité

Dans les modèles SIG-ADMC, les incertitudes proviennent de multiples sources, telles que le type et la structure du modèle, la sélection et les valeurs des paramètres comme les poids des critères, les fonctions d'agrégation, les échelles de valeurs standardisées ainsi que la qualité et la calibration des données, souvent liées à des hypothèses (Chen, J.Yu, et al., 2010; Malczewski & Jankowski, 2020; Saltelli et al., 2019; Scholten et al., 2015). Du point de vue de l'ADMC, les incertitudes peuvent être classées en trois catégories selon leur origine : (i) les incertitudes liées aux données, qui concernent les données d'entrée utilisées dans un modèle, (ii) les incertitudes préférentielles, associées aux paramètres de préférence et (iii) les incertitudes du modèle, découlant des simplifications ou approximations de la réalité dans la représentation du modèle (Bertsch & Fichtner, 2016). Le terme *incertitude* peut être défini comme les «lacunes de connaissances ou ambiguïtés qui influencent notre capacité à comprendre les conséquences des décisions» [traduction libre] (Gregory et al., 2012; Scholten et al., 2015).

Pour mieux comprendre ces incertitudes et leurs impacts sur les résultats des modèles, deux approches principales bien établies sont utilisées : l'analyse d'incertitude (AI) et l'analyse de sensibilité (AS). Ces analyses, de plus en plus recommandées, sont même considérées comme essentielles pour évaluer la stabilité des modèles et déterminer la fiabilité de leurs résultats (Lilburne & Tarantola, 2009b; Şalap-Ayça et al., 2021a). Elles se révèlent particulièrement utiles

pour identifier les paramètres critiques influençant la variabilité des résultats et pour définir des priorités permettant de simplifier ou de mettre à jour le modèle en repérant, par exemple, les paramètres exerçant une influence moindre (Jeon- Young Kang et al., 2022; Lilburne & Tarantola, 2009b).

2.3.4.1 Types d'analyses

L'**analyse d'incertitude (AI)** permet de quantifier la variabilité des sorties en fonction des incertitudes des entrées (Feizizadeh et al., 2014b; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a; Scholten et al., 2015). Elle est qualifiée d'approche « prospective », car elle évalue comment l'incertitude des paramètres d'entrée se propage à travers le modèle et affecte ses résultats (Malczewski & Jankowski, 2020). Cette approche implique souvent de répéter plusieurs fois les exécutions du modèle en utilisant différentes valeurs des entrées dans un certain intervalle (Saltelli et al., 2019). Elle fournit des statistiques descriptives sur le modèle (écart-type, moyenne, min, max, etc.), ainsi qu'une distribution probabiliste des résultats (Malczewski & Jankowski, 2020). La simulation est la méthode la plus appropriée pour analyser la propagation des incertitudes dans un modèle spatial (Feizizadeh et al., 2014b; Tenerelli & Carver, 2012) et la simulation Monte Carlo (SMC) est la plus largement utilisée (Feizizadeh et al., 2014b).

L'**analyse de sensibilité (AS)** permet d'étudier comment les incertitudes des résultats peuvent être attribuées quantitativement à différentes sources d'incertitudes des entrées (Feizizadeh et al., 2014b; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a; Saltelli, 2002; Scholten et al., 2015). Elle est ainsi qualifiée d'approche « rétrospective », car elle évalue quels paramètres sont les plus responsables de la variabilité des résultats du modèle et quelle part chaque incertitude des entrées contribue aux incertitudes des résultats (Malczewski & Jankowski, 2020). L'analyse de sensibilité peut être divisée en deux approches : l'**analyse de sensibilité locale (ASL)** et l'**analyse de sensibilité globale (ASG)**.

L'**analyse de sensibilité locale (ASL)** inclut souvent la variation d'un seul paramètre d'entrée à la fois (Aidinidou et al., 2022; Cartwright et al., 2022; Chen, J.Yu, et al., 2010; de Brito et al., 2019a; Fildes et al., 2022b; Romanoa et al., 2015; Saltelli et al., 2019), d'où le nom de la méthode la plus populaire « One-At-A-Time (OAT) » (Daniel, 1958). Lorsqu'une AS est réalisée, l'ASL est la plus courante (Scholten et al., 2015), avec la méthode OAT la plus utilisée en contexte SIG-ADMC (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a; Saltelli, 2004). Elle examine comment les résultats

varient avec de petits changements d'une seule entrée à la fois, tandis que toutes les autres sont fixées (de Brito et al., 2019a; Saltelli et al., 2019). Elle suppose une linéarisation du modèle, ce qui n'est pas toujours valide (Scholten et al., 2015). L'ASL explore l'espace des entrées en se déplaçant sur un plan unidimensionnel, mais il est fortement recommandé d'explorer les incertitudes de manière multidimensionnelle pour éviter de manquer d'éventuelles interactions entre les entrées (Saltelli et al., 2019).

L'**analyse de sensibilité globale (ASG)**, en revanche, permet d'explorer l'ensemble de l'espace des entrées, défini comme « l'ensemble de toutes les combinaisons possibles des facteurs d'entrée » [traduction libre] (Saltelli et al., 2019). Elle examine comment les variations des résultats sont attribuées à plusieurs sources d'incertitudes et aux relations entre les paramètres (de Brito et al., 2019a; Feizizadeh et al., 2014b). Il existe plusieurs types de méthodes d'ASG, tels que l'approche des effets élémentaires de Morris (Morris, 1991), les méthodes indépendantes du moment (Da Veiga & Martins, 2015), les approches basées sur les variogrammes (Razavi & Gupta, 2019), technique FAST étendue (Crosetto & Tarantola, 2001) et la décomposition de la variance (Saltelli et al., 2010a). Malgré la reconnaissance de l'importance de procéder à des AI et AS, les modèles sont rarement évalués par des ASG. Le faible recours aux ASG pourrait s'expliquer par le manque d'applications dans divers domaines et par la confusion méthodologique présente dans certains articles de référence, pourtant largement cités, où les bonnes pratiques sont parfois mal interprétées (Saltelli et al., 2019). Cependant, les ASG gagnent en popularité pour les modèles plus complexes, car elles permettent d'évaluer à la fois l'effet principal de chaque entrée et les interactions entre elles (Şalap-Ayça et al., 2021a).

Pour plus de détails, l'Annexe A.3 présente un résumé de l'AI et de l'AS, incluant leur description, des exemples de méthodes, les résultats possibles, ainsi que leurs avantages et limites.

2.3.4.2 Décomposition de la variance (méthode ASG)

Une des méthodes les plus appropriées et efficaces pour l'ASG est la décomposition de la variance (Feizizadeh et al., 2014b; Malczewski & Jankowski, 2020; Puy, Becker, et al., 2022; Saltelli, 2004). Cette méthode est particulièrement adaptée à la prise en compte des interactions entre les paramètres (Puy, Becker, et al., 2022; Saltelli et al., 2010a). La décomposition de la variance des sorties est une méthode indépendante du modèle (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a), ce qui explique pourquoi elle est largement recommandée dans la littérature (Puy, Becker, et al., 2022;

Saltelli et al., 2019). L'objectif est de décomposer la variance (c.-à-d., la mesure de la dispersion des valeurs autour de la moyenne) des résultats du modèle en fractions attribuées à chaque entrée ou à des ensembles d'entrées, ainsi qu'aux interactions entre elles. Par exemple, cette méthode permet d'identifier que 70 % de la variance des résultats est causée par la variance de la première entrée, 20 % par la seconde et 10 % par les interactions entre ces deux entrées (Saltelli et al., 2008).

Les méthodes basées sur la variance permettent de calculer des indices de sensibilité, tels que l'**indice de sensibilité de premier ordre (S)** et l'**indice de sensibilité des effets totaux (ST)**. L'**indice S** permet d'identifier les paramètres d'entrée les plus influents qui, s'ils étaient fixés indépendamment, réduiraient la majorité de la variance des résultats du modèle (Saltelli et al., 2008). Les paramètres d'entrée recevant les valeurs d'indice S les plus élevées ont le plus grand impact sur la variabilité des sorties. L'**indice S_T** indique les effets d'interaction entre un paramètre d'entrée donnée et d'autres paramètres d'entrée (Şalap-Ayça et al., 2021a). L'Annexe A.4 fournit davantage de détails sur la décomposition de la variance et le calcul des indices.

La décomposition de la variance a déjà été utilisée dans la modélisation SIG (Feizizadeh et al., 2014b; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a), mais elle reste encore peu répandue et relativement récente dans la littérature (Malczewski & Jankowski, 2020). Cependant, ces méthodes offrent des caractéristiques intéressantes pour les cas de SIG-ADMC (Gómez-Delgado & Tarantola, 2006b). Elles permettent d'étudier l'ensemble de la distribution des paramètres, via une approche probabiliste, par exemple en utilisant des méthodes de simulations Monte Carlo (SMC) (Gómez-Delgado & Tarantola, 2006b). Les SMC permettent de propager simultanément les paramètres dans tout l'espace des entrées à l'aide d'un échantillonnage aléatoire répété par des fonctions de densité de probabilité (FDP) (Feizizadeh et al., 2014b). Plusieurs simulations et échantillons sont nécessaires pour assurer une couverture assez large de chaque paramètre d'entrée du modèle (Jeon- Young Kang et al., 2022). Les SMC sont souvent utilisés pour l'AI et l'ASG (Jeon- Young Kang et al., 2022) et constituent la méthode la plus directe pour calculer l'AS des effets totaux (indice S_T) (Puy, Becker, et al., 2022).

Les méthodes de calcul pour estimer les indices de sensibilité sont chacune associées à des méthodes d'échantillonnage (Lilburne & Tarantola, 2009b; Puy, Piano, et al., 2022), c'est-à-dire l'organisation des points d'échantillon des paramètres d'entrée à varier. Les algorithmes de génération aléatoire (par exemple, l'échantillonnage aléatoire simple) constituent les méthodes les

plus simples. Des méthodes d'échantillonnage plus raffinées comprennent l'échantillonnage par hypercube latin (LHS) (Mckay et al., 1979), les escaliers en spirale (en anglais, *winding stairs*) (Jansen et al., 1994), le test de sensibilité par amplitude de Fourier (FAST) (Cukier et al., 1978), la version étendue de FAST (Saltelli et al., 1999), les conceptions d'équilibre aléatoire (en anglais, *random balance designs*) (Tarantola et al., 2006) et la famille des suites quasi-aléatoires, telles que les suites de Sobol (Sobol, 1967). Lilburne and Tarantola (2009b) présentent les différentes techniques d'échantillonnage et leurs liens avec le choix des méthodes d'estimation des indices de sensibilité.

Sous la décomposition de la variance, la méthode de Sobol (Sobol, 1967) est reconnue comme l'une des plus puissantes et efficaces pour approximer les indices de sensibilité et échantillonner les points dans l'espace des entrées (Saltelli et al., 2010b; X.-Y. Zhang et al., 2015). Comparativement, la méthode FAST (Crosetto & Tarantola, 2001), présente une complexité de calcul plus élevée, notamment pour les indices de sensibilité d'ordre supérieur (S_T).

En contexte spatial, l'approche de Sobol offre des avantages significatifs : elle ne requiert aucune hypothèse sur le modèle, permet de calculer simultanément les indices d'ordre premier (S) et total (ST), explore entièrement l'espace des entrées et facilite l'analyse des échelles spatiales, de la structure et de l'autocorrélation (Lilburne & Tarantola, 2009b). Elle offre ainsi une meilleure performance que d'autres approches telles que OAT ou la méthode des effets élémentaires (Saint-Geours et al., 2012).

Les séquences de Sobol, largement utilisées, surpassent les méthodes d'échantillonnage aléatoire standard, stratifié ou LHS en offrant une distribution plus uniforme des points dans l'espace, évitant les regroupements et améliorant la couverture de l'espace des entrées (Burhenne et al., 2011; J.-Y. Kang et al., 2022; Lilburne & Tarantola, 2009b; Saltelli et al., 2010b). Ces séquences quasi-aléatoires, organisées selon une structure dite d'« échantillonnage radial » (Tarantola & Becker, 2016), permettent aussi un calcul plus précis de l'indice ST (Campolongo et al., 2011; Saltelli et al., 2010a). L'Annexe A.6 montre un exemple visuel d'un échantillon quasi-aléatoire de Sobol basé sur un échantillonnage radial.

Enfin, malgré un coût informatique légèrement supérieur à l'échantillonnage aléatoire, la méthode de Sobol demeure plus efficace que l'échantillonnage LHS et permet une convergence plus rapide des résultats grâce à ses propriétés quasi-Monte Carlo (Burhenne et al., 2011; Renardy et al., 2021).

2.3.4.3 Revue des AI et AS réalisées sur des modèles SIG-ADMC

Bien que l'importance des AI et AS soit largement reconnue, elles ne sont pas encore une pratique courante (Saltelli et al., 2019; Scholten et al., 2015). Une évaluation solide du modèle devrait inclure de manière complémentaire l'AI et l'AS (Chen, Yu, et al., 2010; Malczewski & Jankowski, 2020; Saltelli et al., 2019). Cependant, bien qu'elles soient deux approches distinctes, elles peuvent souvent utiliser le même ensemble d'exécutions du modèle (Feizizadeh et al., 2014b). L'AI estime d'abord les incertitudes, puis ensuite l'AS les attribue aux différentes entrées (Saltelli et al., 2019).

Dans un contexte spatial, leur utilisation est encore plus rare, se limitant souvent à des approches rudimentaires ou étant simplement absente (Chen, J.Yu, et al., 2010; de Brito et al., 2019a; Delgado & Sendra, 2004; Lilburne & Tarantola, 2009b; Xu & Zhang, 2013). De nombreux modèles SIG-ADMC sont développés sans prendre en compte les incertitudes des paramètres, souvent en raison de la complexité inhérente à l'application des méthodes d'AI et d'AS aux modèles spatiaux (Lilburne & Tarantola, 2009b; Plata-Rocha et al., 2012a). La dimension spatiale introduit des difficultés supplémentaires en raison du grand nombre de pixels sur les cartes, de l'hétérogénéité des données d'entrée, des plages d'incertitude associées à chaque pixel, de l'éventuelle autocorrélation entre les données et du manque d'outils SIG adaptés à ces analyses (de Brito et al., 2019a; Delgado & Sendra, 2004; Ferretti & Montibeller, 2016; Lilburne & Tarantola, 2009b). De plus, comme les paramètres des modèles SIG-ADMC proviennent souvent de données issues de sources variées, cela rend leur incertitude encore plus difficile à quantifier (Feizizadeh et al., 2014b). L'un des principaux défis de l'AS spatiale réside aussi dans la visualisation des dynamiques de changement spatial (Chen, J.Yu, et al., 2010). Pourtant, il est essentiel de représenter ces incertitudes de manière géographique (Plata-Rocha et al., 2012a). Quelle que soit la méthode utilisée pour effectuer une AS en contexte SIG-ADMC, elle devrait être explicitement spatiale (de Brito et al., 2019a; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a). Cependant, peu d'études ont adopté cette approche (de Brito et al., 2019a). Une AS explicitement spatiale consiste à prendre en compte les connexions et les schémas spatiaux dans les données, y compris les emplacements précis et la configuration des éléments dans l'espace géographique. Malgré ces défis, l'AS en contexte spatial émerge comme un axe de recherche prometteur depuis la dernière décennie (Malczewski & Jankowski, 2020; Şalap-Ayça, 2022).

Les bénéfices de l'ASG sont particulièrement pertinents lorsque les SIG sont impliqués dans le modèle, car les entrées dans des problèmes spatialement hétérogènes pouvant être autocorrélées ou pouvant co-varier localement (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a). Elle a été appliquée dans les dernières années dans le cadre de la prise de décision spatiale (Abily et al., 2016b; Delgado & Sendra, 2004; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a; Ligmann-Zielinska & Sun, 2010; Marrel et al., 2011; Moreau et al., 2013; Plata-Rocha et al., 2012a; Şalap-Ayça et al., 2021a; Xu & Zhang, 2013).

Les préférences intra- et inter-objectifs étant des mesures subjectives, elles comporteront inévitablement une part d'incertitude malgré l'utilisation d'une méthode adéquate (Odu, 2019). En raison de la subjectivité des préférences inter-objectifs des décideurs (c.-à-d., les poids des objectifs) dans le processus de pondération des objectifs en ADMC, ce paramètre est souvent considéré comme la principale source d'incertitude (Chen, J.Yu, et al., 2010; Haag et al., 2022b). Cependant, il ne suffit pas de se limiter aux incertitudes liées aux pondérations des objectifs (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a). Les préférences intra-objectifs (c.-à-d., échelles de valeurs des objectifs) utilisées pour standardiser les objectifs sur une échelle commune devraient également être prises en compte pour une AI et une AS intégrée plus complète (de Brito et al., 2019a; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a; Plata-Rocha et al., 2012a).

Dans la littérature, aucune étude SIG-ADMC réalisant une AS n'a été trouvée sur la variation de paramètres d'entrée liés au type de fonction d'agrégation et aux préférences intra-objectif (échelles de valeurs). Dans un contexte ADMC non-spatial, quatre études ont été identifiées (voir Tableau), pour leur variation de ces paramètres (Bertsch & Fichtner, 2016; Haag et al., 2022b; Lahdelma & Salminen, 2012; Scholten et al., 2015). Pour la variation des échelles de valeurs, elles se sont toutes basées sur la représentation à un paramètre pour les fonctions de valeur exponentielles afin de varier la forme de l'échelle (Kirkwood, 1997). Pour plus de détails sur les caractéristiques (type d'analyse, paramètres d'entrée variés, méthode d'AS utilisée et caractéristiques de l'échantillonnage des points), voir l'Annexe A.5.

Le Tableau 2.6 présente une revue non exhaustive de 21 études SIG-ADMC ayant réalisées des AI et AS, permettant de voir que:

(1) la majorité des AS de modèles SIG-ADMC sont de type *local* (14 sur 21) vs de type *global* (7 sur 21);

(2) rarement une AI est réalisée conjointement aux AS (6 sur 21);

(3) la majorité des AI et AS est basée sur la variation des poids des critères (19 sur 21) et rarement sur d'autres paramètres d'entrée (2 sur 21 basées sur les jeux de données);

(4) la majorité des études utilisent des poids des critères qui découlent de la méthode de comparaison par paires (16 sur 21) combinée à la méthode d'agrégation AHP (6), à la combinaison linéaire pondérée (5) ou à la moyenne pondérée ordonnée (5).

Tableau 2.6 Revue d'études ayant réalisées des analyses d'incertitude (AI) et de sensibilité (AS) pour un modèle SIG-ADMC

Référence	Type de modèle SIG-ADMC	Objectif de l'analyse	Type d'analyse	Paramètres d'entrée variés	Méthode d'agrégation	Méthode de pondération	Méthode d'AS	Résultats	
								Spatial ou non-spatial	Type
(Rafiquee & Shabbiruddin, 2024)	Modèle pour la gestion municipale des déchets	• Robustesse du modèle • Effet des variations de pondération sur les résultats	AS:Locale	Poids des critères	Combinaison de FUZZY-TOPSIS	Nombres flous (TFN) (Ghose et al., 2022)	Scénarios de variation des poids	Non-spatial	Graphique des poids en fonction du score résultant
(Marzouk & Azab, 2024)	Modèle pour les zones côtières vulnérables aux impacts du changement climatique	• Identifier le paramètre le plus sensible	AS:Locale	Poids des critères	AHP	Comparaison par paires (AHP)	Six scénarios de variation des poids	Non-spatial	Qualitatif
(Sehrawat & Shekhar, 2024)	Modèle pour l'identification d'un emplacement approprié pour le développement d'IVB	• Effet des variations de pondération sur les résultats	AS:Locale	Poids des critères	Combinaison linéaire pondérée (WLC)	Comparaison par paires (AHP)	Cinq scénarios	Spatial	• Cartes adjacentes des scénarios de variation des poids
(Aidinidou et al., 2023)	Modèle pour les risques d'inondations urbaines	• Incertitude dans la hiérarchie des critères • Robustesse du modèle • Schéma spatial de la sensibilité	AS:Locale	Poids des critères	AHP	Comparaison par paires (AHP)	*One-At-a-Time (OAT)*	Spatial	• Graphique du changement du nombre de pixels dans chaque catégorie de risque • Cartes adjacentes de scénarios de variations de poids
(Rane et al., 2023)	Modèle pour la localisation d'un établissement urbain	• Identifier le paramètre le plus sensible	AS:Locale	Jeux de données	Équation d'agrégation personnalisée	Poids calculés de manière personnalisée	Suppression de carte (*map removal*) (Lodwick et al., 1990)	Non-spatial	Tableaux des indices de sensibilité et du nombre de pixels dans chaque classe
(Membele et al., 2024)	Modèle de cartographie de vulnérabilité aux inondations	• Robustesse du modèle	AS:Locale	Poids des critères	Combinaison linéaire pondérée (WLC)	Comparaison par paires (ANP)	• Scénarios de variation de poids et des indicateurs.	Spatial	Cartes de scénarios
(Campos et al., 2023)	Modèle sur la vulnérabilité environnementale	•Effet des paramètres simultanément sur le modèle	AS:Globale	Poids des critères	Combinaison linéaire pondérée (WLC)	Comparaison par paires (AHP)	Décomposition de la variance avec Sobol	Non-spatial	Graphique à bandes montrant les indices de sensibilité par paramètre
(Soliman et al., 2022)	Modèle pour l'installation d'un système de Recharge Artificielle des Nappes (MAR) dans l'aquifère	• Incertitude dans la hiérarchie des critères et dans l'affectation des préférences • Robustesse du modèle	AS:Locale	Poids des critères	Moyenne pondérée ordonnée (OWA) (Yager, 1988)	Comparaison par paires (AHP)	Six scénarios de variation d'un facteur de pondération α	Spatial	Carte colorée des proportions de la surface indiquant des zones de différents potentiels.

Tableau 2.6 Revue d'études ayant réalisées des analyses d'incertitude (AI) et de sensibilité (AS) pour un modèle SIG-ADMC (suite)

Référence	Type de modèle SIG-ADMC	Objectif de l'analyse	Type d'analyse	Paramètres d'entrée variés	Méthode d'agrégation	Méthode de pondération	Méthode d'AS	Résultats	
								Spatial ou non-spatial	Type
(Fildes et al., 2022a)	Modèle des zones potentielles d'eau souterraine	• Effet des variations de poids sur les résultats	•AS:Locale • AI	Poids des critères	AHP	Comparaison par paires (AHP)	*One-At-a-Time (OAT)*	Spatial	• Graphique de la variation des poids vs cellules inchangées • Carte de changement de classes • Cartes des statistiques (écart-type)
(Anteneh et al., 2022)	Modèle pour les zones de potentiel (développement et la gestion future) des eaux souterraines	• Effet des jeux de données sur les résultats • Pertinence des critères d'entrée	AS:Locale	• Poids des critères • Jeux de données	AHP	Comparaison par paires (AHP)	• Suppression de carte (*map removal*) (Lodwick et al., 1990)	Non-spatial	• Indice de variation (%) par couche enlevée • Poids effectifs (%) vs poids empiriques (%)
(Cartwright et al., 2022)	Modèle pour le potentiel d'érosion et la priorisation de la gestion de bassins versants	• Identifier les zones d'alignement ou de similarité dans le potentiel d'érosion à travers le bassin versant	AS:Locale	Poids des critères	AHP	Comparaison par paires (AHP)	• *One-At-a-Time (OAT)* • Comparaison des différences spatiales avec le modèle initial	Non-spatial	Statistiques descriptives et corrélation de Pearson
(Peñacoba-Antona et al., 2021b)	Modèle pour l'emplacement des zones humides construites pour le traitement des eaux usées	• Identifier le paramètre le plus sensible	AS:Globale	• Poids des critères • Jeux de données	Combinaison linéaire pondérée (WLC)	Comparaison par paires (AHP)	• Simulations Monte Carlo •Décomposition de la variance avec Sobol	Non-spatial	Tableau des indices de sensibilité par paramètre
(Hošková-Mayerová et al., 2020)	Modèle pour les activités de sauvetage et les activités militaires	• Effet des poids des critères sur les résultats • Dominance des critères individuels	AS:Locale	Poids des critères	*Weighted Overlay tool*	Comparaison par paires (AHP)	Comparer les différences de poids des différents critères	Non-spatial	Tableaux
(de Brito et al., 2019b)	Modèle de vulnérabilité aux inondations	• Identifier le paramètre le plus sensible • Pertinence des critères d'entrée • Identifier la limite de variation pour des résultats stables • Schéma spatial de la sensibilité	•AS:Locale • AI	Poids des critères	ANP (Saaty 2004, Saaty and Vargas 2013)	Comparaison par paires (ANP)	*One-At-a-Time (OAT)*	Spatial	• Cartes adjacentes (une par critère) •Tableaux de statistiques (moyenne, écart-type)
(Doorga et al., 2019)	Modèle pour le potentiel de sites de fermes solaires	•Comprendre l'influence des paramètres du modèle	AS:Locale	Poids des critères	Combinaison linéaire pondérée (WLC)	Comparaison par paires (AHP)	Approche AHP-AS (Chen et al., 13-17 July 2009)	Spatial	• Graphiques de l'adéquation en fonction du nombre de cellules •Cartes adjacentes de scénarios de variations des poids par critère

Tableau 2.6 Revue d'études ayant réalisées des analyses d'incertitude (AI) et de sensibilité (AS) pour un modèle SIG-ADMC (suite)

Référence	Type de modèle SIG-ADMC	Objectif de l'analyse	Type d'analyse	Paramètres d'entrée variés	Méthode d'agrégation	Méthode de pondération	Méthode d'AS	Résultats	
								Spatial ou non-spatial	Type
(Tang et al., 2018)	Modèle pour délimiter les zones inondables	• Robustesse du modèle	•AS:Globale • AI	Poids des critères	Moyenne pondérée ordonnée (OWA)	Comparaison par paires (AHP)	Décomposition de la variance avec Sobol	Spatial	• Carte des statistiques (écart-type, moyenne) • Cartes adjacentes des indices de sensibilité
(Feizizadeh & Kienberger, 2017)	Modèle pour l'évaluation de la vulnérabilité	• Identifier le paramètre le plus sensible	•AS:Globale • AI	Poids des critères	Moyenne pondérée ordonnée (OWA)	Comparaison par paires (AHP)	Décomposition de la variance avec Sobol	Non-spatial	Carte des statistiques
(Romano et al., 2015)	Modèle pour la sélection de zones appropriées pour l'aménagement du territoire	• Identifier le paramètre le plus sensible	AS:Locale	Poids des critères	•Combinaison linéaire pondérée (WLC) • Moyenne pondérée ordonnée (OWA)	Comparaison par paires (AHP)	*One-At-a-Time (OAT)*	Non-spatial	Graphiques de statistiques
(Feizizadeh et al., 2014a)	Modèle pour l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain	• Comparer deux méthodes ADMC • Effets de la variation des poids sur les résultats	•AS:Globale • AI	Poids des critères	• Moyenne pondérée ordonnée (OWA) • AHP	Comparaison par paires (AHP)	• Simulations Monte Carlo avec AHP conventionnel (AHP-SMC) •Décomposition de la variance avec Sobol	Spatial	• Carte des statistiques (rang minimum, rang maximal, écart-type, rang moyen) • Tableau des indices de sensibilité
(Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b)	Modèle pour l'évaluation de l'adéquation des terres	• Identifier le paramètre le plus sensible • Robustesse du modèle • Schéma spatial de la sensibilité	•AS:Globale • AI	Poids des critères	Fonction d'agrégation de points idéaux (IP)(Hwang & YoonYoon, 1981)	Échantillons de poids produits avec Sobol	• Simulations Monte Carlo •Décomposition de la variance avec Sobol	Spatial	• Carte des statistiques (moyenne, écart-type) • Cartes de sensibilité de 1er ordre (S) • Cartes de sensibilité de l'effet total (ST)
(Saint-Geours et al., 2012)	Modèle d'évaluation économique des risques d'inondation	• Robustesse du modèle	AS:Globale	• Jeux de données • Paramètres économiques	Agrégation personnalisée	Aucune	•Décomposition de la variance avec Sobol	Non-spatial	Graphiques

2.4 Les outils d'aide à la planification (OAP)

L'intérêt grandissant pour les outils d'aide à la planification (OAP) s'explique par les nombreux avantages qu'ils offrent pour la planification urbaine. Basés sur les systèmes d'information géographique (SIG), les OAP sont conçus pour appuyer diverses tâches des processus de planification, telles que la gestion des données, l'analyse de scénarios et l'amélioration de la communication (Geertman & Stillwell, 2013). Ces outils favorisent une approche interdisciplinaire et interactive en facilitant le dialogue entre les parties prenantes, l'intégration de données variées et la visualisation de scénarios de planification (Boroushaki et Malczewski, 2010; Jankowski et Nyerges, 2001 ; Ferretti et Montibeller, 2016). Leurs capacités de stockage, de traitement et d'organisation des données facilitent la résolution de problèmes spatiaux et l'intégration de connaissances variées essentielles à la planification territoriale (Wang & Zou, 2010).

Parmi ceux-ci, les outils intégrant l'analyse de décision multicritère (ADMC) se distinguent par leur capacité à réduire la complexité liée au choix des emplacements des IVB (Meerow & Newell, 2017). La combinaison SIG et ADMC suscite d'ailleurs un intérêt croissant dans le domaine de la planification des IVB (Bousquet et al., 2023; Malczewski & Jankowski, 2020). En aménagement du territoire, où la dimension spatiale est omniprésente, l'intégration des SIG à l'ADMC s'est largement imposée et continue de susciter un intérêt marqué en raison des avantages qu'elle procure (Biju et al., 2021; Dai et al., 2001; Joerin et al., 2001; Meerow & Newell, 2017).

Les **SIG** permettent d'analyser le territoire, de visualiser des interrelations entre des éléments, de générer des solutions et de les évaluer (Delgado & Sendra, 2004). La représentation spatiale qu'offrent les outils, par le biais de cartes, permet à une diversité de parties prenantes de prendre part aux décisions, pour une gouvernance de l'eau plus transparente et transversale. Les cartes sont considérées comme des objets frontières performants pour l'échange et la communication des connaissances entre les disciplines et auprès des citoyens (Star & Griesemer, 1989). La pertinence de résultats visuels, comme des cartes, a été soulevée par des parties prenantes couramment impliquées dans la planification des techniques de gestion des eaux pluviales puisqu'elles sont facilement compréhensibles par tous et constituent un moyen efficace de médiation entre et au sein des institutions (Kuller, Farrelly, et al., 2018).. Les outils basés sur les SIG offrent un avantage comparativement aux cartes papier en offrant des fonctionnalités visuelles et informatiques qui permettent d'alléger la charge cognitive et le traitement de l'information pour les décideurs (Jelokhani-Niaraki, 2021a). L'utilisation d'outils dans un processus de collaboration en atelier peut

également contribuer à surmonter certaines barrières culturelles en offrant un langage spatial qui véhicule des informations et des résultats neutres, comme l'ont observé McEvoy et al. (2019).
L'**ADMC** permet l'évaluation de solutions en considérant une variété de critères (Eisenführ et al., 2010). Les méthodes issues de l'ADMC permettent de décrire, de classer, d'évaluer et de choisir parmi plusieurs solutions à partir d'un ensemble de critères (Delgado & Sendra, 2004). Les décisions de nature environnementale se fondent sur des connaissances multidisciplinaires en faisant intervenir les domaines des sciences sociales, économiques, politiques, écologiques, environnementales et techniques (Kiker et al., 2005). L'ADMC s'avère ainsi une méthode pertinente afin de considérer les multiples critères qui interviennent et gérer stratégiquement les compromis qui en découlent. L'approche multicritère permet une analyse plus complète et systématique de solutions sur un territoire pour aboutir à des solutions fiables et durables de gestion intégrée de l'eau et de planification du territoire. Elle a aussi le potentiel de prendre en compte des critères dont les attributs sont évalués sur des échelles qualitatives et donc, d'intégrer des critères et objectifs plus difficilement quantifiables dans la prise de décision (Kiker et al., 2005).

2.4.1 Revue des OAP

Des méthodologies, des applications, des cadres de priorisation et des outils informatiques ont été développés au cours des dernières années pour soutenir la mise en œuvre des infrastructures vertes et bleues (IVB) à travers le monde (par exemple, Dagenais et al. (2013); Kuller et al. (2017); Kuller, Bach, et al. (2019); Meerow and Newell (2017); Bach et al. (2013)).

Toutefois, malgré un avancement dans la planification urbaine, peu d'outils intègrent à la fois la considération des SE, un ensemble complet de co-bénéfices, les priorités des parties prenantes et la variété de critères pertinents à considérer (Kuller et al., 2017; Meerow & Newell, 2017). Plusieurs d'entre eux se concentrent sur un seul objectif environnemental ou sur un nombre restreint d'objectifs, ou encore sur l'implantation d'un seul type de système.

Quelques revues de la littérature ont recensé ces approches existantes pour les IVB. Lerer et al. (2015) ont réalisé une revue des outils d'aide à la décision existants pour la planification des techniques urbaines sensibles à l'eau, en catégorisant les outils selon les types de questions auxquelles ils permettent de répondre : combien, où et laquelle. La catégorie «où», rassemble les outils permettant de guider les décideurs sur l'emplacement de ces systèmes.

Kuller et al. (2017) ont également recensé les outils existants de gestion urbaine de l'eau et ceux spécifiquement pour guider le choix de l'emplacement de ces infrastructures. Toutefois, Kuller et al. (2017) met en évidence le fait que les outils SIG-ADMC existants pour la gestion des eaux pluviales ont généralement un manque de complexité dans les critères considérés, ainsi que dans la méthodologie, malgré le fait que cette complexité soit reconnue comme cruciale.

Ferrans et al. (2022) ont analysé les systèmes d'aide à la décision destinés aux systèmes de drainage urbain durable en fonction de plusieurs aspects, notamment la question à laquelle ils répondent, l'échelle spatiale et le logiciel employé. Leur étude souligne que le développement de ces outils se concentre principalement dans quelques pays et ils mettent en évidence l'absence d'un cadre généralisable intégrant de manière équilibrée les dimensions environnementales et sociales. La diversité des outils développés dans le monde peut être expliquée selon eux par le manque de transférabilité de ces derniers, limitant ainsi leur adoption dans différents contextes.

Bousquet et al. (2023) ont fait la revue des approches d'ADMC les plus avancées pour la planification des solutions fondées sur la nature (SFN) et des espaces verts. Leur étude conclut que ces approches sont généralement basées sur une seule étude de cas et s'appuient sur l'expertise de parties prenantes impliquées généralement uniquement dans la phase de pondération des critères. Ces outils SIG couplés à l'ADMC, intègrent principalement la notation directe ou la méthode AHP comme méthode de pondération.

Le Tableau 2.7 présente une revue non exhaustive de cadres et outils SIG-ADMC pour la planification des IVB avec leurs caractéristiques générales et limites. Le Tableau 2.8 présente plus en détail les composantes des méthodologies et outils présentés au Tableau 2.7, telles que les caractéristiques des critères (nombre et source), le type de critères selon la catégorisation de Kuller et al. (2017), la méthode ADMC utilisée, l'inclusion de parties prenantes et la validation.

Tel que souligné par Bousquet et al. (2023), la majorité des études sur les OAP et la planification des IVB par l'ADMC ne se base sur que sur un seul cas d'étude (Tableau 2.7). De plus, peu d'outils dont développés et testés au Canada, et spécifiquement au Québec, pour supporter les décideurs en matière de planification des IVB de gestion des eaux pluviales. Dans la phase de définition du problème décisionnel, les critères sont souvent déterminés à partir de la littérature ou sélectionnés en fonction de la disponibilité des données, sans consultation des parties prenantes (Tableau 2.8). Les critères biophysiques sont bien représentés, avec une forte emphase sur les types de sols (7 sur

20 études), la topographie (10 sur 20 études), le climat (5 sur 20 études) et le tissu urbain, incluant l'empreinte des bâtiments et les infrastructures existantes (8 sur 20 études). En revanche, les critères sociodémographiques sont peu pris en compte. Les aspects de planification et de gouvernance sont bien intégrés, notamment l'utilisation des sols ou la disponibilité des terres, critère le plus fréquent (11 sur 20 études), ainsi que les opportunités de développement (6 sur 20 études). Certains outils intègrent les SE, en particulier les SE de régulation et culturels. Le drainage de l'eau (10 sur 20 études) et les îlots de chaleur (7 sur 20 études) figurent parmi les SE de régulation les plus considérés. La vulnérabilité de la population (9 sur 20 études) et l'accessibilité (9 sur 20 études) sont des critères récurrents. Les IVB existantes (6 sur 20 études) sont parfois prises en compte, mais les SE de support et liés à la biodiversité restent sous-représentés. Les SE de provision, quant à eux, sont absents des analyses. Enfin, bien que certains outils considèrent des critères liés aux coûts ou au fonctionnement des systèmes, ces aspects restent peu fréquents.

L'analyse des outils et approches étudiés révèle que la majorité d'entre eux (11 sur 20 études) ne prennent pas en compte un processus de pondération des critères tel qu'utilisé en ADMC. Parmi ceux qui intègrent une pondération, la méthode la plus courante est la comparaison par paires (4 sur 20 études), suivie de la notation directe (3 sur 20 études). L'agrégation des critères repose principalement sur AHP (2) et la Combinaison Linéaire Pondérée (WLC) (4 sur 20 études). L'implication des parties prenantes demeure limitée : seules quatre études les ont consultées, et uniquement dans le cadre de la pondération des critères. Enfin, l'évaluation de la robustesse des résultats reste marginale, avec seulement deux études ayant réalisé une analyse de sensibilité pour valider leur outil.

Tableau 2.7 Études SIG-ADMC pour la planification spatiale des IVB

« * » signifient que le cas d'étude est la ville de développement

Type d'outil	#	Outil	Fonction	Plateforme	Cas d'étude	Nombre et type d'IVB	Particularité
Cadres et méthodologies non automatisées	A	Norton et al. (2015)	Identifier les sites d'IVB à l'échelle du quartier, de la rue et mico-échelle pour le confort thermique des piétons	Non-automatisé	Melbourne, Australie*	4 : espaces verts ouverts, arbres d'ombre, toits verts et systèmes verts verticaux	● Spécifiquement pour le confort thermique ● Les sites visés sont les rues ● Démarche manuelle
	B	Kremer et al. (2016)	Cadre SIG-ADMC pour comparer les valeurs de cinq services écosystémiques fournis par des IV dans une aire d'étude	Non-automatisé	New York, États-Unis*	Inconnu	● Uniquement pour les services écosystémiques
	C	Dagenais et al. (2017)	Identifier des sites où les IVB apporteraient tous les bénéfices secondaires et réduiraient la vulnérabilité aux changements climatiques	Arbre de décision, non-automatisé	Beauport, Québec*	2 : biorétention/jardins de pluie et toits verts	● Démarche manuelle
	D	Yang and Zhang (2021)	Évaluer la performance de stratégies vertes et grises pour le développement d'un système de drainage urbain durable	Non-automatisé	Guangzhou, China*	Inconnu	● Cadre ADMC seulement
	E	Goodspeed et al. (2022)	Méthode SIG-ADMC pour identifier les zones adaptées aux IVB en tenant compte des avantages multiples	*ArcGIS Pro Suitability Modeler*	2 : Sud-est du Michigan, États-Unis*	IV en général	● Pas un outil
	F	Sehrawat and Shekhar (2024)	Cadre SIG-ADMC avec un processus de hiérarchie analytique pour identifier et cartographier les zones adéquates de développement d'IVB de la ville de Gurugram (Inde)	Superposition pondérée dans ArcGIS 10.3	Gurugram (Inde)	Inconnu	● Cadre ADMC seulement
Outil informatique SIG	G	FLEXT Jin et al. (2006)	Déterminer le type approprié de gestion optimale des eaux pluviales sur le territoire	Arbre de décision, non-automatisé Logiciel SIG *GeoMedia*	Chemnitz, Allemagne*	1 : noues avec infiltration	● Pas ADMC

Tableau 2.7 Études SIG-ADMC pour la planification spatiale des IVB (suite)

Type d'outil	**#**	**Outil**	**Fonction**	**Plateforme**	Cas d'étude	**Nombre et type d'IVB**	**Particularité**
Outil informatique SIG	H	SUDS Moore et al. (2012)	Aider à la sélection et la mise en œuvre des systèmes SUDS appropriés pour un site spécifique	*ArcView v9.3*	Londre, Royaume-Uni*	9 : déconnexion vers les puits de captage du jardin, déconnexion des pelouses, fosses d'arrosage, toits verts/bleus, surface perméable, déconnexion avec une surface perméable adjacente, rétention locale, infiltration de la rue en poche, rétention et adduction d'eau dans les noues	● Pour un site spécifique ● Pas ADMC
	I	EPA SUSTAIN Leea et al. (2012)	Outil d'aide à la décision pour évaluer les emplacements optimaux, le type et le coût des meilleures pratiques de gestion des eaux pluviales pour atteindre des objectifs de qualité et de quantité de l'eau	*ArcGIS 9.3 d'ESRI (extension Spatial Analyst)*	Kansas city, États-Unis*	5 : étangs, biorétentions, tranchées d'infiltration, noues de gazon et bandes filtrantes	● Module ArcGIS non autonome ● Pas ADMC
	J	UrbanBEATS Bach et al. (2015)	Cartographier la planification des IVB à toutes les échelles de planification (du lot à des villes et régions) et guider le choix des IVB approprié à chaque échelle	Autonome et automatisé	4 (Suisse)	6 : marais artificiels, étangs et bassins, noues, biorétention/jardins d'eau, systèmes d'infiltration et réservoirs d'eau de pluie	● Montre l'échelle d'implantation optimale pour une IVB, mais ne classe pas la performance des sites par rapport aux autres ● Pas ADMC
	K	Kazak et al. (2018)	Outil d'aide à la décision pour l'emplacement des IV selon les emplacements des puits hydrologiques urbains et la quantité d'eau qui pourrait s'accumuler dans chaque emplacement en fonction des conditions de précipitation définies.	Non automatisé	Wrocław, Pologne*	IV en général (ex : toits verts, murs végétalisés, paysages bleues et verts)	●Nombre de critères limités et un focus sur les critères biophysiques (conditions atmosphériques et sols) ● Pas ADMC (plus un outil hydrologique)

Tableau 2.7 Études SIG-ADMC pour la planification spatiale des IVB (suite)

Type d'outil	#	Outil	Fonction	Plateforme	Cas d'étude	Nombre et type d'IVB	Particularité
Outil informatique SIG	L	PSTLIO Zhou and Wu (2020)	Cartographier les zones de haut potentiel pour le développement d'IVB	Application avec ArcGIS (version 10.5, 2016)	Hekou City, Chine*	Infrastructures vertes, infrastructures bleues	● Pas ADMC
	M	GIP-SWMM Shojaeizadeh et al. (2021)	Outil d'aide à la décision pour identifier les IVB optimales pour chaque bassin versant afin de réduire les charges polluantes et le débit à l'exutoire du bassin versant, tout en minimisant les coûts	Module Excel-SWMM	Dakota du sud, États-Unis*	13 : étangs secs, étangs humides, bassins d'infiltration, puits secs, tranchées d'infiltration, filtre à sable, chaussée poreuse, noue enherbée, bande filtrante végétalisée, biorétention, jardin de pluie, fosse d'arbre et marais artificiels	● Pas ADMC
	N	SWITCH BMP (Viavattene et al., 2008)	Identifier les bonnes pratiques de gestion optimale des eaux pluviales	Non autonome : Environnement de développement Visual Studio.net 2003® avec ESRI® Arcgis library 9.1®	4 : Birmingham, (Royaume-Uni)*, Belo Horizonte (Brésil) Lodz, (Pologne) Emscher région, (Allemagne)	15 :bassins d'infiltration, pavé poreux, noues, tranchées d'infiltration, étangs de rétention, marais artificiels, bassin de détention, bassin de détention étendu, toits verts, bande filtrante, drain filtrant, puits de captage, lagune, bassin de décantation, asphalte poreux	
	O	GreenPlan-IT ToolKit Wu et al. (2008)	Évaluer la localisation des sites potentiels d'IVB, la modélisation du ruissellement et l'analyse coût-bénéfices	Automatisé, barre d'outil dans ArcGIS	Honolulu, Hawaii 8 études de cas en Californie, États-Unis*	9 : biorétentions avec et sans drain, tranchées d'infiltration, revêtement perméable, milieux humides des eaux pluviales, noues végétalisées, bassins humides, fosses d'arbres, Jardinière à écoulement continu	

Tableau 2.7 Études SIG-ADMC pour la planification spatiale des IVB (suite)

Type d'outil	#	Outil	Fonction	Plateforme	Cas d'étude	Nombre et type d'IVB	Particularité
Outil informatique SIG-ADMC	P	SUDSLOC GIS support tool Ellis and Viavattene (2014)	Outil SIG de sélection et localisation de systèmes de drainage urbain durable évaluant la performance hydrologique et la réduction des débits d'eaux pluviales	Non autonome : Environnement de développement Visual Studio.net 2003®	2 études de cas au Royaume-Uni*	16 : milieux humides artificiels, bassins de rétention/détention, bassins et tranchées d'infiltration, noues, toits verts et revêtements poreux, etc.	● Davantage: un logiciel de modélisation hydraulique
	Q	Green Infrastructure Spatial Planning (GISP) Meerow and Newell (2017)	Cartographier les points chauds où les IVB sont les plus nécessaires pour remplir des services écosystémiques	Autonome (Application en ligne)	4 : Détroit (États-Unis), Los Angeles (Californie), New York (États-Unis), Manille (Philippines)	IV en général	● Nombre de critères limités
	R	Spatial Suitability ANalysis TOol Kuller, Bach, et al. (2019)	Analyser l'adéquation spatiale pour 7 types de WSUD selon 2 perspectives: besoins et opportunités.	ArcMap d'Esri (arcpy-addin)	3 : Melbourne* et Sydney (Australie), Devon (Royaume-Uni)	7 : biorétention/jardins de pluie, toits verts, noues, systèmes d'infiltration, réservoirs d'eau de pluie, marais artificiels, étangs et lacs	● Logiciel non autonome
	S	Green Infrastructure Suitability Model (GISM) Apud et al. (2020)	Identifier les zones prioritaires nécessitant une IVB	Automatisé	Australie* 1 (Montevideo, Uruguay)	IV multifonctionnelles	● ArcMap procédure ● Logiciel non autonome
	T	Venter et al. (2021)	Application web pour la planification spatiale de la restauration des écosystèmes et des SBN	Application internet via *Google Earth Engine* (GEE)	Oslo, Norvège*	1 : toits verts	● Uniquement pour les toits verts

Tableau 2.8 Compilation des caractéristiques des cadres et outils. Les références A à T sont celles des cadres et outils présentés au tableau 2.7. Le type de critères suit la classification des facteurs déterminants l'adéquation spatiale d'un site de (Kuller et al., 2017)

			Références (#)																			
			A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**	**N**	**O**	**P**	**Q**	**R**	**S**	**T**
Caractéristique des critères	**Nombre de critères**		8	5	18	8	6	8	5	11	7	7	7	12	6	5	11	16	6	33	13	7
	Source des critères	Littérature	X		X		X			X	X	X		X	X				X	X	X	
		Équipe de recherche										X								X		
		Accessibilité des données						X								X						X
		Ateliers participatifs			X																	
Type de critères	**Biophysique**	Sols						X	X		X		X			X	X			X		
		Topographie			X			X	X		X	X		X		X	X			X	X	
		Hydrologie							X		X									X	X	
		Climat	X									X	X							X	X	
		Tissu urbain	X		X			X		X	X					X				X	X	
		Type d'écosystème																		X		
	Socio-démographique	Sensibilisation du public																X		X		
		Stabilité politique																		X		
		Gestion des déchets																				
	Planification et gouvernance	Disponibilité des terres			X			X		X	X	X	X	X		X	X			X	X	
		Opportunités de développement			X									X			X	X		X	X	
		Contraintes			X												X			X		
		Type de développement																				
	SE : Provision	Sécurité alimentaire																				
		Couverture de l'offre																				
		Rareté																				
	SE: Régulation	Qualité air		X			X												X			
		Séquestration carbone		X																		
		Îlots de chaleur		X	X		X							X					X	X		X
		Drainage de l'eau		X		X	X	X						X	X				X	X	X	X
		Cours d'eau récepteurs/charge de polluants			X										X			X				
		Contrôle des inondations																X		X		

Tableau 2.8 Compilation des caractéristiques des cadres et outils. Les références A à T sont celles des cadres et outils présentés au tableau 2.7. Le type de critères suit la classification des facteurs déterminants l'adéquation spatiale d'un site de (Kuller et al., 2017) (suite)

			Références (#)																			
			A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**	**N**	**O**	**P**	**Q**	**R**	**S**	**T**
Type de critères	**SE : Culturel**	Accessibilité/visibilité	X				X	X						X				X	X	X	X	X
		Démographie/vulnérabilité	X		X	X	X					X							X	X	X	X
		Cohésion sociale												X						X		
		Récréation		X		X														X		
	SE : Habitat et support	IVB existantes	X					X									X			X	X	X
		Connectivité					X							X					X	X		
		Santé faune/flore											X							X	X	
	Autres	Technique/fonctionnement				X						X			X			X				
		Économique				X									X			X				
Méthodes ADMC	**Pondération**	Comparaison par paires				X		X											X		X	
		Notation directe															X	X		X		
		Scénarios de pondération		X																		
		Pondération égale					X													X		
		Entropie																		X		
		Aucune	X		X				X	X	X	X	X	X	X	X						X
	Règle d'agrégation	AHP				X		X														
		WLC					X												X	X		X
		Superposition pondérée																			X	
		Autre																X				
		Aucune	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X						
Inclusion de parties prenantes	**Phase d'inclusion des PP**	Choix des critères			X																	
		Pondération				X		X											X			X
		Combinaison critères					X															
		Mise à l'épreuve			X																	X
Validation	**Analyse de sensibilité**					X		X														

2.4.2 Adaptation d'OAP existant à différents contextes

S'appuyer sur des OAP existants pour une utilisation dans d'autres contextes offre des opportunités et avantages considérables, puisqu'ils peuvent déjà disposer d'une certaine crédibilité, du soutien existant, d'expériences, en plus de permettre d'éviter des coûts de développement (Street et al., 2019). Toutefois, leur utilisation dans un autre contexte que celui dans lequel il a développé comporte plusieurs défis au niveau de l'adaptation conceptuelle, culturelle, linguistique, politique et des ressources disponibles de l'outil (Street et al., 2019). Pour favoriser leur intégration dans les pratiques locales et minimiser la charge de travail requise par les parties prenantes, les outils doivent être en concordance avec le contexte politique et le cadre réglementaire (Schindler et al., 2020). Utiliser un outil hors de son contexte de développement peut engendrer des difficultés dans l'interprétation des résultats ou un décalage en raison des hypothèses posées (Lerer et al., 2015), d'où l'importance d'une adaptation adéquate.

Les variations dans le fonctionnement, la conception et les objectifs visés entre les outils déjà existants suggèrent que le contexte (géographique, culturel, climatique, socio-économique ou politique) dans lequel l'outil est développé a une influence sur leur développement (Lerer et al., 2015). Le contexte peut influencer l'importance accordée à certains paramètres ce qui affecterait le fonctionnement, la conception et les objectifs visés. Certains éléments propres au contexte pouvant affecter le développement des différents outils sont par exemple le type de réseau d'égouts (unitaires vs séparés), la profondeur de la nappe phréatique, les exigences réglementaires et le cadre économique, et la situation de l'approvisionnement en eau potable (Lerer et al., 2015).

L'un des défis est de disposer d'outils permettant une certaine flexibilité pour intégrer les caractéristiques du contexte local, tout en étant généralisables à différents contextes. Bien que les études sur les OAP et l'ADMC dans le domaine de la planification des IVB soient presque toujours basées sur des études de cas, il demeure que l'adaptation de ces approches à différents contextes n'est que très peu étudiée (Bousquet et al., 2023). Les outils sont généralement soit basés sur des études de cas spécifiques à un lieu ou largement généralisables dans le monde compromettant l'analyse au niveau local (Bagstad et al., 2013; Bousquet et al., 2023). Une flexibilité permettant l'applicabilité des outils à différents contextes de décision, à un coût abordable, permettrait de maximiser le potentiel d'intégration dans les processus urbanistiques à travers monde (Bagstad et al., 2013). L'adaptation technologique des outils à différents contextes ne garantit toutefois pas une

bonne transférabilité des outils existants, puisque la reconnaissance et l'acceptation par les décideurs locaux et parties prenantes de cet outil entrent en jeu (Schindler et al., 2020).

CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

3.1 Écart de connaissance dans la littérature et la pratique

À partir de la revue de la littérature présentée au CHAPITRE 2, les principaux écarts au niveau des connaissances existantes ont été identifiés. Les objectifs de la thèse ont été définis en vue d'améliorer ces lacunes dans les connaissances existantes.

(A) Manque d'inclusion des parties prenantes au cours du développement des OAP : Les parties prenantes sont rarement impliquées dans le processus ADMC des OAP pour les IVB, et leur participation se limite principalement à l'étape de la détermination de la pondération des critères de décision. Le processus ADMC est généralement mené par l'équipe de recherche (Bousquet et al., 2023).

(B) Application restreinte des OAP à une étude de cas unique : Les études sur les OAP basés sur l'ADMC pour les IVB sont généralement basées sur une étude de cas unique, en incluant la participation d'experts uniquement pour l'étape de la détermination de la pondération des critères de décision et utilisent le plus souvent des méthodes simples comme la notation directe ou la méthode AHP (Bousquet et al., 2023).

(C) Intérêt pour l'étude du potentiel de transfert et d'adaptation des OAP existants à d'autres contextes : Il existe un désir de limiter les ressources requises pour l'accès à un outil (c.-à-d. éviter le développement d'un nouvel outil) et un désir de profiter d'une crédibilité, d'une robustesse, des expériences passées et du soutien technique d'un outil existant (Street et al., 2019). Toutefois, l'un des freins à l'utilisation des outils ADMC est leur variabilité considérable entre différents emplacements et contextes de décision (Schindler et al., 2020). L'adaptation au contexte local d'un outil est cruciale pour son adoption (Schindler et al., 2020). Le développement des outils SIG-ADMC, notamment en planification urbaine, est généralement basé sur un contexte local spécifique et difficilement applicable à différents contextes urbains et climatiques, ce qui pourrait permettre la valorisation des ressources déjà existantes. L'étude de l'application d'outils dans différents contextes urbains est identifiée comme une priorité clé pour des recherches futures (Schindler et al., 2020).

(D) Gouvernance fragmentée dans les processus décisionnels liés à l'implantation des IVB : Les villes continuent de fonctionner selon une approche en silos, où les différents services travaillent de manière indépendante, voire en contradiction les uns avec les autres. Cette absence de coordination nuit à la collaboration et à l'interconnexion nécessaires pour assurer une planification et une mise en œuvre réussies des IVB (Bissonnette et al., 2018; Frantzeskaki et al., 2020; Kambites & Owen, 2006; Kauark-Fontes et al., 2023; Kuller et al., 2022). Une coordination transversale entre les départements municipaux et une communication efficace entre les différentes structures organisationnelles, les citoyens et leurs représentants élus (Bissonnette et al., 2018; Kambites & Owen, 2006) sont des éléments essentiels à la réussite des projets d'IVB. Ce même enjeu se manifeste également dans le contexte montréalais, où il n'existe pas de plateforme centralisée permettant aux acteurs de collaborer sur un exercice commun de planification et de priorisation des IVB. La gouvernance des IVB y est fragmentée, et différentes méthodes et outils internes sont développés de manière non coordonnée (Madénian & Van Neste, 2024). Un OAP fondé sur l'ADMC et les SIG répond à ce besoin en soutenant une approche inclusive et collaborative intégrant l'ensemble des parties prenantes.

(E) Manque d'emphase sur la phase de structuration du problème décisionnel en ADMC dans le développement des OAP : La détermination des objectifs pour les problèmes multicritères est une étape cruciale au développement d'approches stratégiques et cette élaboration doit être approfondie et structurée et doit se baser sur une approche conceptuelle robuste, puisque lister ces objectifs est considéré comme une approche superficielle (Keeney, 1996). Toutefois, les OAP existants sont basés sur des « critères » et non des « objectifs ». L'un des défis de conception et d'application des outils SIG-ADMC est de réussir à identifier tous les objectifs fondamentaux (Ferretti & Montibeller, 2016), et pour ce faire, un cadre systémique et structuré doit être utilisé pour organiser les objectifs et leurs critères de décision (Kiker et al., 2005). Les réseaux moyens-fins sont une méthode axée sur la valeur (en anglais, *value-focused thinking*), connue pour la structuration des hiérarchies d'objectifs (Eisenführ et al., 2010; Gregory et al., 2012). Bien que reconnu comme étant important, le développement de hiérarchies d'objectifs en ADMC a été peu étudié jusqu'à présent (Marttunen et al., 2019), tout comme le développement d'ensemble d'objectifs en planification et conception des IVB (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021; Daniel et al., 2012). Parmi les quelques études ayant

structuré en réseau les bénéfices des IVB, il y a les études de Daniel et al. (2012) et Campbell-Arvai and Lindquist (2021). Cette dernière étude a utilisé un réseau de moyens et de fins, mais seulement en incluant les objectifs liés aux services écosystémiques (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021; Daniel et al., 2012).

(F) Au Québec, il n'y a pas d'OAP SIG-ADMC facilement accessible pour supporter la planification stratégique et coordonnée des IVB en milieu urbain: Au Québec, bien que des guides et des méthodologies aient été développés pour soutenir la planification ou la sélection d'IVB, aucun outil complet reposant sur les SIG et l'ADMC n'est actuellement disponible pour soutenir les décideurs dans la planification des IVB dédiées à la gestion des eaux pluviales en milieu urbain (Dagenais et al., 2011). Ailleurs dans le monde, les décideurs ont exprimé le besoin de disposer de connaissances, de méthodes et d'outils appropriés pour la planification et la conception des IVB (Bousquet et al., 2023).

(G) Peu d'études sur les OAP utilisent la méthode de pondération swing pour obtenir les préférences inter-objectifs: La version originale de SSANTO utilise une notation directe simple pour la pondération des critères de décision, mais il a été démontré dans la littérature qu'il s'agit d'une méthode de pondération faible avec un risque élevé de biais (Németh et al., 2019), alors que la méthode de pondération swing est plus robuste (Riabacke et al., 2012b). La méthode de pondération swing ne semble pas avoir été appliquée fréquemment dans un contexte SIG-ADMC (Kiker et al., 2005). Kiker et al. (2005) ont identifié 24 applications d'outils d'aide à la décision combinant SIG et AMCD dans des contextes liés à la gestion de l'environnement (par exemple, la priorisation de sites industriels et militaires, la sélection de technologies environnementales, l'évaluation des impacts environnementaux et la gestion des ressources naturelles), et seules les méthodes de pondération AHP, PROMETHEE, ELECTRE, SMART et MAUT ont été utilisées. Bousquet (2024a) ont utilisé la méthode MACBETH pour obtenir les préférences de parties prenantes vis-à-vis de scénarios d'implantation d'IVB. Une part importante des OAP pour les IVB n'utilise pas une méthode de pondération spécifique ou utilise la notation directe (Bousquet et al., 2023).

(H) Manque de cas d'application de détermination des préférences inter-objectifs (pondération) utilisant un logiciel de pondération en ligne en contexte SIG-ADMC: L'un des défis de conception et d'application des outils SIG-ADMC est de déterminer comment

obtenir les pondérations des critères de décision auprès de parties prenantes (Ferretti & Montibeller, 2016). La sélection du format de l'obtention des préférences repose sur deux pratiques recommandées : les ateliers facilités et les questionnaires en ligne. La réalisation d'ateliers pour l'obtention de ces préférences entièrement en ligne est une avenue avec plusieurs avantages, mais les entrevues face à face sont l'approche la plus fréquemment utilisée pour obtenir les poids en ADMC (Aubert et al., 2020; Marttunen et al., 2018). Les ateliers permettent un accompagnement direct, tandis que les questionnaires en ligne offrent des avantages tels qu'une meilleure accessibilité, une flexibilité accrue et une participation élargie, particulièrement pertinente dans le contexte post-COVID-19. La détermination de la pondération des critères de décision en ligne par la méthode swing a été appliquée dans des contextes de laboratoire, mais il y a un besoin pour des applications en ligne dans des cas pratiques (Aubert et al., 2020; Aubert & Lienert, 2019; Pöyhönen & Hämäläinen, 2001). Seule une application d'atelier de pondération en ligne non assistée a été réalisée dans un contexte de questions environnementales complexes (Aubert et al., 2020). Aubert et al. (2020) ont étudié la faisabilité dans un cas pratique, mais en utilisant une plateforme de sondages communément utilisée, *Qualtrics* (https://www.qualtrics.com/), permettant de soulever les contraintes de l'utilisation d'une telle plateforme générale. C'est d'ailleurs ce qui a mené au développement d'un outil en ligne spécifiquement dédié à la pondération par la méthode swing (Aubert, 2021). Toutefois, cet outil n'a jamais encore été appliqué dans un cas pratique réel.

(I) L'analyse de sensibilité en contexte spatial et multicritère n'est pas courante et même largement absente : L'analyse de sensibilité des problèmes décisionnels à plusieurs objectifs par l'utilisation de modèles mathématiques est courante (Delgado & Sendra, 2004). Toutefois, l'analyse de sensibilité spatiale des outils SIG-ADMC constitue un autre des défis de la conception et l'application de ces outils (Ferretti & Montibeller, 2016). Toutefois, bien que reconnue comme étant cruciale pour l'amélioration des outils SIG-ADMC (Chen, Yu, et al., 2010) et pertinente pour comprendre les conséquences de différentes priorités (Ferretti & Montibeller, 2016), l'analyse de sensibilité en contexte spatial et multicritère n'est pas courante et même largement absente en raison de la complexité d'une telle analyse en contexte spatial (Chen, Yu, et al., 2010; Delgado & Sendra, 2004; Ferretti & Montibeller, 2016). Elle constitue l'une des étapes de l'évaluation d'un modèle, au même titre que la vérification et la validation (Qureshia et al., 1999). La vérification, qui consiste à s'assurer que le modèle fonctionne

correctement a déjà été effectuée (Kuller, Bach, et al., 2019), mais la sensibilité des résultats d'adéquation spatiale de l'outil d'analyse spatiale multicritère SSANTO n'a pas été réalisée auparavant.

(J) Les analyses de sensibilité sont majoritairement faites de type « locales » plutôt que « globales » et sans analyse d'incertitude combinée: La majorité des analyses de sensibilité de modèles SIG-ADMC sont de type local (ASL) vs de type global (ASG), ce qui limite une analyse multidimensionnelle complète de l'espace des paramètres d'entrée, sans considérer les interactions entres les paramètres. Elles sont également rarement combinées à une analyse d'incertitude (AI), alors que ces deux approches devraient être complémentaires (Chen, J.Yu, et al., 2010; Malczewski & Jankowski, 2020; Tenerelli & Carver, 2012).

(K) Manque d'étude de l'impact de paramètres d'entrée autres que la pondération des critères de décision dans les analyses de sensibilité des OAP SIG-ADMC : La plupart des analyses d'incertitude et de sensibilité se concentrent sur la variation des poids des critères, tandis que d'autres paramètres sont rarement pris en compte. Ces variations de poids reposent principalement sur la méthode de comparaison par paires, souvent associée à des techniques d'agrégation telles que l'AHP, la combinaison linéaire pondérée ou la moyenne pondérée ordonnée. Notamment, il y a un manque d'étude sur l'impact des modèles d'agrégation sur les résultats des modèles (Langhans et al., 2014).

3.2 Objectifs de la recherche

L'objectif général de cette thèse est de développer et tester la sensibilité d'un outil d'aide à la planification (OAP) dédié à la planification IVB, en intégrant les principes de la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT) à chaque étape du processus. Le projet de recherche permet l'amélioration et l'adaptation d'un OAP IVB pour le rendre pertinent dans le contexte québécois, tout en explorant les différentes étapes critiques du développement de cet outil : du cadre d'adéquation spatiale, à l'intégration des préférences des parties prenantes, puis à l'analyse de la robustesse de l'outil. Les sous-objectifs qui supportent cet objectif principal, selon les trois articles scientifiques rédigés, sont présentés au Tableau 3.1. Le Tableau 3.2 présente les questions de recherche abordées dans différentes sections de la thèse.

Tableau 3.1 Objectifs, hypothèses et contribution du projet de recherche

Article	Objectif principal	Objectifs spécifiques	Écart de connaissance	Questions de recherche	Contribution et nouveauté	Livrable pour les villes québécoises
Article 1	**O1.** Développer un cadre structuré sous forme de hiérarchie d'objectifs pour la planification stratégique des IVB, incluant un ensemble d'objectifs mesurables reflétant les besoins des parties prenantes et les connaissances des experts, pour supporter l'adaptation de l'OAP SSANTO à différents contextes, en s'appuyant sur la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT).	**O1.1.** Définir et organiser les objectifs de planification des IVB dans un cadre hiérarchiquement structuré. **O1.2**. Valider et compléter les objectifs établis en fonction des valeurs des parties prenantes **O1.3**. Opérationnaliser les objectifs définis en déterminant les attributs associés et les mesures de performance (échelles de valeurs) pour chaque objectif, grâce à l'implication d'experts.	(A) (B) (C) (D) (E) (F)	● Comment peut-on développer un OAP SIG-ADMC existant pour la planification stratégique des IVB, afin de l'aligner sur les priorités des parties prenantes dans un contexte urbain et climatique différent? ● Quels sont les objectifs de planification spatiale des IVB en milieu urbain que les parties prenantes jugent essentiels à intégrer dans un OAP SIG-ADMC? ● Comment les objectifs et les attributs mesurables varieront-ils par rapport à la version originale de l'OAP, développée dans un contexte différent de celui du Québec? ● Comment traduire la performance des sites d'implantation des IVB pour chaque objectif en contexte québécois?	● Offrir une meilleure compréhension des implications liées à l'adaptation d'un OAP basé sur le SIG-ADMC, tout en respectant une méthodologie structurée qui place les parties prenantes au cœur du processus. ● S'éloigner des pratiques courantes consistant à inclure opportunément des objectifs dictés par la disponibilité des données dans les OAP, en favorisant plutôt une sélection d'objectifs basée sur leur lien explicite avec les préférences fondamentales des parties prenantes. ● Offrir un cadre complet et aligné avec les valeurs des parties prenantes intégré à un OAP basé sur le SIG-ADMC, incluant l'ensemble des objectifs, les attributs mesurables, les ensembles de données spatiales et les échelles de valeurs traduisant la performance des objectifs individuels.	Cadre d'analyse d'adéquation spatiale des IVB en milieu urbain pour le contexte québécois, avec deux hiérarchies d'objectifs pour les petits systèmes et les gros systèmes, mesurables par des attributs et données spatiales et leurs échelles de valeurs respectives.

Tableau 3.1 Objectifs, hypothèses et contribution du projet de recherche (suite)

Article	Objectif principal	Objectifs spécifiques	Écart de connaissance	Questions de recherche	Contribution et nouveauté	Livrable pour les villes québécoises
Article 2	**O2.** Évaluer les préférences et le consensus de parties prenantes du milieu institutionnel, municipal, gouvernemental, professionnel et citoyen, par rapport aux objectifs de planification spatiale stratégique de trois groupes d'IVB : les petits systèmes (groupe A : biorétention, système d'infiltration et noue), les gros systèmes (groupe B : marais artificiel, étang et lac) et les arbres urbains (groupe C).	**O2.1.** Déterminer les objectifs les plus importants et les moins importants pour les parties prenantes dans le cadre de la planification stratégique des IVB. **O2.2.** Déterminer les objectifs dans la planification stratégique des IVB qui font l'objet du plus grand et du moindre consensus parmi les parties prenantes en termes de préférences. **O2.3.** Comparer les préférences individuelles des parties prenantes entre elles pour l'ensemble des objectifs liés à la planification stratégique des IVB.	(A) (G) (H)	● Quels sont les objectifs que les parties prenantes trouvent les plus importants et les moins importants pour une planification spatiale stratégique des IVB en milieu urbain? ● Pour quels objectifs observe-t-on un fort consensus ou un faible consensus dans les préférences des parties prenantes? ● Comment les préférences individuelles des parties prenantes diffèrent entre elles pour l'ensemble complet des objectifs?	● Informer sur les objectifs prioritaires et non-prioritaires de parties prenantes multidisciplinaires pour plusieurs types d'IVB différents. ● Utiliser la méthode de pondération swing pour traduire les préférences des parties prenantes dans un contexte SIG-ADMC. ● Utiliser un outil novateur de pondération en ligne dans le cadre d'un contexte SIG-ADMC pour la planification spatiale des IVB.	Ensemble de pondérations des objectifs de trois hiérarchies d'objectifs, pour les petits systèmes, les gros systèmes et les arbres.

Tableau 3.1 Objectifs, hypothèses et contribution du projet de recherche (suite)

Article	Objectif principal	Objectifs spécifiques	Écart de connaissance	Questions de recherche	Contribution et nouveauté	Livrable pour les villes québécoises
Article 3	**O3.** Quantifier l'influence de l'incertitude dans les paramètres d'entrée liés aux préférences des parties prenantes et experts, soit les poids des objectifs, la forme des échelles de valeur et le degré d'additivité de la fonction d'agrégation, sur les cartes d'adéquation spatiale des IVB de l'OAP SSANTO.	**O3.1.** Mesurer la stabilité générale du modèle SIG-ADMC SSANTO. **O3.2.** Identifier les paramètres d'entrée les plus influents (préférences inter-objectifs et intra-objectifs et règle d'agrégation) et quantifier leur impact sur les incertitudes des cartes d'adéquation des infrastructures vertes et bleues (IVB).	(I) (J) (K)	● Quelle est la stabilité générale d'un OAP SIG-ADMC développé pour la planification des IVB? ● Quels sont les paramètres d'entrée ayant le plus d'impact et dans quelle mesure sont-ils responsables de la variabilité des cartes d'adéquation spatiale des IVB?	● Utiliser une approche globale d'analyse de sensibilité pour quantifier les incertitudes non seulement des préférences inter-objectifs, mais de l'ensemble des paramètres d'entrée du modèle SIG-ADMC. ● Valider l'OAP SSANTO développé avant son utilisation par les municipalités québécoises. ● Évaluer la nécessité d'avoir recours à un processus approfondi de détermination des préférences inter-objectifs et intra-objectifs avec les parties prenantes et les experts, vs un processus simplifié.	● Impact quantitatif des paramètres d'entrée sur les cartes d'adéquation spatiale des IVB de l'OAP SIG-ADMC. ● Recommandations sur l'effort participatif nécessaire pour chaque paramètre d'entrée lié aux préférences.

Tableau 3.2 Questions de recherche abordées dans différentes sections de la thèse

Questions de recherche	**Sections de la thèse**
● Comment peut-on adapter de manière systématique un OAP existant pour la planification stratégique des IVB à un contexte urbain et climatique différent, tout en tenant compte des priorités des parties prenantes ?	CHAPITRE 4
● Quels sont les objectifs visés par les parties prenantes lors d'un processus de planification spatiale stratégique des IVB?	CHAPITRE 4
● Comment opérationnaliser la performance des sites d'IVB à partir d'un cadre multi-objectifs pour le contexte municipal québécois?	CHAPITRE 4
● Comment les objectifs et les attributs mesurables varient-ils par rapport à la version originale de l'OAP, développée dans un contexte différent de celui du Québec?	CHAPITRE 4
● Comment les parties prenantes priorisent-elles les objectifs entre eux en fonction de leur importance relative pour la planification spatiale stratégique des IVB en milieu urbain?	CHAPITRE 5
● Pour quels objectifs observe-t-on un fort consensus ou un faible consensus dans les préférences des parties prenantes?	CHAPITRE 5
● Dans quelle mesure les préférences globales des parties prenantes diffèrent-elles les unes des autres, en considérant l'ensemble des objectifs simultanément ?	CHAPITRE 5
● Quelle est la stabilité générale de l'OAP SIG-ADMC développé pour la planification des IVB?	CHAPITRE 6
● Quels sont les paramètres d'entrée ayant le plus d'impact et dans quelle mesure sont-ils responsables de la variabilité des cartes d'adéquation spatiale des IVB?	CHAPITRE 6
● Quel rôle joue le contexte local sur l'utilisation des OAP?	CHAPITRE 7
● Comment intégrer dans la pratique un OAP pour les IVB au Québec?	CHAPITRE 7

3.3 Méthodologie

3.3.1 SSANTO : Un outil d'aide à la planification SIG-ADMC

Spatial **S**uitability **AN**alysis **TO**ol (SSANTO; Kuller, Bach, et al. (2019)) est un outil d'aide à la planification (OAP) basé sur l'aide à la décision multicritère (ADMC) et les systèmes d'information géographique (SIG) qui détermine l'adéquation spatiale de différents types d'IVB pour la gestion des eaux pluviales pour une zone d'étude choisie. La particularité de SSANTO est l'intégration d'un ensemble de critères (biophysiques, socio-économiques et de planification et

gouvernance) en plus des services écosystémiques, sous l'angle de deux perspectives : les besoins et les opportunités (Kuller, Bach, et al., 2019). La Figure 3.1 montre le cadre théorique de SSANTO.

- La perspective ***Opportunités***, aussi appelée « une IVB a besoin d'un site», fait référence aux sites qui offrent les meilleures opportunités d'implantation d'IVB.
- La perspective ***Besoins***, aussi appelée « un site a besoin d'une IVB», fait référence aux sites qui ont le plus grand besoin des bénéfices pouvant être tirés des IVB.

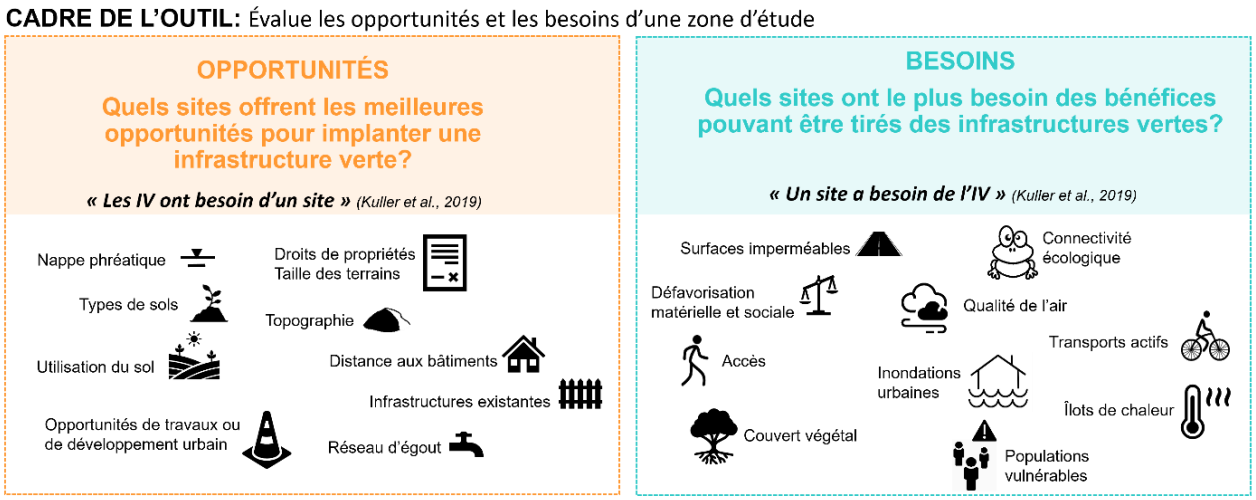


Figure 3.1 Cadre théorique de SSANTO selon la définition par Kuller et al. (2017)

Par la rapidité de l'analyse qu'offre SSANTO, l'outil répond à une problématique auquel fait face l'analyse spatiale manuelle, soit le temps important d'analyse et les ressources à déployer (Kuller, Bach, et al., 2019). En disposant d'une rapidité d'exécution, l'outil permet aux professionnels d'étudier plusieurs scénarios et facilite grandement la prise de décision en automatisant le processus de décision multicritère et d'analyse spatiale. L'outil est flexible pour les utilisateurs qui souhaiteraient y apporter des modifications et permet l'engagement actif des parties prenantes dans le processus de décision. Les résultats obtenus sont faciles d'interprétation. SSANTO n'intègre pas des critères techniques tels que la taille des systèmes, l'hydrologie au sein des bassins versants et les aspects liés à la performance quantitative et qualitative des systèmes.

3.3.1.1 Histoire de SSANTO

Développé à Melbourne (Australie) dans le cadre d'un projet doctoral (Kuller, 2018; Kuller, Bach, et al., 2019), SSANTO était à l'origine une barre d'outil intégrée au logiciel de traitement géospatial d'Esri *ArcMap*, codé dans le langage de programmation *Python*. SSANTO était basé sur des critères de décision, avec 33 critères de décision suggérés, soit 24 dans la perspective des opportunités et neuf dans la perspective des besoins. Cinq étapes principales étaient requises par les utilisateurs : (1) compilation des données géospatiales, (2) masquage des zones à exclure des analyses, (3) échelles de valeurs, (4) pondération des critères et (5) choix de la règle d'agrégation. Sept types d'IVB étaient initialement considérés dans la version originale de SSANTO: (1) les biorétention et jardins de pluie, (2) les systèmes d'infiltration, (3) les toits verts, (4) les marais filtrants, (5) les étangs et lacs, (6) les noues et (7) les réservoirs d'eau de pluie.

(1) Biorétentions et jardins de pluie (*Bioretentions & raingardens*): Ces systèmes permettent l'infiltration, la rétention, l'évapotranspiration et le traitement des eaux pluviales en utilisant les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et des végétaux (MDDEFP, 2011). Ils permettent le traitement des fines particules et d'autres polluants contenus dans les eaux en retenant l'eau et peuvent être implantés à différentes échelles dans le paysage urbain (Melbourne water, 2005).

(2) Systèmes d'infiltration (*Infiltration systems*):Ils prennent souvent la forme d'une tranchée peu profonde qui peut être végétalisée. Ces systèmes permettent une infiltration de l'eau dans le sol et sont donc impactés par le type de sol mis en place, ainsi que le niveau de la nappe phréatique. En plus, de favoriser une diminution de la quantité d'eau de ruissellement, ces systèmes permettent la filtration de l'eau lorsque de la végétation y est ajoutée (Melbourne water, 2005).

(3) Toits verts (*Green roofs)* : Ces systèmes sont constitués d'un substrat de croissance, de végétaux ainsi que d'un système de drainage et sont installés à même la couverture des toits. Les toitures végétalisées permettent de retarder, de diminuer la quantité eaux de ruissellement en plus de contribuer à l'isolation thermique des bâtiments l'été, l'insonorisation, l'amélioration de la qualité de l'air, l'augmentation de la durée de vie des bâtiments, la diminution des îlots de chaleur et l'amélioration de l'esthétique (MDDEFP, 2011).

(4) Marais artificiels (*Constructed wetlands*) : Les marais artificiels sont des écosystèmes avec un niveau d'eau peu profond, de moins de six mètres, végétalisés, conçus pour imiter les milieux humides (Alikhani et al., 2021). Ils sont basés sur un processus de sédimentation et de filtration par la végétation (Melbourne water, 2005). Ces systèmes naturels retiennent les eaux pluviales et les eaux de ruissellement permettant un contrôle des débits de ruissellement (MDDEFP, 2011). Ces systèmes améliorent la biodiversité à la faune en plus d'offrir des espaces récréatifs (Alikhani et al., 2021; Bonciarelli et al., 2025). Ils peuvent être implantés autant à l'échelle d'un quartier ou à l'échelle régionale sur plusieurs hectares (Melbourne water, 2005).

(5) Étangs et lacs (*Ponds & lakes*) : Ces systèmes sont basés sur des processus de sédimentation des particules et permettent la rétention de l'eau. Les étangs et lacs s'apparentent aux milieux humides et peuvent être implantés en aval de ceux-ci (Melbourne water, 2005). Les étangs et lacs permettent de stocker l'eau à des fins de réutilisation ou à des fins récréatives. La végétation aquatique permet de soutenir la qualité esthétique des paysages, l'érosion et la qualité de l'eau (Melbourne water, 2005). Ces systèmes devraient être évités à proximité des aéroports afin de ne pas nuire au trafic aérien par l'attrait qu'ils exercent sur les oiseaux (Melbourne water, 2005).

(6) Noues (*Swales*) : Les noues végétalisées sont des dépressions ou des fossés permettant de capter temporairement l'eau, de l'infiltrer et de l'évaporer (MDDEFP, 2011). Ces systèmes permettent le transport de l'eau tout en ralentissant les débits et en retenant les sédiments par l'entremise de la végétation. Une pente longitudinale de 2 à 4% est favorable pour leur implantation. Les noues sont souvent implantées à l'échelle de la rue ou des stationnements.

(7) Réservoirs d'eau de pluie (*Rainwater tanks*): Les réservoirs permettent de récolter l'eau de pluie à des fins de réutilisation (irrigation, chasse d'eau, tout en diminuant la quantité d'eau ruisselant et la charge de polluants qui peut être contenue sur les toitures par exemple. Ceux-ci peuvent être intégrés aux bâtiments ou peuvent être souterrains ou intégrés dans des éléments comme des murs ou clôtures (Melbourne water, 2005).

La mise à l'épreuve de SSANTO avec une firme locale d'experts en planification d'IVB, lors d'une étude de cas dans la municipalité de Darebin dans la banlieue du nord-est de Melbourne en Australie, a démontré son utilité en matière de planification des IVB (Kuller, Bach, et al., 2019). Cette étude de cas a également montré que le choix des sept types d'IVB considérés dans la version

originale de SSANTO est suffisamment diversifié pour satisfaire la diversité du contexte urbain dans une zone d'étude à Melbourne, c'est-à-dire que l'implantation d'au moins un type d'IVB était possible dans la majorité des zones du territoire à l'étude (Kuller, Deletic, et al., 2019). Le Tableau 3.3 présente les caractéristiques des paramètres d'entrée lors de ce premier cas d'application de SSANTO.

Tableau 3.3 Caractéristiques de la première application de la version originale de SSANTO (Kuller, Bach, et al., 2019)

Étape	**Caractéristiques**
Règle d'agrégation	Combinaison linéaire pondérée avec additivité complète (γ=1)
Préférences intra-objectifs (échelles de valeurs)	Élaborées sur la base de la littérature, du chercheur principal et de quelques experts sans utilisation d'une méthode d'ADMC
Préférences inter-objectifs (pondération)	Trois scénarios : (1) Pondérations égales, (2) méthode de notation directe avec des experts d'une firme de consultants, (3) pondérations basées sur l'entropie des données spatiales

Depuis 2022, SSANTO fait l'objet d'un redéveloppement afin d'en faire un outil autonome. Deux équipes d'étudiants en génie logiciel à Polytechnique Montréal (Montréal, QC, Canada) et la firme de consultants *Solydd Solutions* ont travaillé sur l'implémentation logiciel des améliorations de SSANTO.

3.3.1.2 Étapes d'utilisation

La Figure 3.2 présente les étapes de fonctionnement de l'outil SSANTO selon l'utilisateur.

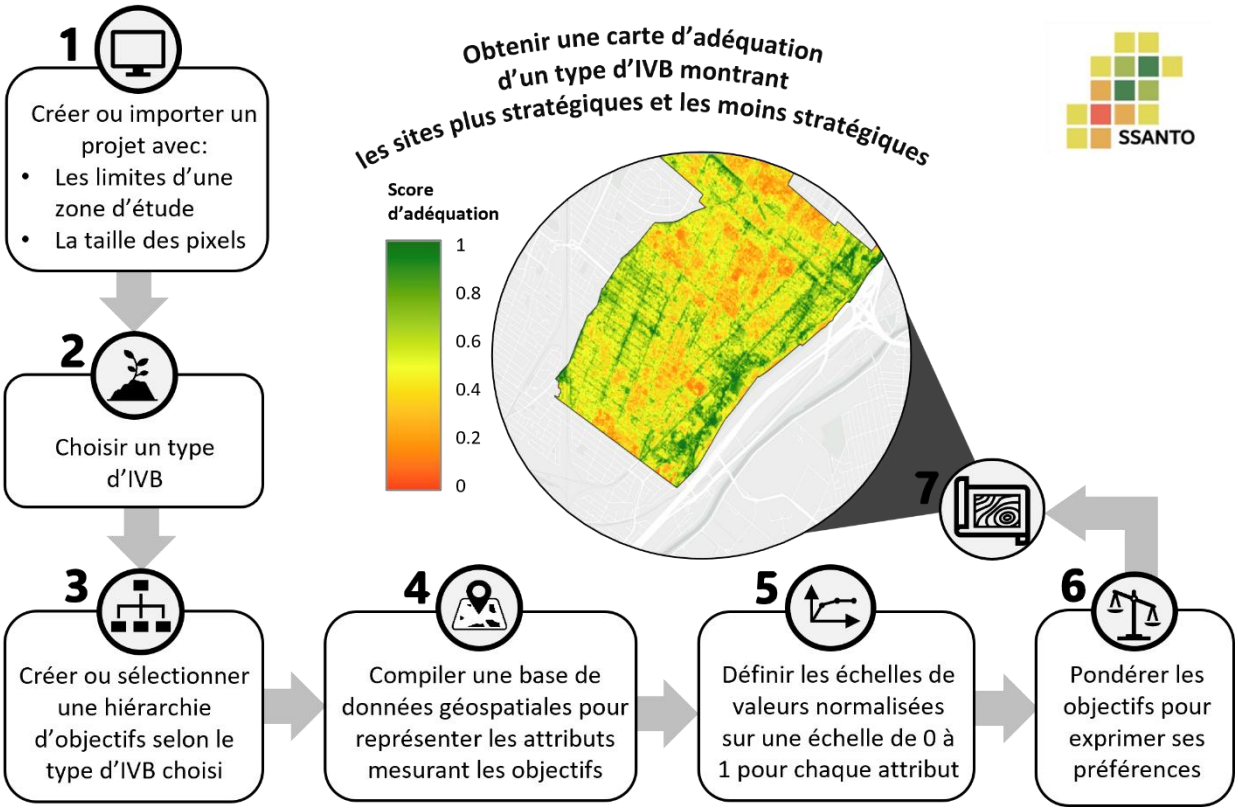


Figure 3.2 Organigramme de fonctionnement de SSANTO selon l'utilisateur

Étapes préalables :

1. L'utilisateur doit choisir et importer la zone d'étude souhaitée pour réaliser une analyse d'adéquation spatiale. La taille des pixels (ou cellules) de la grille d'analyse permet de déterminer la précision de l'analyse d'adéquation spatiale. L'utilisateur peut choisir une valeur entre 1 et 200.
2. Les hiérarchies d'objectifs sont dépendantes du type d'IVB étudié. L'utilisateur doit ainsi choisir un type d'IVB avec lequel travailler.

Étapes de l'utilisateur :

3. Une hiérarchie d'objectifs, c'est-à-dire des objectifs principaux et des sous-objectifs doit être entrée par l'utilisateur.
4. Chacun des objectifs doit être mesurable par un ou plusieurs attribut(s) et ces attributs doivent être représentés par des données géospatiales. Plusieurs données spatiales de format matriciel ou vectoriel peuvent être intégrées dans l'outil selon la disponibilité de celles-ci et les besoins de l'utilisateur. Les données vectorielles décrivent des entités discrètes et bien

délimitées, telles que des bâtiments, des routes ou des parcs, tandis que les données matricielles représentent des phénomènes continus dans l'espace, comme la température ou l'élévation (Li et al., 2018).

Le

Tableau 3.4 présente les types d'attributs pouvant être entrés selon le type de données.

Tableau 3.4 Types d'attribut possibles dans SSANTO pour mesurer les objectifs

Type d'attribut	**Description**
Attribut des données (*data attribute*)	**Catégorique :** Attribut mesuré par des données vectorielles où les éléments sont des catégories (ex : catégories d'utilisation du sol) **Continu :** Attribut mesuré par des données matricielles avec des valeurs continues dans chaque pixel **Booléen :** Attribut mesuré par des données vectorielles où les éléments considérés sont deux catégories, soit présence ou absence de l'élément
Attribut de distance (*distance attribute*)	Attribut incluant un gradient de distance (ex : fonction de la distance par rapport aux aéroports)

Pour traduire la performance des sites aux différents attributs, l'utilisateur doit entrer les échelles de valeurs. Cette étape permet la représentation mathématique du jugement humain (Kuller et al., 2019).

5. L'utilisateur peut pondérer chacun des objectifs sur une échelle de 0 à 1 (0 étant l'exclusion de l'objectif) selon l'importance que celui-ci souhaite leur accorder. Les pondérations des objectifs sont relatives entre elles (ex. un poids de 0.05 et de 0.1, équivalent à un poids de 0.5 et 1). Les préférences inter-objectifs sont reflétées par cette pondération.

6. SSANTO permet de cartographier les emplacements les plus ou les moins convenables pour l'implantation d'une IVB. SSANTO permet donc de cibler les sites qui profiteraient davantage d'une implantation d'un type d'IVB sélectionné et les sites qui offriraient davantage d'opportunités d'implantation, permettant ainsi de maximiser les bénéfices tirés des infrastructures (Kuller, M.Bach, Roberts, Browne, & Deletic, 2019). SSANTO utilise une combinaison linéaire pondérée (WLC) avec additivité complète comme règle d'agrégation, où le score final d'adéquation est obtenu par la moyenne pondérée (Zheng & Lienert, 2018):

$$V(A) = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot v_i(a) \tag{3.1}$$

Où $V(A)$ est le score final d'adéquation (entre 0 et 1), $v_i(a)$ est l'échelle de valeur normalisée entre 0 et 1 pour l'objectif i, et w_i est le poids de l'objectif i.

La Figure 3.3 présente un exemple de l'interface de pondération de l'outil dans sa version développée à Polytechnique Montréal (en date du 06 novembre 2025).

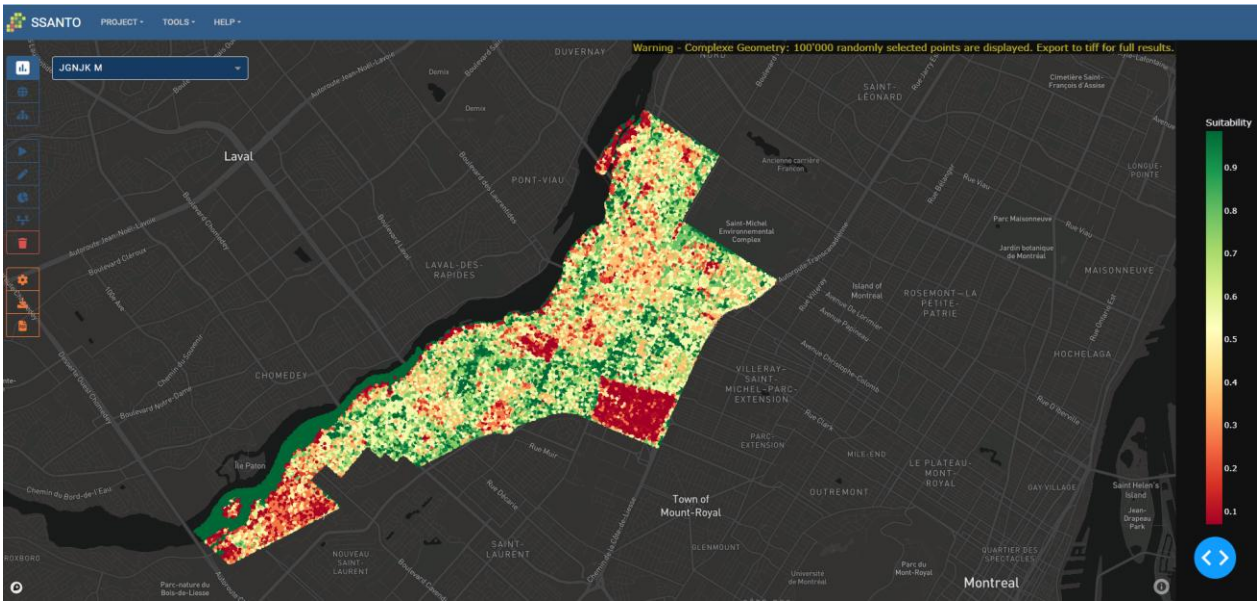


Figure 3.3 Interface de l'OAP SSANTO

3.3.2 Étapes suivies

Le projet de recherche a été développé en 16 grandes étapes sur une durée de quatre ans (2021 à 2025). La Figure 3.4 met en relation les étapes de la méthodologie du projet de recherche et le lien avec l'OAP SIG-ADMC tout au long du processus de la MAVT. Le Tableau 3.5 présente plus en détail chacune des étapes et les livrables produits. L'Annexe B fournit un complément d'informations sur la méthodologie de l'objectif 1, avec des photos des ateliers de co-création des objectifs et des figures du protocole de construction des échelles de valeurs. L'Annexe C fournit un complément d'informations pour la méthodologie de l'objectif 2, avec davantage d'information sur la méthode de pondération swing et les étapes des ateliers.

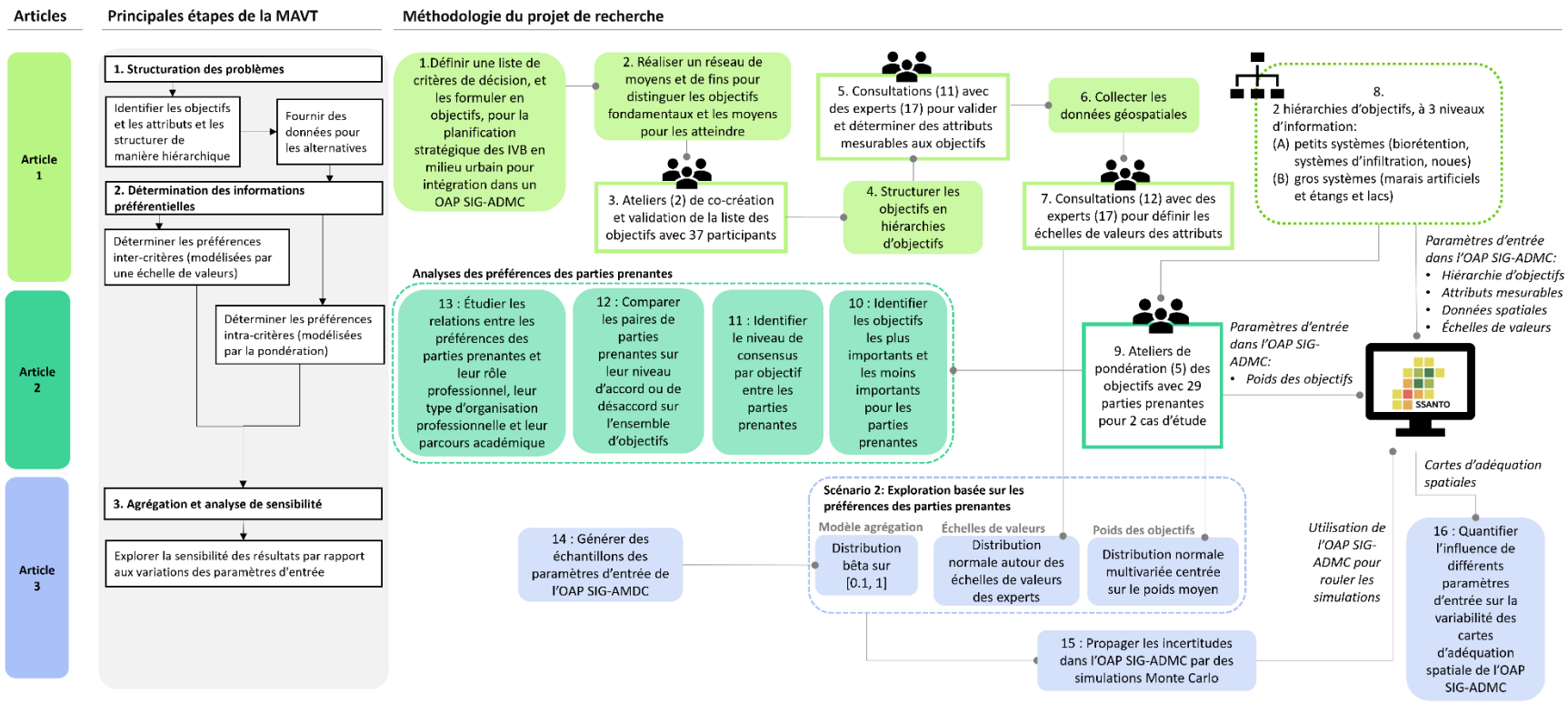


Figure 3.4 Organigramme de la méthodologie du projet de recherche selon les étapes de la MAVT de Bertsch et al. (2016) et Lienert and Aubert (2020)

Tableau 3.5 Résumé des étapes suivies, la démarche entreprise et les résultats produits pour mener le projet de recherche

Article	Étape ADMC	Étapes	Démarche	Résultat produit
Article 1	Structuration du problème de décision	1 : Définir une liste de critères de décision à traduire en objectifs pour intégration dans l'OAP SIG-ADMC SSANTO	● Revue des critères de décision l'outil original SSANTO (Kuller et al., 2017), d'un cadre local pour la planification des IVB (Dagenais et al., 2014) et de directives nord-américaines (Chesapeake Stormwater Network, 2013; CSA Group, 2018; International Civil Aviation Organization, 2012; MDDEFP, 2011; MDDELCC, 2017; The Prince George's County Maryland, 2007; TRCA/CVCA, 2010). ● Formulation des critères de décision en objectifs.	Liste maîtresse d'objectifs de planification spatiale des IVB en milieu urbain
		2 : Organiser et simplifier la liste maîtresse d'objectifs développée à l'étape précédente	Distinction des objectifs fondamentaux poursuivis pour eux-mêmes et les objectifs moyens utilisés pour les atteindre par un réseau de moyens-fins (Keeney, 1996), une méthode utilisée sous la pensée axée sur les valeurs (VFT).	Réseau de moyens-fins représentant schématiquement les objectifs de planification spatiale des IVB et les connexions entre eux
		3 : Identifier les objectifs valorisés par des parties prenantes pour l'intégration à un OAP SIG-ADMC de planification spatiale des IVB en milieu urbain	Deux ateliers de co-création et de validation des objectifs avec 37 parties prenantes, basés sur des activités telles que des remue-méninges individuels et des discussions en sous-groupes et en plénière.	Liste maîtresse d'objectifs améliorée et orientée sur les valeurs des parties prenantes consultées
		4 : Structurer les objectifs dans un cadre facilement intégrable à l'OAP SIG-ADMC SSANTO	Organisation des objectifs en hiérarchies d'objectifs (Eisenführ et al., 2010), une méthode utilisée sous la pensée axée sur les valeurs (VFT). Les hiérarchies d'objectifs comprennent des objectifs principaux, des sous-objectifs et leurs attributs mesurables pour (A) les petits systèmes (biorétention, systèmes d'infiltration et noues) et (B) les grands systèmes (marais artificiels et étangs/lacs).	Deux hiérarchies d'objectifs avec huit à neuf objectifs principaux et 19 à 21 sous-objectifs organisés selon les deux perspectives d'adéquation spatiale, les opportunités et les besoins des sites.
		5 : Opérationnaliser les objectifs des hiérarchies afin de les rendre mesurables par des attributs	Entretien de groupe en ligne (1) et sessions individuelles ou en petits groupes d'entrevues (10) avec des experts pour identifier des attributs mesurables pour chaque objectif des hiérarchies.	28 à 36 attributs pour mesurer l'ensemble des objectifs des hiérarchies.
		6 : Collecter les données géospatiales associées aux attributs mesurables des objectifs	● Recherche dans les bases de données ouvertes (Données Québec, Données ouvertes Montréal, Statistiques Canada, Communauté Métropolitaine de Montréal, INSPQ). ● Prise de contact avec les municipalités partenaires pour l'accès à des données géospatiales non disponibles en accès libre.	Base de données géospatiales pour deux études de cas municipales.

Tableau 3.5 Résumé des étapes suivies, la démarche entreprise et les résultats produits pour mener le projet de recherche (suite)

Article	Étape ADMC	Étapes	Démarche	Résultat produit
Article 1	Obtention des préférences intra-objectifs	7 : Définir les échelles de valeurs des attributs mesurables afin de traduire la performance des sites aux différents objectifs des hiérarchies	● 12 consultations en ligne avec 17 experts pour transformer les valeurs brutes des attributs des objectifs en une échelle commune de 0 à 1; les échelles de valeurs. ● Utilisation de la méthode de notation directe (Eisenführ et al., 2010) pour définir les échelles de valeurs des attributs de type « catégorique » et « booléen » et la méthode de bissection (Eisenführ et al., 2010) pour les attributs « continus » et « distance à ».	56 échelles de valeurs définies avec les experts pour 21 objectifs.
	Structuration du problème	8 : Finaliser les hiérarchies d'objectifs	Validation finale des hiérarchies d'objectifs en sollicitant les commentaires des 37 participants des ateliers de co-création et validation des objectifs (étape 3) par courriel électronique.	Deux hiérarchies d'objectifs finales pour deux groupes d'IVB, avec trois niveaux d'information : les objectifs principaux (8 à 9), les sous-objectifs (19 à 21) et les attributs (28 à 36).
Article 2	Obtention des préférences inter-objectifs	9 : Obtenir les préférences inter-objectifs (pondérations) de parties prenantes pour trois groupes d'IVB : (A) les petits systèmes (biorétention, systèmes d'infiltration et noues), (B) les grands systèmes (marais artificiels et étangs/lacs) et (C) les arbres urbains	● 5 ateliers de pondération en ligne avec un total de 29 participants pour 2 cas études de cas. ● Utilisation d'un logiciel de pondération en ligne basé sur la méthode de pondération Swing, *ValuePreferences* (Aubert & Masson, 2021).	Questionnaires de pondération des objectifs complétés : ● 24 pour l'étude de cas préliminaire pour la perspective d'adéquation des besoins (12) et pour la perspective des opportunités (12) ● 27 pour l'étude de cas principale pour les petits systèmes (A) pour la perspective d'adéquation des besoins (13) et questionnaires pour la perspective des opportunités (14) ● 28 pour l'étude de cas principale pour les grands systèmes (B) pour la perspective d'adéquation des besoins (14) et questionnaires pour la perspective des opportunités (14) ● 22 pour l'étude de cas principale pour les arbres urbains (C) pour la perspective d'adéquation des besoins (11) et questionnaires pour la perspective des opportunités (11)
		10 : Identifier les objectifs les plus importants et les moins importants pour les parties prenantes	Représentation des poids attribués aux objectifs par les participants par des graphiques boîtes à moustache, séparément pour les objectifs de niveau supérieur et de niveau inférieur.	12 graphiques boîtes à moustache montrant l'étendue des poids par objectif de niveau supérieur (6) et niveau inférieur (6) pour chaque perspective d'adéquation et 3 groupes d'IVB.

Tableau 3.5 Résumé des étapes suivies, la démarche entreprise et les résultats produits pour mener le projet de recherche (suite)

Article	Étape ADMC	Étapes	Démarche	Résultat produit
Article 2	Obtention des préférences inter-objectifs	11 : Identifier le niveau de consensus par objectif entre les parties prenantes	● Calcul du coefficient de variation (CV) (Everitt & Skrondal, 1998) des poids des objectifs, utilisant l'écart-type et la moyenne des poids attribués à un objectif par tous les participants.	Tableau des coefficients de variation de chaque objectif, pour trois groupes d'IVB.
		12 : Comparer les paires de parties prenantes sur leur niveau d'accord ou de désaccord sur l'ensemble d'objectifs	● Calcul du coefficient de corrélation de Spearman, avec les seuils définis par Dancey and Reidy (2004) pour comparer des participants deux à deux vis-à-vis de la similitude générale des poids attribués à l'ensemble d'objectifs.	Des matrices de corrélation de Spearman montrant chaque paire de participant et le degré de corrélation entre leurs préférences pour l'ensemble des objectifs, pour 3 groupes d'IVB.
		13 : Étudier les relations entre les préférences des parties prenantes et leur rôle professionnel, leur type d'organisation professionnelle et leur parcours académique	Analyses qualitatives sur le classement des objectifs par les participants individuels et leurs caractéristiques professionnelles et académiques. Le classement des objectifs des participants individuels a été déduit de leur pondération des objectifs via la méthode de pondération swing (étape 9).	Trois tableaux comparatifs où le classement des objectifs de chaque participant d'une même catégorie de rôle professionnel, de type d'organisation professionnelle et de parcours académique sont présentés côte-à-côte.
Article 3	Validation de l'OAP SSANTO	14 : Générer des échantillons des paramètres d'entrée de l'OAP SSANTO	Utilisation de la méthode des séquences de Sobol (Sobol, 1967) pour la production d'une matrice d'échantillons de chaque paramètre d'entrée varié de l'OAP SANTO pour J simulations $J = (k + 2) * N$	Une matrice d'échantillons des paramètres d'entrés de SSANTO, contenant : ● les poids des objectifs normalisés de 0 à 1 ● le paramètre d'additivité de la fonction d'agrégation (γ) ● les paramètres de courbure (c) dictant la forme des échelles de valeurs.
		15 : Propager les incertitudes dans l'OAP SSANTO	Analyse d'incertitude (AI) avec des simulations Monte Carlo (SMC).	4 cartes de géostatistiques : adéquation moyenne, adéquation spatiale minimale, adéquation maximale et écart-type.
		16 : Quantifier l'influence de différents paramètres d'entrée sur la variabilité des cartes d'adéquation spatiale de l'OAP SSANTO	Analyse de sensibilité (AS) avec la méthode de décomposition de la variance (Saltelli et al., 2010b) basée sur Sobol (Sobol, 1967).	Calcul de 2 indices de sensibilité par paramètre d'entrée varié de l'OAP SSANTO, produisant 44 cartes de sensibilité, soit une par paramètre d'entrée et une par indice de sensibilité.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : CAN WE STOP REINVENTING THE WHEEL IN BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE PLANNING ? USING VALUE-FOCUSED THINKING TO ENABLE TRANSFERABILITY OF A MULTICRITERIA PLANNING SUPPORT SYSTEM

Ce chapitre présente l'article scientifique publié dans *Landscape and Urban Planning* le 19 août 2024.

Can we stop reinventing the wheel in blue-green infrastructure planning? Using value-focused thinking to enable transferability of a multicriteria planning support system

Sandrine Lacroix [a,*], Martijn Kuller [b], Garance Gougeon [a], Justine Petrucci [a], Florence Lemieux-Chalifour [a], Alexandre Rioux [c], Danielle Dagenais [c], Françoise Bichai [a]

[a] *Department of Civil Engineering, Polytechnique Montréal, 2900, boul. Édouard-Montpetit, Montréal, QC, Canada*

[b] *Copernicus Institute of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands*

[c] *Faculté de l'Aménagement, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada*

**Corresponding author email address:* sandrine.lacroix@polymtl.ca (S.Lacroix).

Keywords: Urban planning; GIS-MCDA; Blue-green infrastructure; Suitability mapping; Value-focused thinking

4.1 Highlights

- An objective hierarchy framework for BGI planning is co-developed with stakeholders.
- Value-focused thinking was used to align the framework with stakeholders' values.
- Value scales for objective attributes are elicited to assess BGI site performance.
- The framework and the approach can be transferable for use in other cities.

4.2 Abstract

Strategic planning approaches are essential for addressing the complex and multi-dimensional challenges in selecting blue-green infrastructure (BGI) location. The development of planning support systems (PSS) for BGI siting often lacks a value-based approach with early stakeholder engagement. In this study, we used value-focused thinking (VFT) to adapt and develop a BGI planning support framework to the Canadian urban context, moving towards an objective-driven framework. We provide a hierarchical objectives framework for BGI planning in urban areas, aligned with stakeholder values, with three-level information: higher-level objectives, lower-level objectives and measurable spatial attributes. To assess site performance across these attributes, value scales elicitation was conducted with 17 experts. The engagement of 37 stakeholders in co-creating and validating our objectives set helped identify common concerns and refine our framework, focusing on the most relevant objectives for stakeholders. The VFT approach and the resulting framework can be easily transferred to other cities in Quebec (Canada), but also to other urban contexts looking to optimize BGI site selection to maximize benefits across the multiple functions of BGI and opportunities arising from the urban context.

4.3 Introduction

4.3.1 Background

Blue-green infrastructure (BGI) is increasingly advocated as a complement to conventional grey infrastructure in urban areas, addressing the challenges posed by climate changes and human activities. BGI encompasses interconnected systems of water and green (vegetated) elements that mimic natural processes (Ghofrani et al., 2017). They can offer diverse benefits ranging from environmental to socio-economic aspects. However, the implementation of BGI is often opportunistic, hence lacking strategic planning, and tends to focus primarily on a singular objective, typically centered around stormwater management (Kuller et al., 2021; Matsler et al., 2021; Meerow & Newell, 2017). This limited approach restricts the potential socio-environmental advantages that BGI can deliver to urban communities (Chatzinikolaou et al., 2018; Finewood et al., 2019; Kremer et al., 2016; Meerow & Newell, 2017).

Planning support systems (PSS) integrate geographic information system (GIS) computer-based tools to aid in planning future initiatives within a particular planning context and at a specific scale

(Geertman & Stillwell, 2003). The use of PSS based on multi-criteria decision analysis (MCDA) holds considerable potential for facilitating the strategic selection of BGI locations, over ad-hoc site selection (Ferretti & Geneletti, 2020; Kiker et al., 2005; Kuller et al., 2017; Kuller, Farrelly, et al., 2018). MCDA encompasses structured methods to evaluate decision problems by explicitly considering multiple and often conflicting criteria (Belton & Stewart, 2010). Indeed, the integration of GIS and MCDA is gaining popularity across diverse areas of planning, especially those characterized by spatially related challenges (Biju et al., 2021; Dai et al., 2001; Joerin et al., 2001; Meerow & Newell, 2017). In terms of computational capabilities, GIS-MCDA based PSS offer advantages over paper-based frameworks by reducing the cognitive burden on stakeholders (Jelokhani-Niaraki, 2021b; Keenan, 2006). GIS-MCDA based PSS enable the storage, organization, analysis, and visualization of diverse spatial data (Wang & Zou, 2010), thereby facilitating the management of the substantial information involved in BGI siting decisions (Kiker et al., 2005). From a communication standpoint, GIS-MCDA based PSS contribute to an interdisciplinary and interactive approach by providing easily interpretable outputs, such as maps, which fosters learning and exchanges between disciplines and engagement with citizens in the decision-making process regarding BGI siting (Kambites & Owen, 2006; Star & Griesemer, 1989). Reviews of available GIS-MCDA based PSS for BGI implementation can be found in the works of Lerer et al. (2015), Kuller et al. (2017), and Bousquet et al. (2023).

Over the past few years, those GIS-MCDA based PSS have been developed independently in various locations worldwide, often tailored to specific local conditions (Lerer et al., 2015). A challenge arises from the context-specific nature of these tools, limiting their applicability across diverse contexts (Bagstad et al., 2013; Wu et al., 2020). Furthermore, the majority of GIS-MCDA based PSS are primarily based on a single case study, restricting the exploration of their applicability elsewhere (Bousquet et al., 2023).

Adapting an existing GIS-MCDA based PSS for use in a different context offers several advantages, including leveraging acquired credibility, existing support, and experience, as well as avoiding the costs associated with developing a new one (Street et al., 2019). In the environmental field, the reuse of these tools and their components gained popularity due to the opportunities it presents to focus on other crucial aspects of their development (Kok et al., 2015).

Problem structuring is an essential first step in an MCDA process (Malczewski & Jankowski, 2020). Here, comprehension of the decision problem is enriched by defining constituents like values, objectives, constraints, environment, uncertainties, alternatives, and stakeholders (Belton & Stewart, 2010). It enhances comprehension of intricate decision problems through decision representation and explicit definition of objectives employing methods like clustering or network analysis and incorporating stakeholder incentives (Marttunen et al., 2019). We defined "stakeholders" as those who are affected directly or indirectly by the planning of BGI in the study area or who are key actors in the implementation of BGI in the region, such as decision-makers, BGI planners and representatives of institutions that had an interest in the planning. Structuring through a hierarchical structure allows stakeholders to gain a deeper understanding of decision objectives (Eisenführ et al., 2010). Furthermore, outcomes intricately align with well-defined objectives (Lienert et al., 2022). Until recently, systematic problem structuring has often been overlooked in the development of PSS (Malczewski & Jankowski, 2020) as well as in MCDA itself (Marttunen et al., 2019). Moreover, stakeholder engagement during this stage is frequently limited (Allain et al., 2017; de Brito & Evers, 2016; Jelokhani-Niaraki, 2021b), despite the reported importance of their involvement early in the process (Lupp, 2021). Engaging stakeholders at an earlier planning stage not only benefits the problem structuring phase of GIS-MCDA based PSS development but also has the potential to enhance stakeholder satisfaction regarding BGI implementation (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021; Wilker et al., 2016). A promising methodical approach to address these issues is *value-focused thinking* (VFT) (Keeney, 1996). VFT emphasizes the recognition and explicit integration of stakeholder values and preferences within the decision-making process (Keeney, 1996). Formulating a decision problem around objectives that the stakeholders seek to achieve, as suggested by VFT, is a crucial step for a strategic approach. The application of VFT has gained acceptance in various decision contexts owing to its associated benefits (Françozo & Belderrain, 2022; Marttunen et al., 2019), including environmental decision making (Alencar et al., 2017), while its application to BGI planning has been more sporadic (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021; Trovato & Cappello, 2022). Given the multifaceted challenges inherent in BGI planning, VFT is suggested as a promising approach that can help better structure complex decision problems and manage trade-offs and uncertainties efficiently (Keeney, 1996).

4.3.2 Aim of the study

We aim to use VFT to develop a comprehensive hierarchical framework for BGI strategic planning in urban areas in the Canadian context, leveraging an existing GIS-MCDA based PSS developed in an Australian context. We want to provide researchers and practitioners with a better understanding of the implications associated with adapting an existing GIS-MCDA based PSS, while adhering to a structured methodology that empowers stakeholders as the driving force. We focused on the following aims: (1) defining and organizing BGI planning objectives within a hierarchically structured framework, (2) validating and completing the objectives set according to stakeholder values, and (3) operationalizing the established objectives by determining the associated attributes and performance measures (value scales) for each objective through the engagement of experts. We defined "experts" as those who have a specific knowledge about phenomena related to BGI implementation. It should be noted that some of the experts consulted are also stakeholders, involved in that specific step of the development for their knowledge. The developed framework encompasses the underlying structure of GIS-MCDA based PSS inputs, including the set of objectives, measurable attributes, spatial datasets, and value scales. The objectives-based framework is integrable into the GIS-MCDA based PSS.

Our research is intended as a step towards an increased transferability of BGI planning frameworks to different urban and climatic contexts, fostering potential benefits in terms of increased resource efficiency and improved connection and exchange within the fast-growing community of BGI planners. Integrating a value-based focus into the design of GIS-MCDA for BGI planning steers away from the common practice of opportunistic inclusion of objectives driven by data availability (Ferretti & Montibeller, 2016), and towards the selection of objectives based on their explicit connection to fundamental stakeholder preferences. We anticipate enhancing the alignment of objectives with core values and enabling more robust and appropriate decision-making in BGI planning processes.

4.4 Methodology

Figure 4.1 summarizes our methodology based on VFT (Keeney, 1996) to develop a BGI planning hierarchical framework to a different urban context from where it was initially developed. We followed the key steps of VFT outlined in previous research (Alencar et al., 2017; Françozo & Belderrain, 2022; Parks et al., 2022), which involve validating and refining the framework based

on stakeholder[2] values and expert[3] knowledge. The adaptation process was undertaken within the regional urban context of Quebec, Canada. We used two case studies: a medium- sized city (case study 1; City of Trois-Rivières) and a large metropolis (case study 2; City of Montreal), while intending for the framework to be applicable to most municipalities across the province of Quebec.

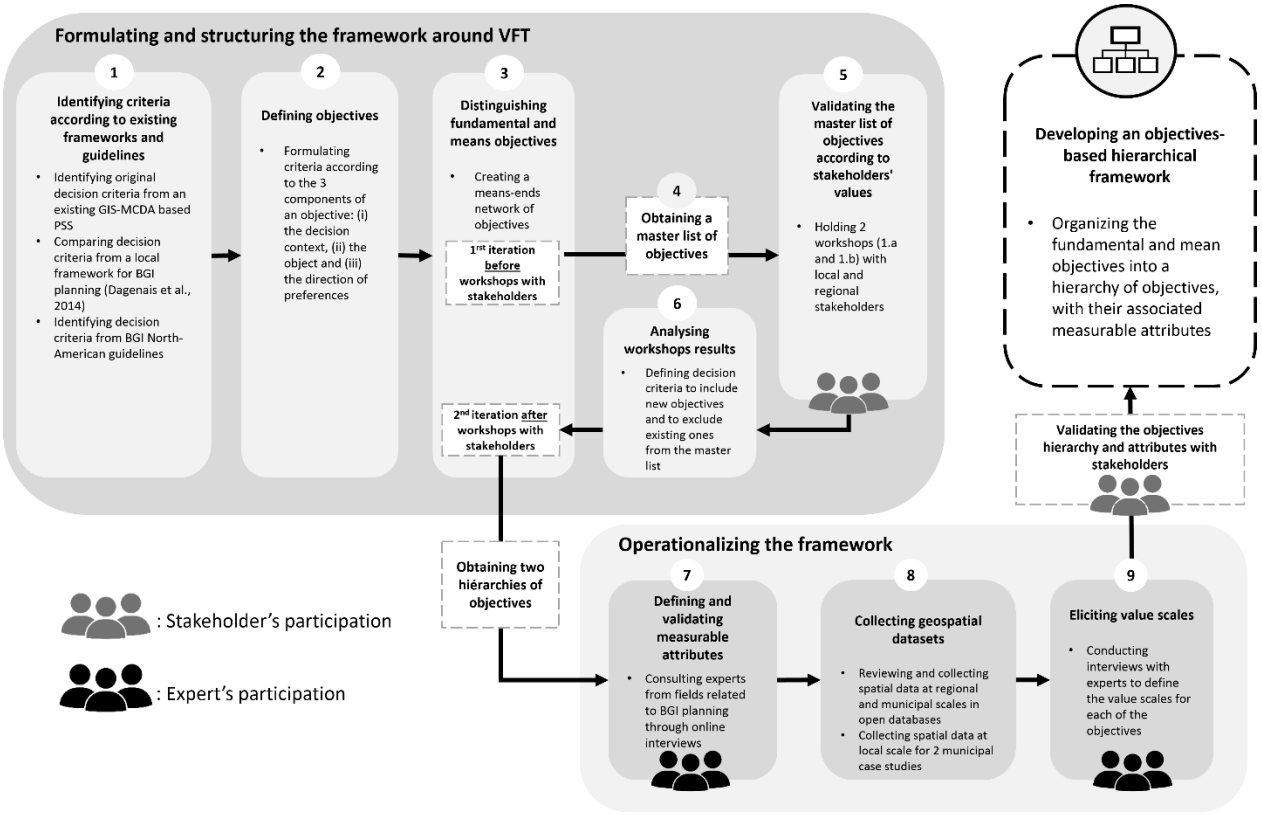


Figure 4.1 Representation of our methodology based on VFT

4.4.1 Original Australian GIS-MCDA based PSS for BGI planning

We based our adaptation process on an existing GIS-MCDA based PSS for BGI planning (Kuller et al., 2017) named Spatial Suitability ANalysis Tool (SSANTO; Kuller et al., 2019) and developed and tested in Melbourne, Australia. Its framework is divided into two suitability perspectives: (1) the opportunities offered by a site for BGI implementation, namely the favorability of site characteristics for BGI operation (referred to later as "opportunities") and (2) the needs of a site for

[2] Stakeholders were representing an institution with interest in the planning from municipalities, provincial governments, and regional and local organiza tions like non-profit organizations and research services.
[3] Experts were involved for their specific knowledge and were from aca demic, municipal, public organizations, research institute and private firm.

the potential benefits (ecosystem services, such as supporting, provisioning, regulating and cultural services) derived from BGI (referred to later as "needs") (Kuller et al., 2017). We kept these two suitability perspectives to build our adapted framework. The original version of SSANTO GIS-MCDA based PSS examines spatial suitability for an expandable list of seven BGIs: bioretention & raingardens, infiltration systems, swales, ponds & lakes, constructed wetlands, green roofs, and rainwater tanks (see Section D.2.1 for definitions; Appendix D). We chose to focus solely on the initial five BGIs during the redevelopment and adaptation process for Quebec. This decision stems from the distinctiveness of green roofs and rainwater tanks, as they are either not vegetated or do not interact with the built environment in the same way as other types of BGIs. Addressing these systems would require involving different stakeholders and experts than those who manage the other BGI types. Moreover, in Quebec, the selected five systems are the most predominantly used. The integration of green roofs and rainwater tanks will be addressed in later stages of the project development.

4.4.2 Formulating and structuring the framework around VFT

4.4.2.1 Identifying criteria (step 1)

We identified criteria from three main sources: (1) SSANTO's existing spatial suitability framework for BGI planning (Kuller et al., 2017), (2) a local decision tree framework developed and tested in a city in Quebec (Canada) (Dagenais et al., 2014), and (3) Quebec and North American standards and guidelines for BGI implementation (Chesapeake Stormwater Network, 2013; CSA Group, 2018; International Civil Aviation Organization, 2012; MDDEFP, 2011; MDDELCC, 2017; The Prince George's County Maryland, 2007; TRCA/CVCA, 2010). More details about the criteria identification are presented in Section D.2.2.1 (Table D.2.1 shows respective sources of criteria regarded as potential values to formulate into objectives).

4.4.2.2 Defining objectives (step 2)

Converting values to objectives requires three features: (1) a definition of the decision context, (2) an object, and (3) a direction of preference (Ferretti & Montibeller, 2016; Keeney, 1996). Our decision context is to strategically plan BGI implementation in urban areas. For example, one objective could be to "minimize urban heat island (UHI) exposure," with "UHI exposure" as the object and the preferred direction being "lower exposure to UHI is preferable to higher exposure".

4.4.2.3 Distinguishing fundamental and means objectives (step 3)

Objectives can be distinguished into fundamental and means objectives. *Fundamental objectives* are the ends pursued for their own sake by a decision-maker and thus describe what he or she values within a particular decision context, i.e., it has intrinsic importance in a specific decision context (Keeney, 1996). *Means objectives* are the ways to achieve the fundamental objectives, i.e., they are important to fulfil others (Keeney, 1996). For example, *minimizing impermeable surfaces* is a means objective to *minimize sewer overflows*, crucial for *minimizing water pollution* (fundamental). Distinguishing objective types allows to avoid inclusion of "false" objectives and to reduce confusion with other decision elements (e.g. alternatives, constraints, targets, etc.) (Keeney, 1996). Means-ends networks aid MCDA problem structuring by qualitatively depicting relationships between objectives, clarifying objectives, minimizing potential overlap, and highlighting complementarities and redundancies (Eisenführ et al., 2010; Gregory & Wellman, 2001; Keeney, 1996; Marttunen et al., 2019).

We developed two separate means-ends networks for BGI planning objectives, organizing them into "opportunities" and "needs". We integrated all the objectives of the five BGI types. In each network, we grouped similar objectives by themes. These themes helped us identifying fundamental objectives. We used the "why is it important?" test recommended by Keeney (1996) to determine whether the objective was fundamental or a means. We made two iterations of the means-ends network: one before developing our master list of objectives to validate with stakeholders (step 5), and another one after the vali dating workshops.

4.4.2.4 Obtaining a master list of objectives (step 4)

Based on the objectives set by the means-ends network, we listed them to obtain our master list of objectives containing a total of 38 objectives, i.e., 19 on the opportunities side and 19 on the needs side, for all of the five BGIs (Table D.2.1; Appendix D). For each objective, we specified in the master list which BGI was concerned. Thus, each individual system type has fewer objectives in the master list than 38.

4.4.2.5 Validating master list of objectives with stakeholders (step 5)

We conducted two in-person workshops (designated as 1.a and 1.b) in January 2023 with the aim of co-defining objectives and validating our comprehensive master list of objectives by involving

37 stake holders. Workshop 1.a held 20 participants from the institutional context relevant to BGI planning, including municipalities (case study 1; City of Trois-Rivières, and case study 2; City of Montreal), provincial governments, and regional and local organizations like non-profit organizations and research services. Workshop 1.b included 17 participants from the more local implementation context across three boroughs in a city of Quebec (case study 2; City of Montreal). We opted for this division into two distinct workshops to ensure a manageable number of participants in each session (see Figure D.1.1, Appendix D).

Both workshops followed the same steps (see Figure 4.2; Section D.2.2.3, Appendix D, for more information about each step of the approach used during workshops 1.a and 1.b). We first introduced the research project to the participants and provided instructions on formulating objectives via the VFT approach using an illustrative example. The instructions encompassed the following conditions: (i) have a preferred direction (e.g. avoid, prioritize, maximize, minimize, improve, reduce, etc.), (ii) have an object, (iii) be approximately six words long, (iv) be measurable by a spatial attribute, (v) have no overlap with their other objectives, and (vi) imply no trade-offs (e.g. cost-benefit or price-quality ratio). To initiate stakeholder engagement in the research activity and to start the discussion on BGIs, we organized a short icebreaker activity in sub-groups. Each participant received at the beginning an identification number to maintain anonymity.

4.4.2.6 Analysing workshop results (step 6)

We conducted an analysis on the outcomes from both workshops (1.a and 1.b) in an Excel file to determine the objectives proposed by stakeholders to be investigated further, i.e., that differed from those in the master list presented to the participants, and the objectives from our master list to be excluded (Tableau 4.1).

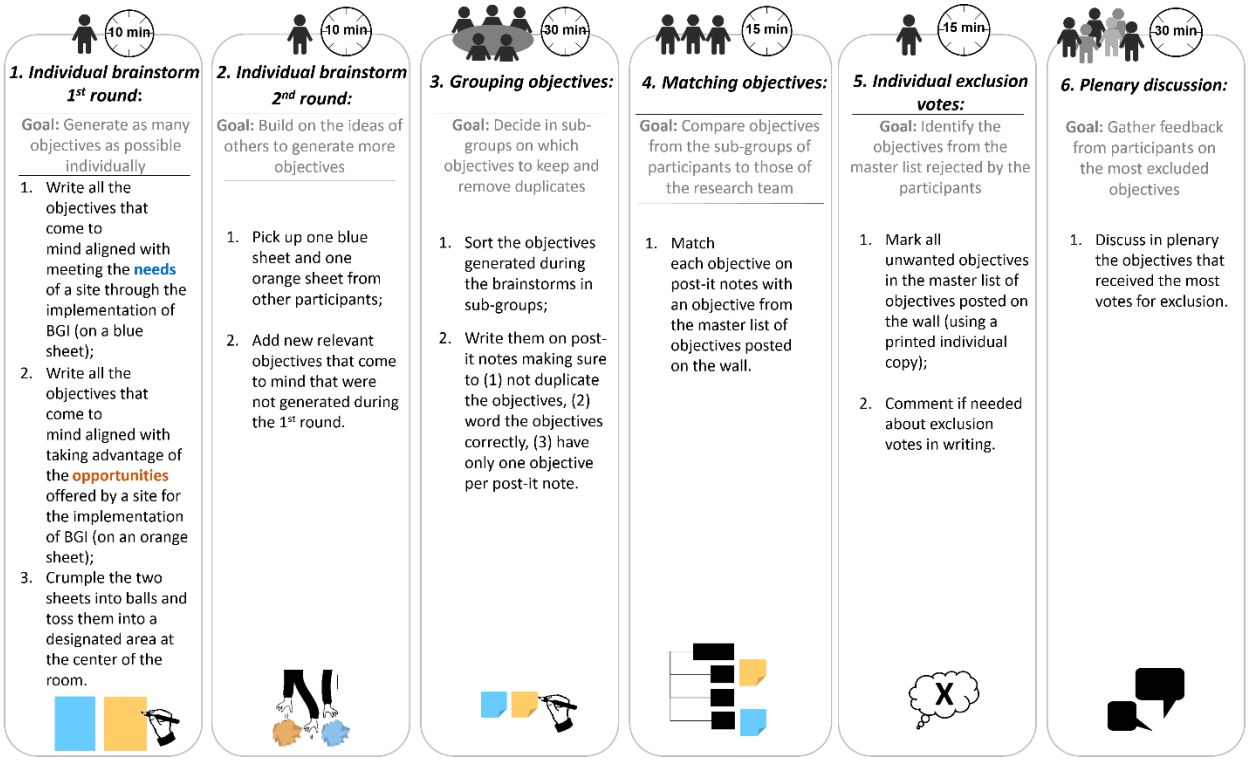


Figure 4.2 Steps of the face-to-face workshops 1.a and 1.b for objectives validation. Approach adapted from Haag, Zürcher, et al. (2019)

Tableau 4.1 Sequence of analyses conducted to select the objectives to be included in the framework based on the results from the two workshops with stakeholders (1.a and 1.b).

Analysis	Description	Purpose
1) Matching objectives from the brainstorms to those of the master list	▪ We associated the objectives generated individually during the two brainstorming steps (steps 1 and 2) with the objectives of our master list.	▪ Identify which objectives from our master list were most supported by individual participants; ▪ Highlight the "new objectives" raised by individual participants.
2) Sorting post-it notes	▪ We reassigned some objectives generated on the post-it notes (steps 3 and 4) to a more similar objective in the master list.	▪ Identify which objectives from the master list were most supported by the subgroup of participants.
3) Compiling comments from participants	▪ We analyzed participants' comments in the master list documents	▪ Highlight ideas for rewording the objectives, for proposed new objectives, or for justifications for excluding objectives.
4) Defining conditions to discuss the exclusion of an objective from the master list	▪ We defined four exclusion conditions, i.e., the objective: 1. Received at least 25% votes for exclusion; 2. Has not been supported by any participant during the individual brainstorm (i.e., no objective similar to the one from our master list was generated by a participant); 3. Has not been supported by any subgroups of participants during the grouping activity (i.e., no objective similar to the one from our master was written down on a post-it); ▪ Is related to system design rather than BGI location choice.	▪ Structure the discussion around the exclusion of an objective from our master list.
5) Defining conditions to discuss the inclusion of a new objective	▪ We defined eight inclusion conditions, i.e., the objective: 1. Concerns a site's need that could be mitigated with BGI or a site's opportunity for BGI; 2. Is measurable by a spatial attribute; 3. Concerns one of the five types of BGI considered in the framework; 4. Has been generated by multiple participants during the individual brainstorming (steps 1 and 2); 5. Has been generated at least by one sub-group of participants during the grouping activity (step 3); 6. Is not a design objective (i.e., the objective concerns the choice of the BGI location rather that its design); 7. Is clear (i.e., not a general objective that covers several other objectives); 8. Is not a means objective to an existing means objective we had. ▪ We first processed with the inclusion by sorting out objectives that did not adhere to our inclusion criteria 1 and 2. We then analyzed the remaining 17 objectives against the additional inclusion criteria.	▪ Structure the discussion around the inclusion of a new objective in the framework.

4.4.3 Operationalization of the framework

4.4.3.1 Defining and validating measurable attributes (step 7)

We consulted 17 experts to proceed with the validation of measurable attributes from the original SSANTO GIS-MCDA based PSS and to identify attributes for new objectives. The experts represented the aca demic sector (9), municipal sector (3), and various professional or representatives from the institutional sector (5) related to BGIs, urban stormwater management, and land use planning. A listing of the experts' fields of expertise can be found in Table D.2.3 (Section D.2.3.1; Appendix D). We conducted one 90-minute group interview with five experts and held 10 individual or small group (up to three experts) sessions, each lasting about an hour. We used Zoom and Webex video conferencing platform to conduct all interviews. For each consultation, we presented the selected objectives to the experts and explored whether the original attributes from the SSANTO GIS-MCDA based PSS could still be applied to the Quebec context, or if new attributes were needed to more accurately measure them, based on their expertise. For new objectives, we discussed the connection between BGI location choices and these specific objectives and inquired about the specific spatial datasets they had in mind.

4.4.3.2 Collecting geospatial datasets (step 8)

We collected a broad set of geospatial datasets (i.e. 79 spatial data layers) to represent the specified attributes, for the two municipal case studies in Quebec, and province-wide (Table D.2.4; Appendix D). We prioritized accessible data from online open-access provincial databases to facilitate future upscaling to other cities across Quebec. Where needed, we supplemented our data with local non-public sources specific to the case- study cities. For the representative case study of a medium-sized city (case study 1; City of Trois-Rivières), 15 data layers were provided by the city directly and 18 could be accessed publicly (out of 33 data layers). For the representative case study of a large metropolis (case study 2; City of Montreal), seven were provided by the city directly, 22 data were publicly available in open databases from the city, and 21 could be access publicly on governmental platforms (out of 50 data layers).

4.4.3.3 Eliciting value scales (step 9)

Value scales translate datasets into a common dimensionless scale, typically ranging from 0 to 1 (Eisenführ et al., 2010; Langhans & Lienert, 2016a). Elicitation of these preferences through a participatory process is recommended (Ferretti & Montibeller, 2016), but rarely done in the context of GIS-MCDA (Allain et al., 2017; Jelokhani-Niaraki, 2021b). We conducted 12 consultations with a total of 17 experts (four of them are the same experts as in step 7 of Figure 4.1) from May 2023 to August 2023, each lasting between two and three hours and involving one to three experts. We carefully selected experts from relevant fields related to BGI planning, considering the cognitive effort and subjectivity involved in constructing value scales (Ferretti & Montibeller, 2016). The experts represented academia (4), the municipal sector (6), public institutions (5), a public organization (1) and a private firm (1). Whenever feasible, we interviewed sub-groups of key experts to integrate diverse preferences and values, fostering exchanges among them to achieve consensus. The complete list of consulted expertise can be found in Table D.2.5 (Appendix D).

We elicited value scales for each attribute measuring our objectives, except for five attributes that were derived from regional guidelines. To reduce the time requirements and be realistic about the availability of experts, we assessed value scales for a subset of two BGI systems, rep resenting small and large systems, respectively: bioretention and con structed wetland. We asked experts whether significant differences existed with the value scales of the remaining three types of BGI rep resented in SSANTO (i.e. infiltration systems, swales, and ponds & lakes), for example in the shape of the value scale or in the maximum/ minimum values, so that the research team could define the value scales after the consultation session.

For continuous attributes (e.g. slope expressed in percentage), we used the bisection method (Eisenführ et al., 2010) to define the value scale as a function, based on Lienert (2019). We ensured graphical representation of the value function for consistency, refining it inter actively with experts until the desired scale was achieved. For discrete attributes (e.g. land use categories), we used the direct method (Eisenführ et al., 2010). More information about both methods used can be found in Section D-2.3.3 (Appendix D).

4.4.4 Developing an objective-based hierarchical framework

We structured our set of objectives into two distinct hierarchies for two BGI groups: (A) bioretention & rain gardens, infiltration systems and swales, and (B) constructed wetlands and ponds & lakes. BGI urban services vary by function and location (Kremer et al., 2016; Kuller et al., 2017), requiring unique planning strategies and thus sometimes different objectives for different types of BGI. The objectives encompass a wide range of considerations, including biophysical, planning and governance, socio-economic and regulating, provisioning, cultural, and supporting ecosystem services. We structured our hierarchies to include 10 to 15 objectives on each of the opportunities and needs suitability perspectives. Each level of a hierarchy should have around 10 objectives (Liquete et al., 2016), as adding more can reduce the impact of each one, increase confusion and potentially introduce asymmetric bias if branches are unbalanced (Liquete et al., 2016; Marttunen et al., 2019).

We shared the hierarchies of objectives with the 37 participants from the workshops (1.a and 1.b) and requested their feedback through mail. This final validation step ensured that the hierarchy aligned with stakeholder values and verified the absence of any undesirable or missing objectives.

4.5 Results

4.5.1 Means-ends network

We created our means-ends network for both suitability perspectives on BGI siting to facilitate the aggregation of objectives, by acknowledging to which fundamental objective it contributes and identifying overlapping ones. In some cases, we combined objectives into a single one considering multiple attributes. For instance, we combined bedrock depth and soil type into a single objective focused on *maximizing water infiltration through existing soils*. In other cases, we decided to remove objectives. In total, we defined nine fundamental objectives (Figure 4.3). Four are in relation to the opportunities offered by a site for the implementation of BGI (opportunities suitability perspective), i.e., *maximize system performance*, *minimize cost*, *minimize conflicts with built environment* and *maximize ease of integration in urban planning*. Five describe a site's needs in terms of ecosystem services provided by BGI (needs suitability perspective), i.e., *maximize biodiversity*, *minimize water resources pollution*, *maximize health and well-being*, *maximize*

environ mental justice and *maximize climate adaptation*. More information about fundamental objectives can be found in Table D.3.1 (Appendix D).

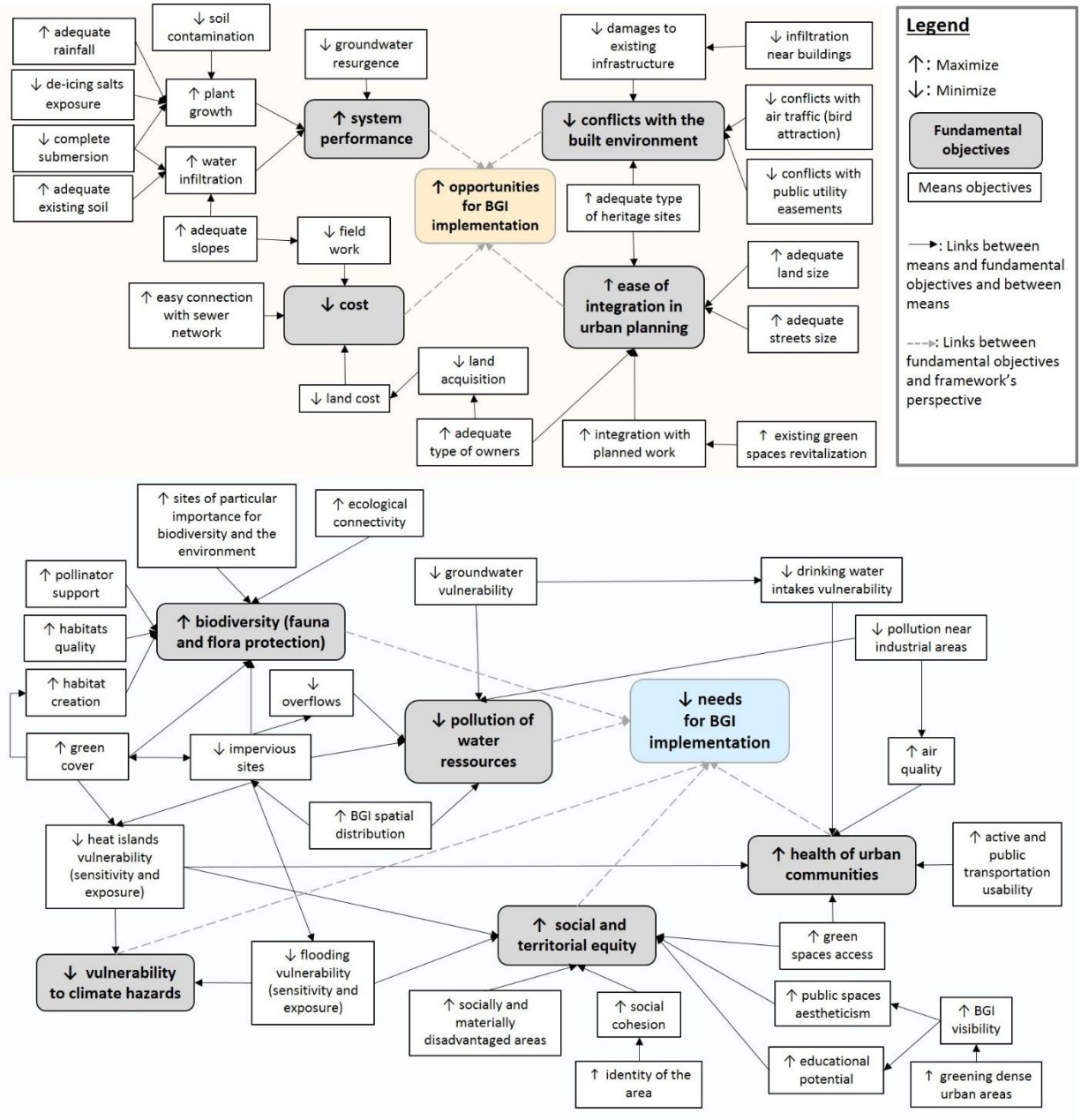


Figure 4.3 Means-ends network supporting the organization of objectives in the proposed hierarchical framework for the siting of BGI (including objectives from the opportunities and needs perspectives)

4.5.2 Master list of objectives

The developed master list of 37 objectives presented to participants in workshops 1.a and 1.b comprised 28 objectives derived from criteria based on the original version of the SSANTO GIS-MCDA based PSS (Kuller et al., 2017), three from Dagenais et al. (2014) framework, two from guidelines and four objectives from complementary projects of the research team (Chalifour-Lemieux, 2023; Gougeon et al., 2023). More information about the development of the master list of objectives can be found in Section D.3.2 (Appendix D; evolution of the master list before and after the workshops 1.a and 1.b in Figure D.3.1 and rationales why certain original criteria of the SSANTO GIS-MCDA based PSS was not included as objectives in the master list in Table D.3.2).

4.5.3 Results of the validation and co-creation workshops (1.a and 1.b)

4.5.3.1 Exclusion of objectives from the master list

The co-creation and validation workshops led to refinements in our BGI planning framework, informed by stakeholder feedback. After these workshops, most of the 37 objectives (11 for opportunities and 20 for needs) remained in the master list. We excluded four objectives from the opportunity's perspective (Figure 4.4). The main exclusion conditions were the percentage of stakeholder votes in favor of exclusion (exclusion condition 1; Tableau 4.1) and the tendency for objectives to be design-related (exclusion condition 4; Tableau 4.1). See Table D.3.3 (Appendix D) for the complete analysis grid and stakeholder rationales. None of the 20 needs-related objectives were excluded. We reclassified two objectives as 'overlay data', i.e. used to provide supplementary information to users by overlaying them on the suitability maps generated by the GIS-MCDA based PSS, without affecting the analysis. With the refinement of our means-ends networks exercises, we combined objectives to prevent over-representation, double-counting or an unbalancing of the number of objectives per branch in our hierarchies. The workshops also provided insights into the objectives predominantly proposed by stakeholders, affirming the necessity of preserving those objectives from our master list, such as reducing vulnerability to floods and heat and prioritizing planned work sites (Figure 4.4).



Figure 4.4 Results from the analysis of master list objectives following the co-creation and validation workshops (1.a and 1.b) with 37 stakeholders. Four possible actions were applied to the objectives of our master list: excluded, converted as an overlay data, combined with another objective, or kept as it was

4.5.3.2 Inclusion of new objectives

We integrated three 'new ideas' proposed by stakeholders as attributes to measure two existing objectives that were already included in our master list: existing green spaces to be redeveloped (objective *3.3_Ease_Works* in Figure 4.5), population density (objective *6.1_Equi_Vis* in Figure

4.5), and presence of bowl areas like streets with bowl-shaped de pressions prone to urban flooding (objective *9.1_Clim_Floods* in Figure 4.5). The complete analysis grid of new ideas proposed by stakeholders can be found in Table D.3.4 (more information on the process of including new ideas can be found in A.3.3.2). We conducted further investigations with experts for five objectives proposed by stakeholders (see Table D.3.5 for insights from discussions with experts), and we ended up integrating two of them as 'overlay data': *maximize parking lots transformation* and *maximize ease of implementation with vacant sites*.

4.5.4 Objective hierarchies for BGI planning

We developed two distinct hierarchies of objectives in our framework according to opportunities and needs of a site for two BGI groups: (A) bioretention & rain gardens, infiltration systems and swales, and (B) constructed wetlands and ponds & lakes (Figure 4.5 and Figure 4.6). Both hierarchies of objectives include a three-level information: higher-level objectives (nine for group A and eight for group B), lower-level objectives (21 for group A and 19 for group B) and the measurable spatial attributes (36 for group A and 28 for group B). They share 14 lower-level objectives and their attributes, which are considered relevant to the planning of all five types of BGI.

With the expert consultations conducted to identify and validate attributes for measuring the specified BGI siting objectives, we retained 14 attributes out of 36 (group A) and 13 attributes out of 28 (group B) from the original SSANTO GIS-MCDA based PSS. A summary of the key insights from the expert discussions is provided in Table D.3.6 (Appendix D).

Four additional overlays are suggested in our framework, namely surface water (flood plains and water bodies), heritages sites, vacant sites (only for group B) and parking lots (only for group A). User warnings (e.g. pop-ups) were also suggested, recommended by experts. For instance, the integration of eco-gentrification as an objective presented challenges due to the potential overlap with areas needing most BGI and those susceptible to gentrification. To address this, experts suggested to integrate a warning alert into the GIS-MCDA based PSS, informing users about the eco-gentrification risk and suggesting solutions for risk mitigation.

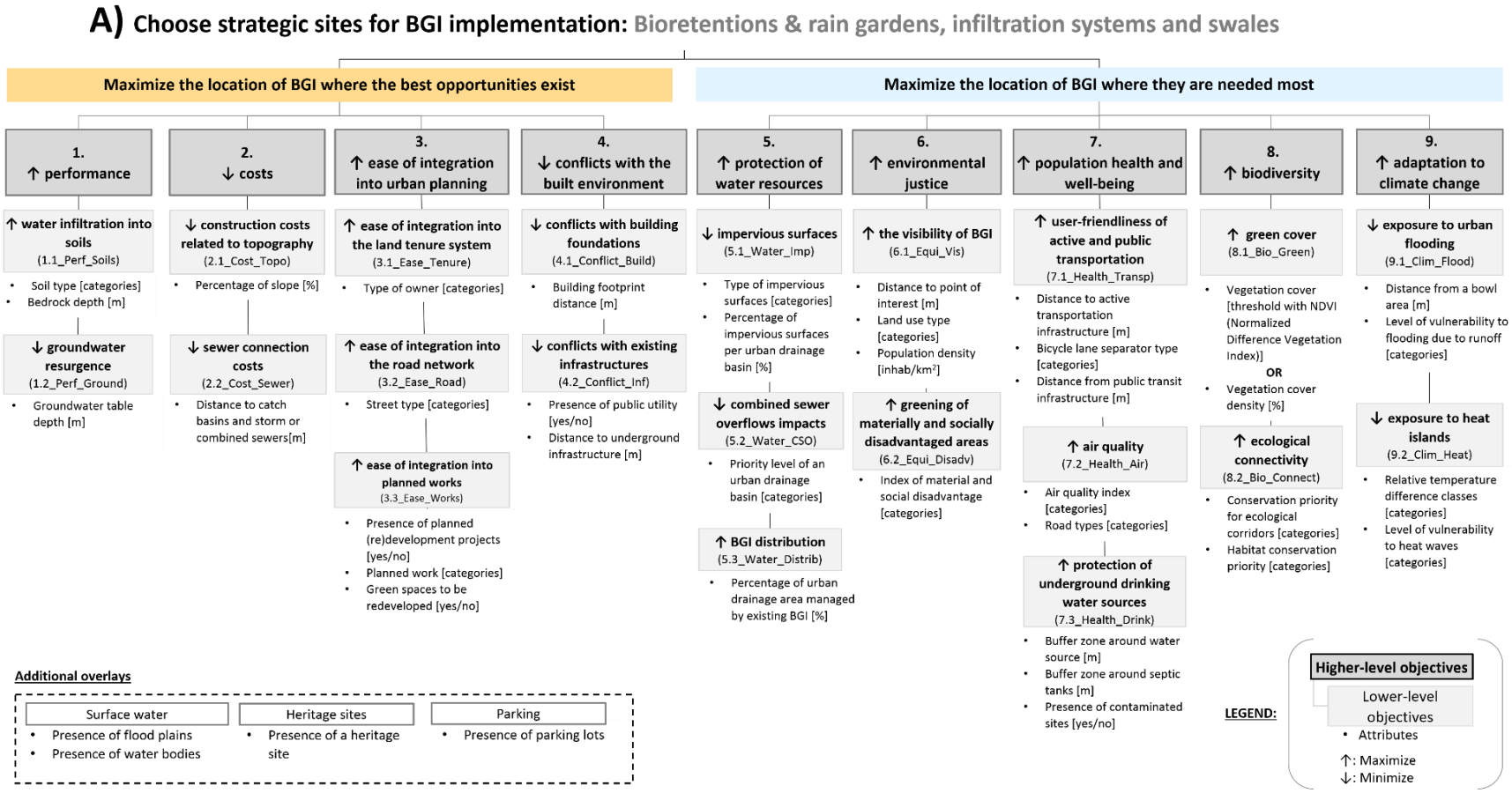


Figure 4.5 Hierarchy-based framework for BGI planning for the opportunities and for the needs perspectives. (A) Hierarchy of objectives for smaller systems mostly based on short-term detention and infiltration: bioretention & rain gardens, infiltration systems and swales

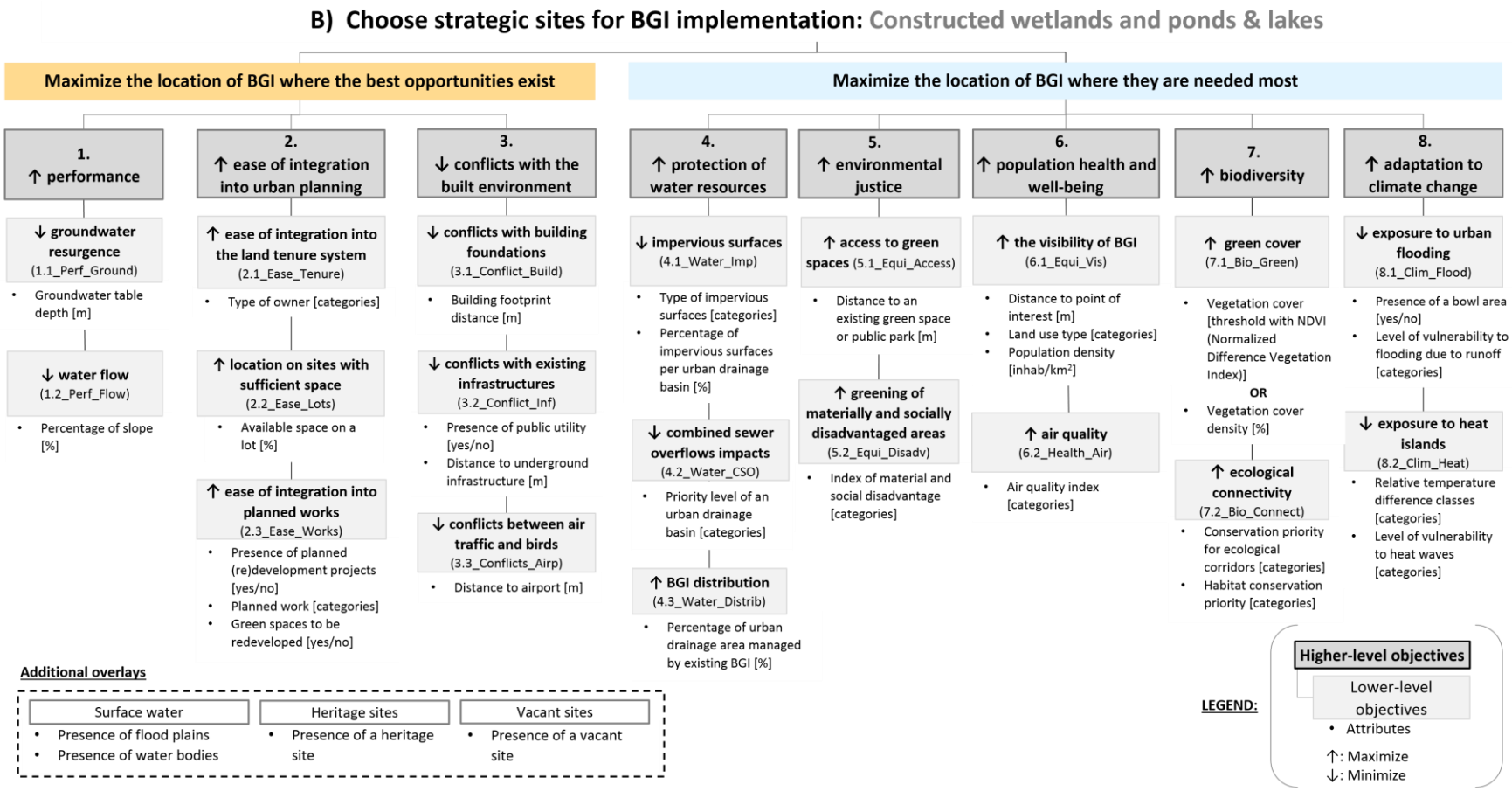


Figure 4.6 Hierarchy-based framework for BGI planning for the opportunities and for the needs perspectives. (B) Hierarchy of objectives for bigger systems with permanent water: constructed wetlands and ponds & lakes

4.5.5 Value scales

We elicited the value scales for 21 lower-level objectives (out of 24 lower-level objectives in total) for two BGI: bioretention and constructed wetlands. In total, we elicited 56 value scales, i.e., 33 for hierarchy of objectives A (Figure 4.5; bioretention & rain gardens, infiltration systems and swales) and 23 for hierarchy of objectives B (Figure 4.6; constructed wetlands and ponds & lakes). For the 22 attributes shared between both hierarchy of objectives A and B, the value scales elicited by experts were the same in 46 % of cases (i.e. 10 attributes). Most of the value scales (83 %) are non-linear (i.e. for categorical attributes, a non-linear value scale has a non-equal leap between category scores). Figure 4.7 shows an example of the resulting elicited value scales obtained for three types of attributes. For the complete resulting elicited value scales, including rationales and additional information provided by the experts, please refer to Table D.3.7 (Section D.3.5; Appendix D).

 # objective | Refers to the numbering presented in the objectives hierarchy frameworks in Figure 5a and 5b
Unit| m: meters; %: percentage
Source | G: Guidelines, [1]: The Prince George's County Maryland (2007), [2]: MDDEFP (2011), [3]: MELCC (2018), [4] : CSA Group (2018), [5]: MDDELCC (2017), [6]: Chesapeake Stormwater Network (2013); Expert's consultation #: Refers to Table SI-3
BGI | BR: Bioretention & rain gardens; IS: Infiltration Systems; S: Swales; W: Wetlands; P: Ponds & lakes
Shape | N-L: Non-linear; L: Linear
Dir | Direction of the value scale; ↑: Positive correlation between attribute value and suitability score, i.e. as attribute value increases, so does suitability score, ↓: Negative correlation between attribute value and suitability score, i.e. as attribute value increases, suitability score decreases.

Attribute information				Value scale information					
# objective	**Attribute**	**Unit**	**Type**	**Source**	**BGI**	**Shape**	**Value scale**		
							Suitability score	**Attribute value**	**Dir**
1.1_Perf_Soils	Soil type	–	Categorical	Expert's consultation A	BR, IS, S	N-L	1	Class 6: sandy (sand, gravel)	–
							1	Class 7: sandy (sand, some gravel)	
							0.5	Classes 1, 2a, 3: mixed sediments (mostly till)	
							0.4	Class 4: clay (clay, silt, some sand)	
							0.1	Class 9: clay (peat, marl)	
							0	Class 5: clay (clay, silt)	
							0	Class 8: clay (clay, silt)	
	Groundwater table depth	m	Boolean	G[1, 2]	All	n/a	1	≥ 3	↑
							0	< 3	
5.1_Equi_Access	Distance to an existing green space or public park	m	Continuous	Expert's consultation D	W,P		1	1200	↑
							0.75	975	
							0.5	750	
							0.25	525	
							0	300	
							0	0	

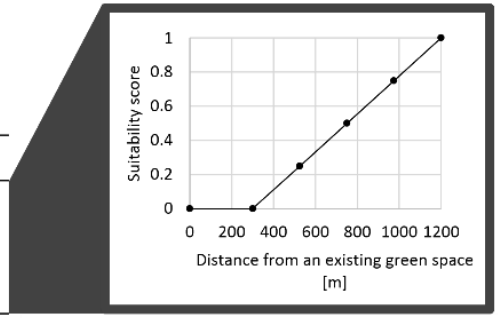


Figure 4.7 Example of value scales obtained for the three types of attributes (categorical, boolean, and continuous) based on the objective, the attribute, and the type of BGI. On the right, an example of the value scale representation for the continuous attribute "distance to an existing green space" is shown. A suitability score of 1 represents the site most suitable for achieving the targeted objective, while a score of 0 represents the least suitable site

4.6 Discussion

In this section, we discuss the implications of transitioning to an objectives-based framework and the use of VFT doing so, including the operationalization of objectives with experts, the usability of the framework in other contexts, as well as its limitations and areas for further research.

4.6.1 Moving towards VFT

4.6.1.1 Objectives-based hierarchical framework

Transitioning from a criteria-based to an objectives-based framework offers a key benefit: clear articulation of value preferences, enhancing user transparency and communication with GIS-MCDA based PSS users. Developing a three-level hierarchy of objectives allowed us to explicitly state the fundamental BGI planning objectives, means for realization and measurable attributes, making it easier for stakeholders to understand how their goals can be reached. The introduction of a direction of preference (i.e. maximize or minimize) for each objective enables to be more precise about the intention of each initial criterion (e.g. instead of soil type we have now '*maximize water infiltration into soils'*).

An objective hierarchy explicitly shows the relationships between high-level objectives (e.g. *maximize biodiversity*) and lower-level objectives (e.g. *maximize ecological connectivity*). Such structure enables stakeholders to later assign their preferences (i.e. weights) to each sub- objective, adjusting them as needed to achieve their overarching goal at the higher level of the hierarchy.

Based on VFT approach, we identified nine main objectives covering around twenty sub-objectives, all of which hold significance in the strategic planning of BGI within urban areas. Employing tools like means-ends networks, we visually represented these objectives, resolving any potential redundancy issues and ensuring a thorough coverage of objectives. This representation was further strengthened by the validation and co-creation of stakeholders.

4.6.1.2 Stakeholder engagement in problem structuring phase

Using VFT, we address a key GIS-MCDA based PSS development limitation: limited stakeholder involvement. Engaging 37 multidisciplinary stakeholders improved our framework's robustness, ensuring inclusivity and reflecting diverse values. This approach stands in contrast with the common reliance on literature reviews (Bach et al., 2015; Kazak et al., 2018; Kuller, Bach, et al.,

2019; Meerow & Newell, 2017; Shojaeizadeh et al., 2021). Here are the four main improvements we observed from early stakeholder engagement in structuring our objectives-based hierarchical framework:

1. **Improved understanding of objectives:** We have extensively reformulated objectives based on stakeholder feedback, ensuring they can now be expressed with "maximize" and "minimize" preferences. Selecting precise terminology was found to be crucial. The terms "prioritize" and "avoid", employed in the previous version of our objectives in the master list, posed challenges: participants considered these terms too strong, overlooking the fact that each objective would be assigned a value scale. At this stage, to "avoid" did not imply to "exclude these sites from potential implementation of BGI". Maximizing objective comprehension is vital for developing clear, concise, and non-redundant objective hierarchies. This was facilitated by the means-ends networks (Eisenführ et al., 2010; Gregory et al., 2012), but greatly supported by the vision of the future user environment.

2. **Identification of stakeholder's key concerns:** Conducting brainstorming activities in the workshops 1.a and 1.b (step 1 or 2; Figure 4.2) ensures the integration of planning objectives aligned with a wide range of stakeholder concerns (Figure 4.4). The two most frequently raised objectives by stakeholders relate to minimizing heatwaves and urban floods. Stormwater management also remains central to stakeholder interests, with a focus on overflows management and impervious surfaces reduction. Stakeholder concerns appear to align with the commonly presented main benefits of BGI (Almaaitah et al., 2021). Additionally, stakeholders express interest in biodiversity objectives such as improved ecological connectivity and green cover. They also emphasized social objectives, including enhancing social and material equity, educational potential, and user-friendliness of active and public transportation. These findings underscore the significance of incorporating social benefits into spatial planning strategies for BGI (Hansen et al., 2019; Meerow & Newell, 2017), which is in line with public values (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021). From an opportunity's perspective, considering planned public works remains a dominant objective for stakeholders. This highlights the enduring importance of the opportunistic approach in stake holders' considerations, as frequently observed in practice (Kuller, Farrelly, et al., 2018). Integrating this reality into the planning strategy allows to make this constraint on BGI planning part of a broader range of objectives.

The relative importance assigned by stakeholders to the different objectives, as based on weight elicitation, is discussed in Lacroix et al. (2025).

3. **Exclusion of unwanted objectives:** Through individual exclusion votes and discussions with stakeholders (step 5 and 6; Figure 4.2), we streamlined our framework by identifying and excluding objectives that were not favored by the majority. Notably, stakeholders exhibited more reluctance towards including objectives related to opportunities within our framework (i.e. the highest numbers of exclusion votes for objectives were observed), resulting in further modifications post-workshops 1.a and 1.b. Opportunity-related objectives, as defined by Kuller et al. (2017), mostly entail constraints, regulations, and the existing environment. This reluctance may be attributed to stakeholder concerns that such a GIS-MCDA based PSS could have a counterproductive effect by discouraging BGI implementation in specific locations. Hence, it is imperative to provide training and raise awareness about the advantages of GIS-MCDA based PSS. For instance, considering de-icing salts used in cold cli mates on roads and sidewalks for BGI location selection in urban areas was seen as a hindrance by stakeholders due to the potential widespread exposure (54.1 % of exclusion votes; Figure 4.4). However, according to Gougeon et al. (2023), a prioritization could be made between roads in industrial areas, snow storage surroundings and roads with pushed snow or parking lots, to enhance BGI performance in cold climate. Similarly, prioritizing areas with sufficient rainfall raised concerns since the cities did not experience difference in rainfall patterns within their boundaries and were thus reluctant to consider it as a distinct objective (51.4 % of exclusion votes; Figure 4.4). Instead, it appears to align more closely with a design objective that can be supported by selecting appropriate plant species.

4. **Identification of new objectives:** Co-creating objectives with stakeholders led to the identification of new ideas. Although these ideas were not necessarily framed as measurable objectives, they prompted the research team to consult additional experts for integration. For example, some stakeholders emphasized the interest to incorporate an objective related to BGI maintenance costs, a known challenge in BGI implementation (Van Neste et al., 2021). Adding this to the planning process could enhance BGI functionality and sustainability while managing budgets. Additional meetings discussed streets with bowl-shaped depressions prone to urban flooding (added as an attribute), parking lots (added as an overlay), social cohesion (identified

as important for further research), upstream BGI implementation to natural wetlands (not retained) and stream rehabilitation (not retained) (see Table D.3.4; Appendix D).

4.6.2 Operationalizing objectives with experts

4.6.2.1 Measurable spatial attributes selection

Engaging experts to discuss on measurable attributes led to modifications, steering us away from a strictly data-driven approach, sup ported by our VFT approach. Consequently, the selected attributes are based partly on existing literature and, importantly, the expert judgment of those actively involved in projects or relevant domains. Occasionally, attributes used to measure objectives in the framework lack available geospatial data for one of the case studies. Integrating these data into the framework may incentivize some regions to produce such information. For Quebec, geo-referencing data such as BGI inventory and cold- climate factors like soil salinity level would improve decision-making in strategic BGI implementation.

4.6.2.2 Value scales elicitation

Eliciting value scales with 17 experts proved to be time-consuming, totalizing 21 hours across 12 distinct sessions. We believe however that the outcomes gained substantial depth due to the involvement of experts from diverse fields including academia, municipal governance, and institutional sectors. We hypothesize that two factors could impact the time-efficiency of the process: (i) the type of value scale, whether continuous or categorical, and (ii) the experts' familiarity with the data upon which the value scales were built. Categorical values scales were quicker, and expert knowledge of data or suitability scores sped up the process.

Feedback highlighted the challenge for experts of focusing on one objective at a time, ignoring other aspects of BGI siting (e.g. determining a value scale for urban flooding management on streets, without considering the available space).

Non-linear value scales were common in expert preferences (i.e. 35 out of 42 value scales of continuous or categorical attributes), high lighting the importance of eliciting all the value scales with experts. As observed in other studies (Langhans & Lienert, 2016a; Zheng et al., 2016), assuming linearity in expert preferences would not accurately represent reality. Sensitivity analysis in GIS-MCDA based PSS could assess the impact of non-linearity on spatial suitability results,

potentially allowing streamlined approaches like rough elicitation or threshold definition (Zheng et al., 2016).

4.6.3 Usability for other urban contexts

The objectives-based framework centers on fundamental BGI planning objectives and means for realization, transcends boundaries and benefits global urban planners and academics to strategically plan BGI implementation in their specific urban contexts. Figure 4.8 shows the transferability of each framework component and recommended precautions for future applications. It is important to emphasize that users of the PSS must maintain a critical mindset regarding the choice of objectives and provided value scales. It may happen that even if the suit ability analysis suggests that a site is not initially favorable for the implementation of BGI, it might be possible to design a solution that is suitable for the site. As such, the use of the tool should not justify limiting the implementation of BGI but rather should support their strategic planning over a given urban area and time.

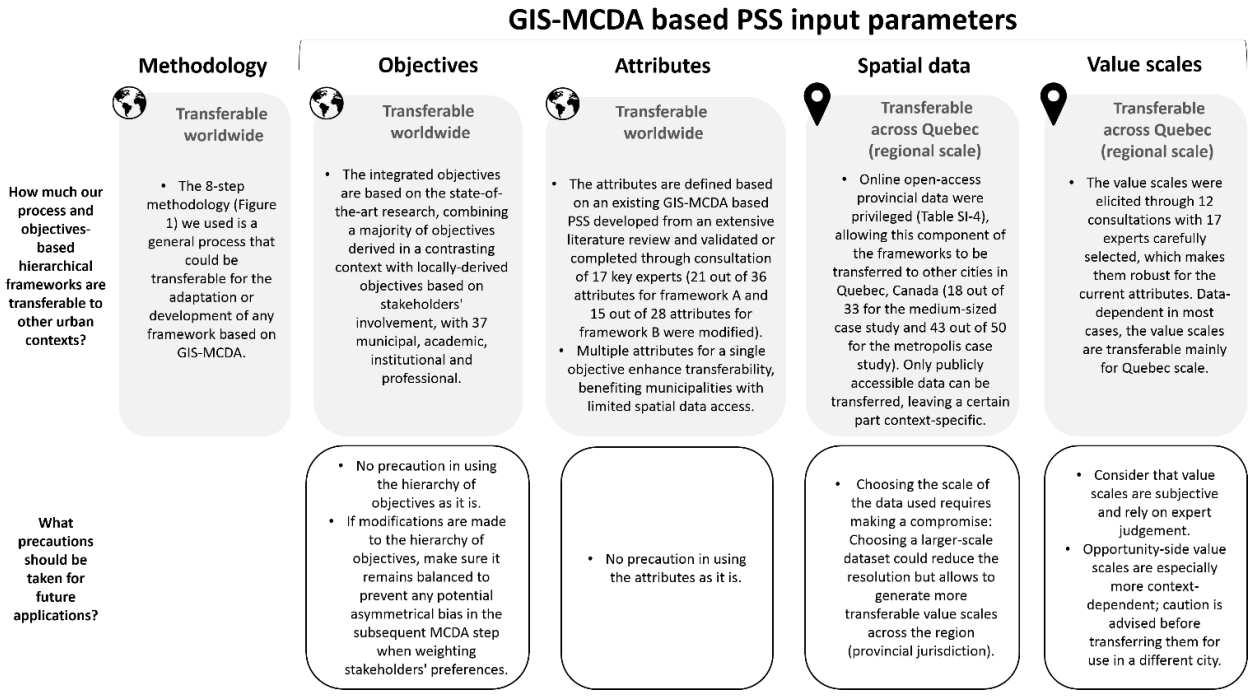


Figure 4.8 Potential transferability of the hierarchical objectives framework components and recommendations for further application to other urban contexts

1. **Methodology:** Our value-focused methodology demonstrates the potential of leveraging existing research on BGI GIS-MCDA based PSS. Building on a previous GIS-MCDA based PSS structure offers benefits in terms of efficient use of available resources and better utilization of knowledge in research and science, while fostering a collaborative climate for collective benefit. Our process can increase the scientific and applicative value of the PSS by refining the decision framework, allowing for iterative improvements, through any spatial suitability framework.

2. **Objectives:** The use of three main different sources to define the BGI planning objectives maximizes the generalizability of the framework to different urban contexts, i.e. an existing GIS-MCDA based PSS (Kuller, Bach, et al., 2019), a local decision-tree framework (Dagenais et al., 2014), various North-American guidelines (e.g. MDDEFP, 2011; MDDELCC, 2017 or TRCA/CVCA, 2010). Involving stakeholders from different scales and fields strengthens the framework's robustness and transferability. Our set of objectives also aligns with those integrated in previous studies on BGI siting (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021; Meerow, 2019). We expect the direct reuse of our objectives hierarchy without any further modifications, but the GIS- MCDA based PSS used allows for additional objectives.

3. **Attributes:** We preserved many attributes from the original GIS- MCDA based PSS SSANTO, validated by experts from targeted do mains. Most attributes are likely transferable to various urban con texts beyond Quebec, Canada. An exception to this would be for the attributes measuring the maximization of ecological connectivity (objective *8.2_Bio_Connect*; Figure 4.5). Both attributes were identified in close collaboration with a biodiversity planning consultancy as part of another research project (Chalifour-Lemieux, 2023), and were developed for the St. Lawrence Lowlands region in Quebec. Despite regional specificity, the methodology for construction of these at tributes can be applied by other cities (Rayfield et al., 2019). Similarly, the attribute for *minimizing combined sewers overflows impacts* (objective *5.2_Water_CSO*; Figure 4.5), is based on a transferable methodology developed in a separate research project (Petrucci, 2025).

4. **Spatial data:** As expected, acquiring spatial data from open-access databases was more complex for the medium-sized case study (City of Trois-Rivières, case study 1) compared to the metropolis (City of Montreal, case study 2). We collected 46 % of spatial data for case study 1

and 14 % for case study 2 from city authorities. In contrast, about 86 % of data for Montreal is available online. Of our framework attributes, 20 can be represented using publicly available data, spanning specific regions or southern Quebec (11 attributes), the entire province (seven attributes), or even the entire country of Canada (two attributes). This opens opportunities for smaller cities interested in implementing our framework for strategic BGI planning. The compiled database (Table D.2.4; Appendix D) provides valuable insights for other cities leveraging the same dataset from open-access data.

5. **Value scales:** Given resource constraints in cities, our aim was to provide default value scales for widespread use in Quebec cities and as adaptable templates beyond. We aimed for transferability, utilizing publicly available provincial-scale data when possible, to simplify future user efforts. Data requests and expert knowledge requirements might hinder the use of GIS-MCDA based PSS (Perosa et al., 2022), and thus simplify the work of future users as much as possible appears crucial. While some value scales are context- specific, such as "ease of tenure" influenced by land ownership (objective *3.1_Ease_Tenure*) due to varying feasibility issues on privately owned versus publicly owned land, others like terrain slope percentage (objective *2.1_Cost_Topo*) are more universal because of the preferred technical values regardless of the city's context. Contextual value scales were prominent for opportunity-related aspects, reflecting city-specific regulations and built environments. A pivotal choice arose during value scale creation, involving the se lection between two methodological paradigms: the utilization of either *relative* or *absolute* value scales (Figure 4.9). To ensure wider applicability, we opted for absolute value scales, i.e. attributes values range regarded are not context-dependant or relative to values observed on the studied urban area, but rather cover the full range of possible values for an attribute.

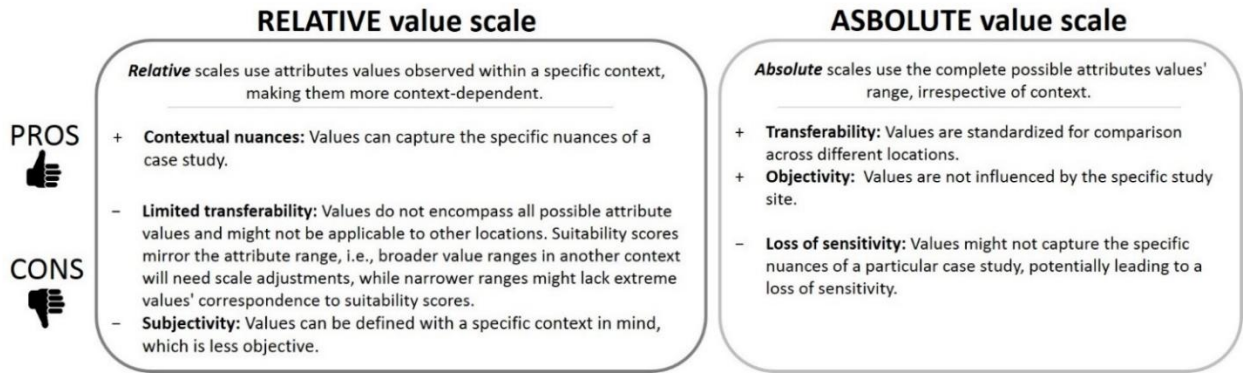


Figure 4.9 Pros and cons of relative vs absolute value scales

4.6.4 Limitations and further research

This study involved stakeholders and experts exclusively from Quebec (Canada), potentially reflecting more regional values. Involving different stakeholders or experts may have yielded different results. Both case study sites were medium to big cities, which facilitated data collection. Future research should extend the framework to smaller cities in Quebec and other Canadian cities to assess transferability and effort required. Despite facing a unique set of challenges, small cities could leverage the framework by fostering communication channels among key stakeholders, and potentially identify missing resources or data. Our value scales elicitation process has two main limitations due to time constraints: reliance on single experts for a few attributes (i.e. for nine attributes) and grouping value scales for small and large BGI sys tems, potentially leading to generalization inaccuracies. To address this, we sought experts' input to assess potential differences among other BGI. In this article, we do not present the entire MCDA process conducted by the research team. The next step involves eliciting stakeholder-based weights for objectives, which could influence the choices on BGI location. Analyzing the GIS-MCDA based PSS's sensitivity to user preferences is crucial, as weights affect model outcomes (Aubert et al., 2020) and their impact on optimal BGI planning outcomes.

4.7 Conclusion

Our study provides a comprehensive objectives-based hierarchical framework for BGI strategic planning (i.e. for bioretention & rain gar dens, infiltration systems and swales, constructed wetlands and ponds & lakes) better aligned with stakeholder values. The framework integrates a three-level

information: higher-level objectives (nine), lower-level objectives (19 to 21) and measurable spatial attributes (28 to 36). Performance assessment of location sites is provided for each measurable spatial attribute, based on value-scales elicitation with 17 targeted experts. This framework can serve as its own to assist practitioners and researchers in optimizing BGI location choices in line with their objectives and be readily implemented in a GIS-MCDA based PSS (e.g. SSANTO; Kuller et al. 2019).

Using VFT offers a systematic approach, enhancing understanding of interrelationships between BGI planning objectives and fostering stakeholder and expert engagement. By making the objectives explicit, we put forward a transparent approach with the future user community and integrate their considerations right from the start of GIS-MCDA based PSS development. Creating an objectives hierarchy and involving potential users in problem structuring phase, is an improve ment compared to the reported method that most GIS-MCDA employed. Involving 37 stakeholders in the collaborative process of co-creating and validating our set of objectives, we obtained valuable feedback that improved the clarity of objectives for future users. This feedback also guided us in refining the framework by concentrating on key concerns and integrating new ideas.

While our study focused on the development and transferability of a specific spatial suitability framework, the adaptation process we followed can serve as a starting point for tailoring spatial planning frameworks for BGI in various locations. It offers potential in resource conservation and optimizing existing GIS-MCDA based PSS. The developed framework aligns with a wide range of stakeholder values and goals, benefiting not only other Quebec cities but also various urban areas, under recommendations. In this way, it facilitates strategic BGI site selection, maximizing potential benefits and local opportunities across urban areas.

Funding sources

This research project has received funding from the ministère de l'Economie, de l'Innovation et de l'Energie du Québec (projets d'innovation sociale), the Fonds de recherche du Québec Nature et technologies [individual grant of the last author, Research Support for New Academics], the Observatoire Ivanhoé Cambridge and CentrEau (individual student start-up scholarship of the first author).

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work the authors used ChatGPT in order to improve readability and language. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

CRediT authorship contribution statement

Sandrine Lacroix: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Martijn Kuller**: Writing – review & edit ing, Validation, Supervision, Software, Resources, Project administration, Methodology, Investigation, Data curation, Conceptualization. **Garance Gougeon**: Writing – review & editing, Investigation, Data curation, Conceptualization. **Justine Petrucci**: Methodology, Investi gation, Data curation, Conceptualization. **Florence Lemieux-Chalifour**: Methodology, Investigation, Data curation, Conceptualization. **Alexandre Rioux:** Investigation, Data curation, Conceptualization. **Danielle Dagenais:** Writing – review & editing, Validation, Supervi sion, Resources, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Data curation, Conceptualization. **Françoise Bichai**: Writing – review & editing, Validation, Supervision, Resources, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisi tion, Data curation, Conceptualization.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

No data was used for the research described in the article.

Acknowledgements

The authors thank the partner cities (City of Trois-Rivières and City of Montreal) for sharing data and expertise as well as all experts and stakeholders who participated in the process in this study. We also thank Alexis Guillemard and Hélène Madenian for their help in organizing workshops. This project has been the subject of an ethical assessment (ethical certificate number: CER-2021-44-D) by Polytechnique Montréal, Canada, with recognition from the University of Montreal,

Canada (ethical certificate number: CERAH-2021-053-R) and the National Institute of Scientific Research, Canada (ethical certificate number: CER- 22-688).

Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at Annexe D or

https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105188

CHAPITRE 5 ARTICLE 2 : UNCOVERING STAKEHOLDER PREFERENCES FOR URBAN BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE SITING : INSIGHTS FROM ONLINE SWING WEIGTHS ELICITATION

Ce chapitre présente l'article scientifique soumis dans *Cities* le 23 janvier 2025, en cours de révision depuis le 25 août 2025.

Uncovering stakeholder preferences for urban blue-green infrastructure siting: Insights from online swing weights elicitation

Sandrine Lacroix [a] , Martijn Kuller [b,*], Alice Aubert [c], Danielle Dagenais [d], Françoise Bichai [a]

[a] *Department of Civil Engineering, Polytechnique Montréal, 2900, boul. Édouard-Montpetit, Montréal, QC, Canada*

[b] *Copernicus Institute of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands*

[c] *ZHAW School of Life Sciences and Facility Management, Institute of Natural Resource Sciences, Zurich, Switzerland*

[d] *Faculté de l'Aménagement, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada*

**Corresponding author email address:* m.kuller@uu.nl (M.Kuller)

Keywords*:* Nature-based solutions; urban planning; stakeholder preferences elicitation; GIS-MCDA; swing weights; MAVT

5.1 Highlights

- First use of online swing weight elicitation software in GIS-MCDA in municipal context
- Heat island and flood mitigation objectives are highly important to stakeholders
- Greater consensus on objectives addressing needs vs opportunities of the urban area
- Preferences are personal and not conclusively tied to stakeholder role or background

- Stakeholder preferences revealed a move away from opportunistic BGI planning

5.2 Abstract

Blue-green infrastructure (BGI) location choice requires addressing diverse objectives across environmental, ecological, urban, governance, economic and social domains, necessitating collaborative stakeholder engagement. Integrating stakeholders through preferences elicitation often defaults to single-disciplinary, expert-driven approaches, constrained by the silos typically present in practice. The primary aim of this study was to understand stakeholder priorities for BGI spatial planning objectives across three BGI groups: small systems (bioretention, infiltration systems, and swales), large systems (constructed wetlands and ponds/lakes) and urban trees, while the secondary aim was to test and advance a structured preference elicitation procedure using an innovative online swing-weighting software within a GIS-MCDA framework. Across two case studies (a main and a preliminary) in Quebec, Canada, 31 stakeholders from institutional organizations, government agencies, non-profit organizations and research services from various backgrounds, participated in five online workshops providing weights on an objectives-based BGI suitability framework. High-level priorities were broadly consistent across BGI groups, with strong consensus on needs-related objectives (i.e. addressing site-specific needs that can be fulfilled through appropriate BGI placement like water management, climate adaptation and heat island mitigation). Divergence emerged particularly for opportunity-focused objectives (i.e. leveraging site-specific opportunities for BGI placement like optimal soil type and planned works), reflecting variation in preferences across BGI types and the operational potential of sites. This research highlights the value of stakeholder-driven approaches in refining spatial planning priorities and demonstrates the utility of preference elicitation methods like swing weights in fostering transparent, participatory decision-making for urban BGI planning.

5.3 Introduction

Blue-green infrastructure (BGI) integrates natural and engineered landscapes to provide multifunctional benefits (Ghofrani et al., 2017). Planning the location of BGI involves balancing diverse objectives, including stormwater management, heat island mitigation, biodiversity enhancement, ecological connectivity and health benefits (Dagenais et al., 2017; Filazzola et al., 2019; Hansen & Pauleit, 2014; Mansor et al., 2012b; Tzoulas et al., 2007).

Engaging stakeholders is essential to effectively address BGI's complex and multifaceted nature and the trade-offs between services and functions (Bush & Doyon, 2019; Hansen & Pauleit, 2014; Jayasooriya et al., 2019). Stakeholders are organized groups of individuals who share a common interest or vested stake in a specific issue (Grimble & Wellard, 1997; Luyet et al., 2012). Involving diverse stakeholders brings representation of distinct priorities, knowledge and expertise (Dhakal & Chevalier, 2017; Ferretti & Montibeller, 2016). This approach is increasingly recognized for maximizing project success, enhancing legitimacy and acceptance in environmental decision-making (Axelsson et al., 2021; Ferretti & Montibeller, 2016; Gregory & Wellman, 2001; Luyet et al., 2012), as well as fostering democratic and collaborative decision-making, enhancing information quality and quantity, decision effectiveness and adaptability (Baker & Chapin Iii, 2018; Gonzalez & Enríquez-de-Salamanca, 2018). Ultimately, stakeholder preferences can directly impact BGI location choices (Chen, Yu, et al., 2010), making it crucial to unravel their variations to understand their implications for BGI spatial planning.

Planning Support Systems (PSS) offer a way to integrate stakeholder preferences while producing accessible outputs that facilitate communication across organizations and groups (Kuller, Farrelly, et al., 2018). GIS-MCDA through PSS helps understand spatial outcomes and trade-offs between multiple objectives (Malczewski, 2006), while MCDA effectively integrates stakeholder preferences (Bousquet et al., 2023). Stakeholder preferences can be included through the relative weighting of each objective or decision criterion, usually on a scale from 0 to 1.

Some studies consider stakeholders' perceptions in BGI spatial planning, but do not use MCDA methods to assign explicit weights to objectives. Citizen perspectives regarding various aspects of BGI to mitigate the impacts of climate change have been studied (Derkzen et al., 2017; Sturiale et al., 2023), as well as citizen preferences for BGI in urban streetscapes (Ligtermoet et al., 2022; Phillips et al., 2023; Van Dongen et al., 2019), yet without utilizing detailed weighting mechanisms like those in MCDA. However, other studies on BGI spatial planning do integrate the weighted preferences of objectives into their analyses, but without stakeholder participation. For instance, Kremer et al. (2016) used current policy and planning priorities in a GIS-MCDA for ecosystem services of urban BGI. Van Oorschot et al. (2021) applied equal weights and weights based on ecosystems capacity for a BGI spatially explicit model. Orta-Ortiz and Geneletti (2023) used an ecosystem services classification translated into weights for nature-based solution types prioritization. Even when stakeholder participant is included, studies rely mostly on academic

expertise, monodisciplinary and technical experts-based methods, specifically that of the research team, without mention of municipal or citizen representatives or the inclusion of private sector professionals (Bousquet et al., 2023; Campbell-Arvai & Lindquist, 2021; Malczewski & Jankowski, 2020). For example, Madureira and Andresen (2014) defined weighting factors through the research team for spatial priority areas towards BGI planning. Similarly, Kuller, Bach, et al. (2019) developed a PSS for spatial suitability of BGI using equal weights and eliciting weight from one to two experts from a planning consultancy firm. Moreover, stakeholder preference studies on BGI often adopt non-spatial approaches. Jayasooriya et al. (2019) elicited stakeholder preferences for BGI type selection in industrial areas, while Ruangpan et al. (2021) elicit stakeholder preferences in a MCDA framework for selecting hydro-meteorological risks mitigation measures at different scales, yet in both cases without GIS implications. We miss studies employing a GIS-MCDA based approach for BGI planning with stakeholder engagement (Bousquet et al., 2023; Kremer et al., 2016). An exception is Meerow (2019) who explored the planning priorities of stakeholders from three American cities concerning BGI spatial planning by eliciting weights through face-to-face meetings, combined with surveys. Yet, this study remained restricted to a limited number of criteria (six) related only to ecosystem services. Furthermore, only rarely has research explored preferences for multiple BGI types at the same time (Phillips et al., 2023), limiting our understanding of variations in preferences according to BGI type.

The literature review highlights that while preferences elicitation seems to be more and more studied. Most studies on BGI planning either overlook explicit weight elicitation, exclude diverse stakeholder participation, rely mainly on academic expertise, adopt non-spatial approaches, or remain limited in scope to a few objectives or BGI types, leaving important gaps in understanding stakeholder preferences in spatial planning. This gap limits our understanding of how diverse stakeholder preferences influence BGI spatial planning decisions.

5.3.1 How to elicit weights from stakeholders?

Challenges persist in GIS-MCDA where several meta-choices are faced, such as deciding how to elicit the subjective preferences and which stakeholders to engage with (Ferretti & Montibeller, 2016). Determining stakeholder preferences is challenging, especially in contexts with multiple stakeholders (Hansen & Pauleit, 2014; Odu, 2019). Expressing preferences is cognitively challenging and prone to various biases (Lienert et al., 2016; Riabacke et al., 2012a). Under the

multi-attribute value theory (MAVT), a prominent approach in MCDA (Keeney & Raiffa, 1976), various weighting methods support stakeholder preferences elicitation. Direct rating, pairwise comparison, swing weights, trade-offs and qualitative translation are all examples of popular elicitation approaches (Ferretti et al., 2014). For a detailed description of weight elicitation methods, see Eisenführ et al. (2010), Németh et al. (2019) and Odu (2019).

MCDA practice in BGI planning often relies on two methods (Bousquet et al., 2023): direct rating (Eisenführ et al., 2010) and pairwise comparison (Saaty, 1977). While direct rating is considered less reliable (Eisenführ et al., 2010), pairwise comparison approaches are cognitively demanding for stakeholders in complex decision contexts with many objectives, due to the high number of pairwise comparisons (Macharis et al., 2004; Zheng & Lienert, 2018).

The swing weighting method (Eisenführ et al., 2010) requires the fewest judgments that stakeholders need to provide during the weighting process (Mustajoki et al., 2005). Another key advantage is that the method is based on attribute ranges, requiring only the specification of extreme values rather than the precise shape of the value scales (Ferretti et al., 2014). When used within a hierarchical structure, it can help minimize equalizing bias, where stakeholders tend to assign similar weights to all objectives (Aubert et al., 2020; Montibeller & Winterfeldt, 2015). Swing weighting method has been used in various environmental contexts, including land use planning (Ferretti et al., 2014), sustainable wastewater infrastructure planning (Aubert et al., 2020; Lienert et al., 2016), forest management (Sironen & Mononen, 2018) and BGI system selection (Casal-Campos et al., 2016; Jayasooriya et al., 2019). We focused on swing weighting method, which is only sparsely used in existing MCDA-based tools for BGI (Bousquet et al., 2023) and, to our knowledge, has not yet been used in GIS-MCDA contexts.

Two recommended best practices for eliciting preferences are facilitated workshops and online questionnaires (Ferretti & Montibeller, 2016). Facilitated workshops allow a facilitator to assist stakeholders. A “well-designed preference measurement” should include a way to ensure that the participants' understanding is sufficient for them to have confidence in their answers (Payne et al., 1999). While rarely reported to date (Aubert et al., 2020; Scholten et al., 2015), online weight elicitation offers many other advantages: reduced time requirement, improved accessibility, widened range of opinions gathered, increased flexibility and increased replicability (Aubert et al., 2020). Asynchronous and online participation of stakeholders (Ferretti & Montibeller, 2016) has

gained relevance during and after the recent COVID-19 pandemic. Combining both approaches could allow for the full benefits, though online questionnaires using swing weighting are rarely reported in practice (Aubert et al., 2020; Aubert et al., 2022).

5.3.2 Research aim

The primary aim of this study is to provide insights into stakeholder preferences for objectives related to strategic BGI spatial planning, with a focus on the weights assigned to each objective. Analyzing these preferences helps uncover the importance attributed to specific objectives, the level of consensus on priorities and variations among stakeholders regarding different objectives. In this context, this study focuses on analyzing stakeholder preferences through weight elicitation to inform strategic BGI spatial planning.

At the same time, we pursue a secondary objective: to advance and test a structured preference elicitation procedure within a GIS-MCDA framework by experimenting with a novel online swing-weighting software.

In doing so, we contribute both empirical insights into diverse stakeholder priorities and a methodological innovation relevant to BGI-related planning problems. Our contribution draws on case studies from online workshops on swing weight elicitation involving small BGI systems (bioretention, infiltration systems, and swales), large BGI systems (constructed wetlands and ponds & lakes) and urban trees. We involved diverse types of stakeholders, including municipalities, the private and professional sectors, non-governmental organizations (NGOs), research sectors and community groups, across various fields. The primary aim addresses the following questions (RQ):

> **RQ1.** Which objectives are more important and less important for stakeholders for strategic BGI planning?
>
> **RQ2.** Which objectives in strategic BGI planning have the most and least consensus among stakeholders in their preferences?
>
> **RQ3.** How do individual stakeholder preferences compare to each other for the complete set of objectives related to strategic BGI planning?

The paper is organized as follows: Section 5.4 describes the data collection and analysis, including case studies details, objective hierarchies, workshop organization and the swing weight elicitation process. Research hypotheses are presented in Table 5.1. Section 5.5 reports the findings on the

importance of objectives, stakeholder weight variability, agreement and stakeholder feedback, with a synthesis of the results provided in Section 5.5.6 . Section 5.6 discusses practical implications, specifically summarized in Table 5.3 (Section 5.6.1), strengths and challenges of the preference elicitation procedure (Section 5.6.2) and limitations and areas for future research (Section 5.6.3).

5.4 Methodology

5.4.1 Context

We elicited stakeholder weights for BGI spatial planning objectives through facilitated online workshops using the swing weighting method applied to two case studies: a preliminary case study (City of Trois-Rivières, a medium-sized city located in Southern Quebec of about 144,472 inhabitants[4]) and a main case study (City of Montreal, a metropolis of about 2,124,865 inhabitants[5]). In both case studies, we used the online software *ValuePreferences* (Aubert & Masson, 2021) to conduct swing weight elicitation during the workshops. The preliminary case study was an initial workshop designed to test the software functionalities and workshop setup, whereas the main case study provided a more comprehensive and grounded process for eliciting stakeholder weights.

5.4.1.1 Stakeholders

We identified main types of stakeholders typically involved in fields related to spatial planning and assessment of BGI, namely based on literature on spatial planning and evaluation of BGI, nature-based solutions, or ecosystem services (Bellamy et al., 2017; Billaud et al., 2020; Goodspeed et al., 2022; Meerow, 2019; Sturiale et al., 2022), on classification and selection of landscapes, BGI types and urban water systems (Jayasooriya et al., 2019; Latifia et al., 2019; LeBrasseur, 2022; Sabbaghian & Nejadhashemi, 2020) and on stakeholder participation in environmental decision-making and perceptions of urban water management and ecosystem services (Skrydstrup et al., 2020; van der Jagt et al., 2019). By incorporating a variety of perspectives, the influence of self-interest (also called strategic bias) on decisions can be reduced (Hämäläinen, 2015; Lienert et al., 2016). Five types of entities that stakeholders could represented were identified: public services, private and industrial sectors, non-governmental organizations (NGOs), research sector and

[4] Total population estimates in 2024 (Ville de Trois-Rivières)
[5] Total population estimates on July 1, 2023 (Ville de Montréal)

community groups. Stakeholders in this study represented a wide range of disciplines, including green spaces and parks, transportation and traffic, water management, engineering, environmental sciences, urban planning, administration, biology, ecology, economics, community activities, climate adaptation, ecosystem services and others. Appendix E.1 presents the detailed list of stakeholders. The specific characteristics of the stakeholders involved in each case study are described below:

- ***Preliminary case study:*** All participants were municipal stakeholders from the City of Trois-Rivières (Quebec, Canada). A municipal liaison helped contact 12 internal stakeholders selected based on their expertise and interest in the project. They were involved in civil engineering (6), road planning (1), environment (1), sustainable development (1), drinking water (1), landscape architecture (1), or public participation (1).
- ***Main case study:*** We contacted 51 stakeholders in Quebec (Canada), including municipal institutions, provincial governments, regional and local organizations, NPOs and research services, aiming to cover a diverse range of professions and expertise relevant to BGI planning. Based on their availability, 20 stakeholders participated in the four facilitated online swing weight elicitation workshops. Participants included ecological planning consultants (1), biologists (3), engineers (4), a community garden manager (1), BGI specialist (1), landscape architect (1), planning consultants (2), scientific consultants and coordinators (4), a food security NPO manager (1), a public works manager (1) and an urban infrastructure project manager (1).

5.4.1.2 Objectives to be weighted

The objectives weighted by stakeholders in this study were developed during earlier phases of the research project. They were structured into hierarchies of objectives consisting of three levels of information, as illustrated in Figure 5.1, with higher-level objectives, lower-level sub-objectives and measurable spatial attributes. During this initial project phase, 17 experts, representing academia (4), the municipal sector (6), public institutions (5), a public organization (1), and a private firm (1), were consulted from May to August 2023 for a total of 21 hours. They helped identify relevant spatial attributes and define their value scales, enabling their normalization onto a common scale from 0 to 1 (Lacroix et al., 2024). The hierarchies of objectives are all structured

into two distinct suitability perspectives, first defined in Kuller et al. (2017), with each perspective forming a complete hierarchy on its own:

- the ***opportunities perspective*** (where are the best opportunities for BGI optimal operation?)
- the ***needs perspective*** (where are the highest needs for BGI benefits?)

Separating needs and opportunities into distinct hierarchies reduces cognitive burden and simplifies preference elicitation when trade-offs between territorial constraints and broader objectives like health, well-being or biodiversity needs are difficult to compare. In addition, this separation offers a conceptual advantage, as the resulting suitability maps convey two complementary but distinct types of information, both of which are essential for planners.

The hierarchies of objectives are inputs for an existing GIS-MCDA PSS named SSANTO (Kuller, Bach, et al., 2019). SSANTO maps suitability for the implementation of BGI in urban areas using stakeholder involvement in decision-making. See Appendix. E.9.1 for a detailed explanation of how elicited weights are integrated into this kind of GIS-MCDA tools. Incorporating stakeholder preferences is essential for strategic urban planning, as it ensures that priorities are reflected in spatial decisions. In MCDA, such preferences are operationalized through weights, value scales and aggregation methods (e.g. the degree of additivity of the model), with this study focusing specifically on analyzing weights as inputs to the decision-support process.

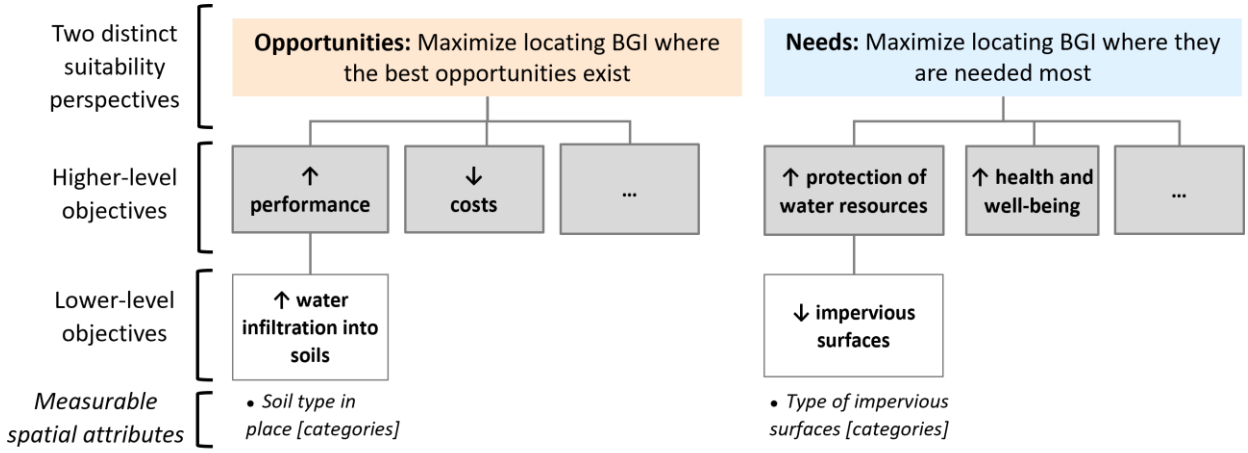


Figure 5.1 Illustrative example of an objective hierarchy according to Lacroix et al. (2024)

Figure 5.2 shows an overview of the composition of the hierarchies of objectives for each case study. The specific characteristics of the objectives weighted in each case study are described below:

- ***Preliminary case study:*** This case study is based on an early version of the hierarchies of objectives from Lacroix et al. (2024). These hierarchies included five higher-level objectives for each of the two suitability perspectives, with 18 lower-level objectives for opportunities and 17 for needs (see Figure 5.2 for the composition of the hierarchies of objectives and Appendix E.2, Fig E.1., for the complete hierarchy of objectives). Weights were elicited for seven BGI types from the original SSANTO PSS (Kuller, Bach, et al., 2019): bioretention cells, infiltration systems, swales, constructed wetlands and ponds and lakes, green roofs and rainwater tanks.
- ***Main case study***: The main case study aimed to elicit stakeholder weights for different BGI types using separate objective hierarchies, covering a broader geographic scope than the City of Trois-Rivières. The main case study is based on the refined hierarchies of objectives presented in Lacroix et al. (2024) and Rioux et al. (2025), which were co-developed with a group of 37 stakeholders in Quebec during a previous phase of the project (see the work of Lacroix et al. (2024) for more details). Many of the stakeholders participating in this study had also been involved in that prior phase, ensuring continuity between the two stages. The objectives were structured into hierarchies of objectives by BGI type and size:
    - BGI group A: one for small systems (bioretention cells, infiltration systems and swales) (Lacroix et al., 2024)
    - BGI group B: one for large systems (constructed wetlands and ponds & lakes) (Lacroix et al., 2024)
    - BGI group C: one for urban trees (Rioux et al., 2025)

The hierarchies of objectives for this case study included three to four higher-level objectives, eight to nine lower-level objectives for the opportunity suitability perspective and 11 to 13 lower-level objectives for the needs suitability perspective, depending on the BGI type (Figure 5.2; see Appendix E.2, Figures E.2.2 and E.2.3 for BGI groups A and B, and Rioux et al. (2025) for BGI group C).

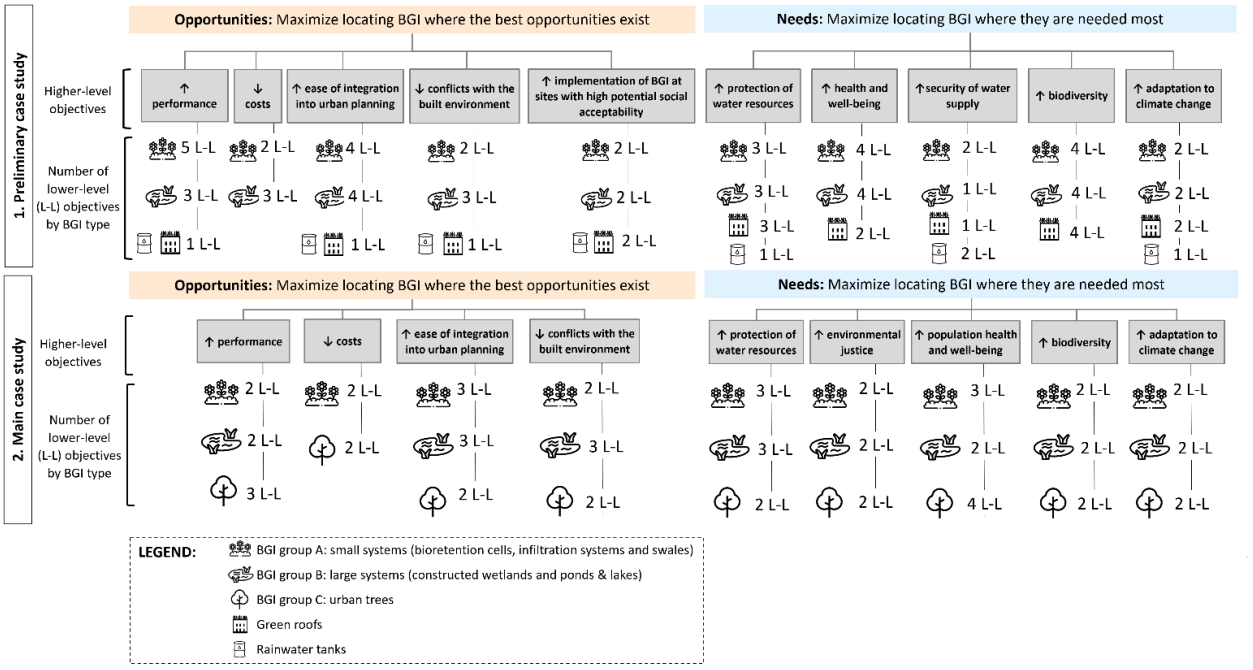


Figure 5.2 Overview of the composition of the hierarchies of objectives, illustrating the possible higher-level objectives (in grey boxes) based on opportunities and needs suitability perspectives and the number of lower-level (L-L) objectives per hierarchy within each branch for both case studies

5.4.1.3 Workshop organization

This study is the first to apply *ValuePreferences* (Version 2.2.11; Aubert and Masson (2021)), a novel online preference elicitation software, in a real-world case, beyond its earlier experimental testing (Aubert et al., 2023; Aubert et al., 2024). This software creates online surveys and can be used interactively in workshops. We adapted the software, originally designed for an MCDA case study, to operate within GIS-MCDA settings. In a GIS-MCDA context, we used it to enter only the objective hierarchy, excluding alternatives (i.e. the different options) and the prediction matrix (i.e. representation of how well each alternative performs for each objective), as the alternatives were all sites (or pixels) within the study area. Appendix E.3 shows screenshots of the software steps and key software features. The specific characteristics of the workshop organization in each case study are described below:

- ***Preliminary case study:*** A single online facilitated workshop was conducted in May 2021 (1.5 hours, in French) via Zoom videoconferencing platform. Two questionnaires were developed in the online swing weight elicitation software *ValuePreferences*, one for each suitability perspective. For the preliminary case study, we created a single combined hierarchy for each suitability perspective encompassing objectives for all seven BGI types, while indicating for each objective which BGI type it referred to. This approach minimized stakeholder time, while still capturing weights for objectives across BGI group A, BGI group B, green roofs and rainwater tanks. The specified BGI type related to the objective was identified under each objectives of the hierarchy. Consequently, for a given objective encompassing various types of BGI, we elicited a consistent weight across all BGI types, without adjusting the weighting based on the specific type of BGI.
- ***Main case study:*** Four online workshop sessions were conducted from July to October 2023 (2 hours each, in French) via the Webex videoconferencing platform. Six questionnaires were developed, separated by suitability perspective (opportunities and needs) and by BGI group (A, B and C). To limit participants' time investment, each stakeholder completed four questionnaires covering two BGI groups. One participant completed all three BGI groups (A, B, C) and one completed only the BGI group A questionnaire for the opportunity perspective.

Figure 5.3 provides an overview of the difference between the two case studies (i.e. preliminary and main).

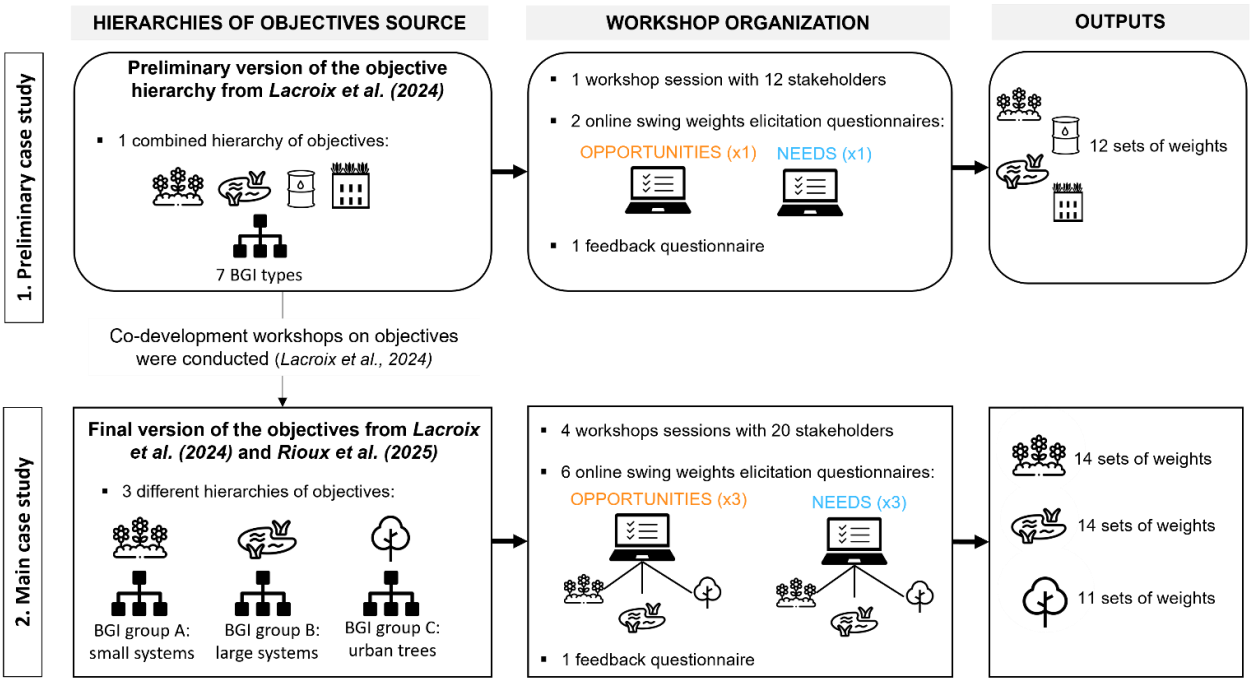


Figure 5.3 Overview of the case studies process, linking the objective hierarchies' sources used to elicit the weights, information about workshops and the outputs of each case study. The dotted lines are steps from past studies and full lines are the steps on which we focus in the present study (on weight elicitation). An example of a higher-level objective is to maximize climate adaptation and a related lower-level objective could be to minimize exposure to heat islands

5.4.1.4 Research hypotheses

Table 5.1 presents the hypotheses associated with each of the research questions that guided our methodology (see Appendix E.4 for more information about the associated hypotheses).

Table 5.1 Research questions, associated working hypotheses and references supporting the formulation of the hypotheses (see Appendix E for detailed explanation of the hypotheses)

Research question	Hypotheses (see Appendix E.4 for detailed information and references)	References
R1. Which objectives are more important and less important for stakeholders for strategic BGI planning?	**H1.1** For opportunities-related objectives, biophysical aspects of BGI (e.g., such as soil type, slope, or impermeability) and planned works will receive higher weights and objectives related to minimizing conflicts with the built environment (e.g. existing underground infrastructures or building footprints) will receive lower weights.	(Kuller, Bach, et al., 2018; Lacroix et al., 2024)
	H1.2 For needs-related objectives, urban heat island mitigation, stormwater management objectives (e.g., urban floods mitigation, overflows mitigation and imperviousness reduction) and social vulnerability reduction will receive higher weights. Ecosystem services as biodiversity objectives and cultural services will receive lower weights.	(Jayasooriya et al., 2019; Kuller, Bach, et al., 2018; Lacroix et al., 2024; Meerow, 2019; Meerow & Newell, 2017)
	H1.3 Weight attribution between preliminary and main case study will differ and reflect contextual challenges of the city.	(Meerow, 2019)
R2. Which objectives in strategic BGI planning have the most and least consensus among stakeholders in their preferences?	**H2.1** Objective weights will differ between stakeholders since the elicitation process is individual and therefore may reflect more individual priorities (no group biases).	(Lacroix et al., 2024; Meerow, 2019; Phillips et al., 2023)
	H2.2 Weights for the objectives we predicted to be of higher importance in H1.1 and H1.2 will be more similar.	
R3. How do individual stakeholder preferences compare to each other for the complete set of objectives related to strategic BGI planning?	**H3.1** There will be no observable trend in weights between pairs of stakeholders.	(Bryan et al., 2010; Kuller et al., 2023)
	H3.2 There will be no clear relationship between preferences and independent variables.	

5.4.2 Data collection: swing weights elicitation

5.4.2.1 Swing weighting method

We used the swing weighting method (Eisenführ et al., 2010) to elicit stakeholder preferences. In this approach, a "null" scenario is first defined, where all objectives are at their worst possible level. For example, to *minimize exposure to heat islands*, the worst level is to plan BGI in locations that are not vulnerable to heat, as these sites are potential cool islands and have less need for BGI

implementation. In our specific case, the best level of objectives for the opportunities suitability perspective indicates an ideal site offering the best opportunity for BGI implementation, while for the needs suitability perspective, it indicates a site strongly necessitating the benefits from BGI implementation. Each objective is then improved individually to its best level and stakeholders rank these scenarios based on which improvements they consider most important. They subsequently assign scores from 0 to 100, reflecting the relative importance of improving each objective compared to the top-ranked one. For hierarchical objectives, weights are elicited within each branch and normalized so that the sum of all lower-level objective weights equals one (Belton & Stewart, 2002; Eisenführ et al., 2010). This method ensures that the final weights capture stakeholders' preferences across multiple objectives while maintaining consistency within the hierarchy. See Appendix E.9.2 for a more detailed explanation of the swing weighting method.

5.4.3 Design of workshops and questionnaires

The workshop structure, including the swing weights elicitation and feedback questionnaires, followed the same format in both case studies (Figure 5.4). The workshops occurred online, while stakeholders remained connected to the videoconferencing platform while completing the questionnaires, with our project team members available to assist them. This approach minimized biases related to task comprehension (Scholten et al., 2015), since without a facilitator, participants might not grasp the decision-making context or the weight elicitation tasks (Aubert & Lienert, 2019).

Details of each step are provided below:

1. **Introduction**: We introduced orally the research project aims and the swing weighting activity, aiming to reduce the cognitive effort from the participants (Aubert et al., 2020; Payne et al., 1999). We provided participants with an example of a swing weights exercise, illustrating how to think in terms of preferences, to enhance their comprehension of the process.
2. **Individual swing weights elicitation questionnaires completion:** We collected first stakeholders' organization, organizational scope, organizational role and field of study. We then elicited individual weights from stakeholders to prevent potential biases arising from group thinking or anticipatory consensus, which could overshadow individual preferences (Scholten et al., 2015). We proceeded from the bottom-up in the hierarchies of objectives,

involving a swing weighting exercise for each branch of the hierarchy of objectives (i.e. initially between lower-level objectives within the same branch) and a swing weighting exercise for higher-level objectives (i.e. between the most preferred lower-level objective of each branch). We systematically presented lower-level objectives along with their associated higher-level objectives, descriptions of measurable attributes and details about the best and worst possible performance levels, including quantitative ranges where applicable. While it is common to define attribute ranges across the full spectrum of values for each objective, any reference points can be used for the worst and best levels (Belton & Stewart, 2002). To improve transferability across different cities in Quebec, we used "absolute" points for the attribute ranges, representing the most and least suitable sites for BGI implementation across study areas with the same dataset (Lacroix et al., 2024). These attribute ranges were determined through consultations with experts in a previous study (Lacroix et al., 2024), with the worst level set at the lowest point (suitability score of 0) and the best level at the highest point (suitability score of 1). For lower-level objectives measured with more than one attribute, we described the best and worst levels with all the attributes at the same level. For the higher-level objectives' swing weights exercise, participants compared their "preferred" lower-level objective for each branch, representing its higher-level objective. The questionnaires took approximately one hour to complete and are available in Appendix E.9.3 (the version provided is a translation of the French version given to participants).

3. **Feedback questionnaire:** We developed a *Google Forms* questionnaire to gather feedback (see Appendix E.9.4), asking participants to rate the exercise difficulty and their understanding on a five-point Likert scale. They could also provide reasons for challenges, suggest additional objectives or provide comments about their experience. In a real-world project involving weighting process, it is essential to implement a mechanism like asking stakeholders about their understanding of the weights and process to identify and address biases or errors (Hämäläinen & Alaja, 2008).

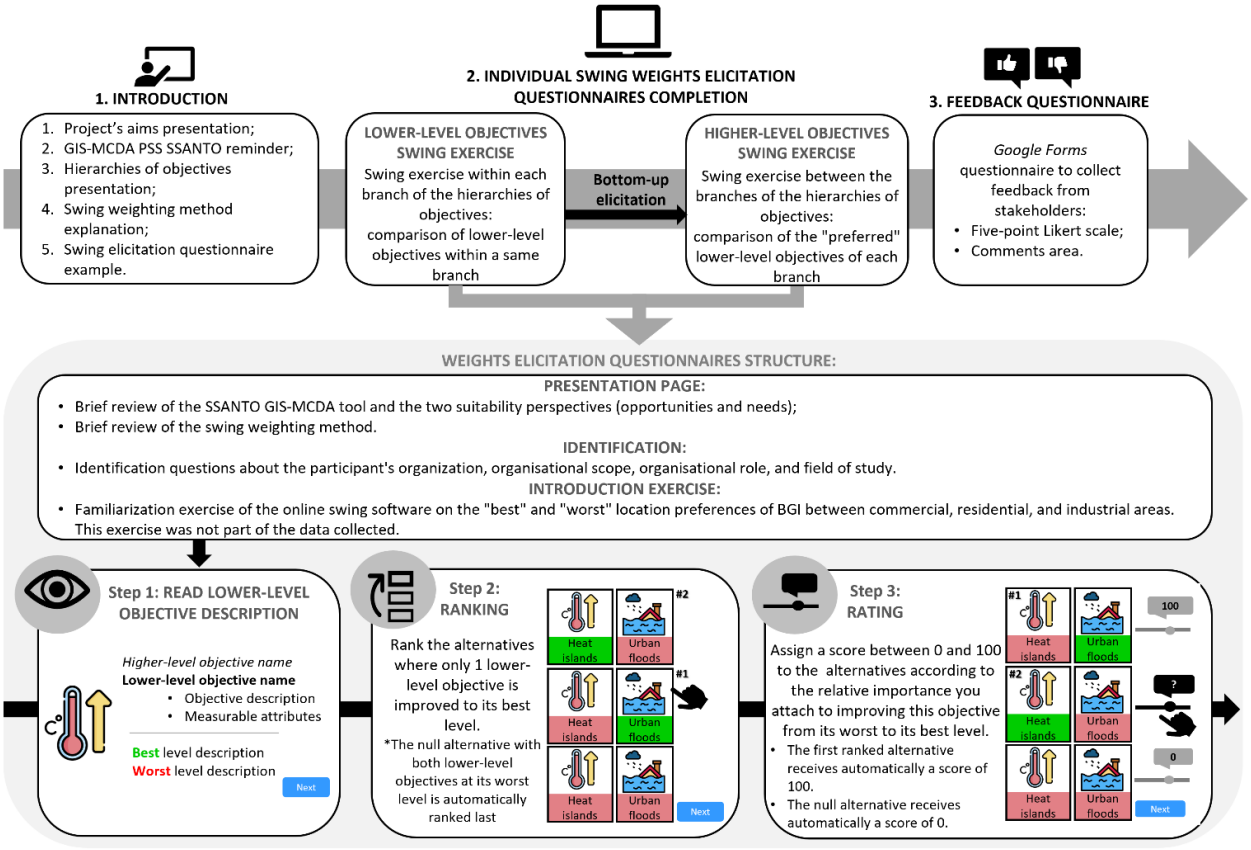


Figure 5.4 Swing weights elicitation workshops sequence

5.4.4 Data analysis

We describe in this section the data analysis for each research question presented in Table 5.1. Table E.2.2 in Appendix E.5 presents the data collected for each case studies.

(**R1**) To analyze the individual weights from stakeholders, we calculated basic descriptive statistics for each lower-level and higher-level objective across all stakeholders and BGI types: mean, median, maximum and minimum values and standard deviation (SD) of weights.

(**R2**) We used the coefficient of variation (CV) (Everitt & Skrondal, 1998) to assess the spread of weights among stakeholders for each objective, using Eq. 5.1:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \tag{5.1}$$

where σ represents the standard deviation and μ denotes the mean. The higher the coefficient ($\geq$0.8), the lower the consensus, whereas the lower the coefficient ($\leq$ 0.5), the stronger the consensus (Jayasooriya et al., 2019). See Appendix E.6 for the interpretation of coefficient of variation CV.

(R3) We conducted a Spearman (ρ) correlation analysis in RStudio Desktop (R Core Team, 2023) to compare swing weights assigned by stakeholder pairs within each suitability perspective (opportunities and needs) for the same BGI group. Interpretation of the results is explained in Appendix E.7. The ρ coefficients vary from +1 to -1, where ρ close to +1 (strong positive correlation) indicates similar weight trends between stakeholders, while a ρ close to -1 (strong negative correlation) indicates opposite trends. We calculated six correlations for the three BGI groups (A, B and C) and the two suitability perspectives, plotting them as boxplots where each data point represents the coefficient for a pair of stakeholders. We also qualitatively examined relationships between stakeholder weights (continuous dependent variable) of lower-level objectives and categorical independent variables. The limited number of participants per independent variable group prevented conducting a quantitative analysis. The independent variables included the type of participating organization, role and field of study of the stakeholders.

5.5 Results

The following sections present the results of the main case study. Results of the preliminary case study are presented in Appendix E.10.1.

5.5.1 Importance of higher-level objectives

Opportunities :

Stakeholders assigned a high weight to the higher-level objective of *maximizing ease of integration in the urban context* for all BGI groups (Figure 5.5). This objective is particularly favored for BGI groups A (bioretention, swales and infiltration systems) and B (constructed wetlands and ponds and lakes), representing the top choice, while it received the second-highest weight for BGI group C (trees). For the preliminary case study (see Appendix E.10.1.1 for the complete results), it was also assigned a high weight by stakeholders (second-highest weight). This indicates a common understanding of the importance of seamlessly integrating BGIs within the existing or developing urban infrastructures facilitating greening.

For smaller BGIs (group A), the objective of *minimizing costs* emerged as the second highest weight of higher-level objectives. For larger space-consuming BGIs (group B), *minimizing conflicts with the built environment* took precedence.

Interestingly, contrary to our expectations on the importance of biophysical aspects, *maximizing performance* was weighted as the least important higher-level objective for both BGI groups A and B, yet considered the most important for group C (main case study). For all BGI groups, we observed the highest standard deviation for this objective, indicating high diversity in weights between stakeholders. Lower-level objectives under *maximizing performance* were very similar for all BGI groups, concerning water infiltration into the soil, groundwater table depth or tree growth for BGI group C (e.g. sunlight and soil type). Conversely for the preliminary case study (Appendix E.10.1.1), *maximizing performance* appeared to be the highest weight assigned by stakeholders for all BGI types combined.

Needs :

The top two higher-level objectives with the highest mean weights are consistent across all three BGI groups examined (Figure 5.5). Stakeholders assigned the utmost weight for the higher-level objective of *maximizing water resources protection* for all BGI groups in both case studies (see Appendix E.10.1.1 for preliminary case study results). In line with our hypothesis, a similar result was observed in previous studies where managing stormwater was identified as the most crucial objectives for stakeholders when implementing BGIs (Jayasooriya et al., 2019; Meerow, 2019; Meerow & Newell, 2017; Ruangpan et al., 2021). *Maximizing climate change adaptation* emerged as the second-highest weighted of higher-level objective for stakeholders across all BGI types.

Maximizing population health emerged as the third most important weighted objective for smaller BGIs (group A) and for urban trees (group C) yet was considered the least important for larger BGI (group B). The lowest weights vary across BGI groups, ranging from *maximizing environmental justice* for BGI group A and to *maximizing biodiversity* for BGI group C. However, it should be noted that the mean weights of the last three objectives (*maximizing health, environmental justice and biodiversity*) remain in a narrow range (i.e. 0.185-0.190). *Maximizing environmental justice* received greater weight for BGI group B compared to smaller systems like BGI groups A and C. This BGI group is recognized for its recreational services and aesthetic value (Alikhani et al., 2021). Similarly, *maximizing community well-being* objectives received the lowest mean weights

from stakeholders of the preliminary case study (Appendix E.10.1.1). Ruangpan et al. (2021) also found the lowest weight attributed to BGI co-benefits such as enhancement of habitats and socio-economic, while improving water quality was considered the most important for stakeholders. *Maximizing biodiversity* received higher weights for BGI group B, which is recognized for fostering diverse biodiversity, including amphibious and aquatic wildlife, due to their water features (Hassall & Anderson, 2015).

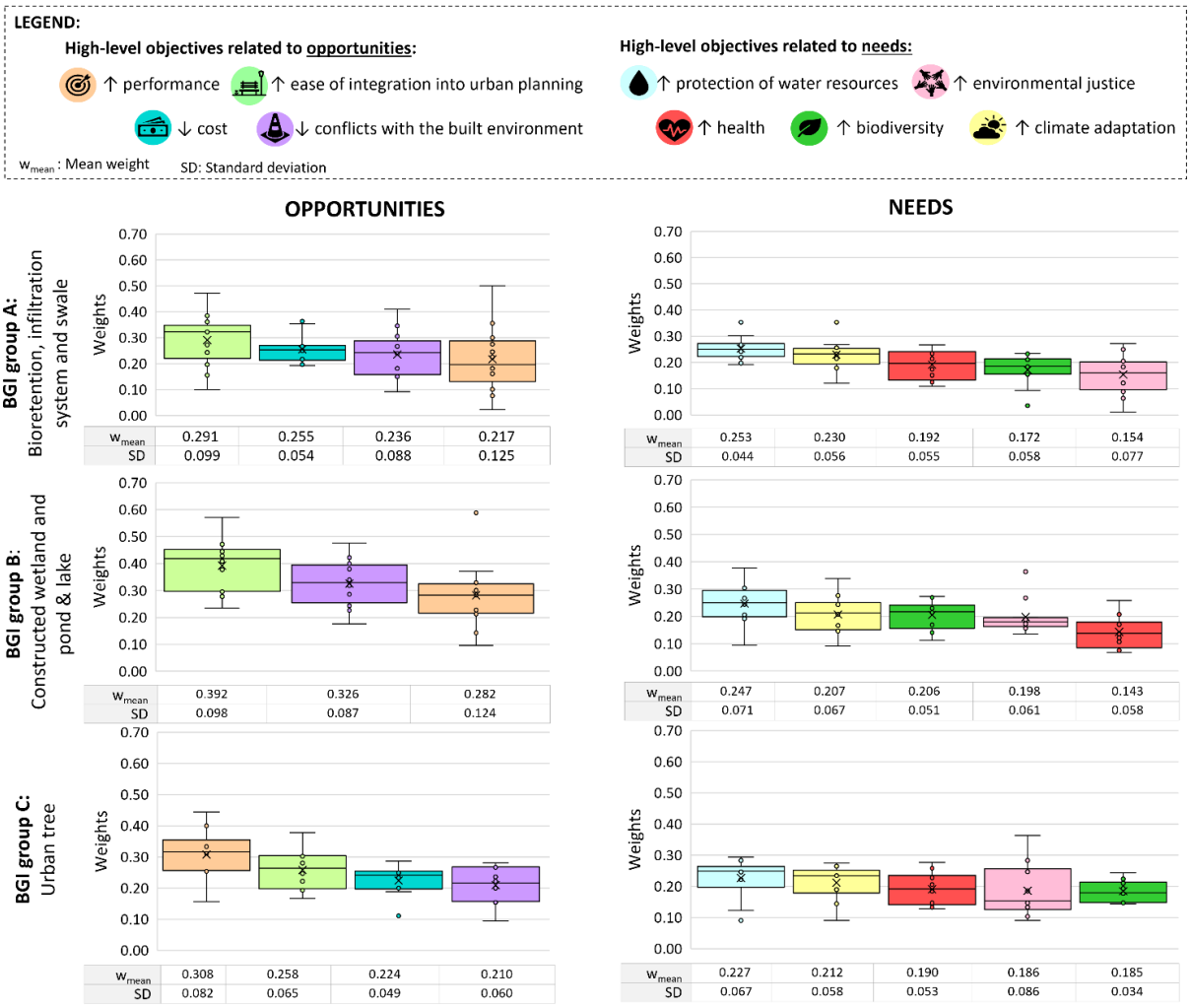


Figure 5.5 Main case study weights for higher-level objectives for each BGI group type (top to bottom from A to C) for each suitability perspective; opportunities (left) and needs (right). BGI group A (n=14 for opportunities and n=13 for needs), BGI group B (n=14) and BGI group C (n=11). The boxplots are presented in decreasing order of mean weight. Horizontal line shows the weights median, X point shows the weights' mean, I bar shows weights' maximum and minimum and dots (empty circles) show the individual weights

5.5.2 Importance of lower-level objectives

The complete result matrices by lower-level objective and by stakeholder can be found in Appendix E for BGI group A in Figure E.10.4, for BGI group B in Figure E.10.5 and for BGI group C in Figure E.11.1.

Opportunities :

In line with our hypothesis, *maximizing water infiltration into soils* received one of the highest weights for BGI groups A and C (Figure 5.6), reflecting its importance in BGI performance. This objective is measured by soil types, a predominant concern in BGI guidelines (Kuller, Bach, et al., 2018). However, stakeholder weights varied widely, as indicated by the high standard deviation. This objective was also in the top three for the preliminary case study (see Appendix E.10.1.2). Similarly, *minimizing water flow* (BGI group B) received the highest weight, also measured by soil types. Both objectives fall under the higher-level objective of *maximizing performance,* which was surprisingly the least important one for BGI groups A and B. Lower-level objectives are calculated using normalized weights of both levels (see Eq. E.2 in Appendix E).

For BGI group A, *minimizing construction costs related to topography* is the second-highest mean weight, consistent with the preliminary case study (Appendix E.10.1.2). For larger BGIs (group B), as we could expect, there was a higher emphasis on *having sufficient space* and *easy integration into land tenure*. Larger systems have greater implications in terms of ease of installation and scope of work. In the case of smaller BGI (groups A and C), *minimizing conflicts with existing infrastructures* (such as gas pipes or overhead wires) was weighted as the third most important.

Surprisingly, *maximizing ease of integration into planned works* (such as sewer systems repairs), scored high only for trees (group C). This was less prioritized for BGI group A, despite its prominence in prior workshops from a previous study aimed at co-creating a list of objectives to consider in BGI planning (Lacroix et al., 2024). Also, the implementation of BGI is still driven by strategic opportunism, as observed in Montreal (Quebec, Canada) where greening efforts are prioritized whenever construction work provides an opportunity to remove pavement (Madénian & Van Neste, 2024). This may suggest that although such opportunistic planning reflects current practice, planners recognize the need to move away from it, which could explain their interest in PSS that enable more strategic and integrated approaches. It highlights the importance of

conducting this step of eliciting objective weights to translate preferences. In the case of constructed wetlands and ponds/lakes (BGI group B), this objective was weighted as even less important for stakeholders, which is less surprising since this type of BGI is less common in the urban context where the stakeholders work. Stakeholders from the preliminary case study also assigned a low weight to this objective across all types of BGI (Appendix E.10.1.2).

The least important objectives for BGI group A were *minimizing groundwater resurgence* and *maximizing ease of integration into the road network*. Similarly, for urban trees (group C) *maximizing tree growth* (measured by attributes as average daily sunshine or predicted temperature difference) and *integration into the road network* were the least important for stakeholders. For BGI group B, less importance was attached to *minimizing conflicts between air traffic and birds* and *minimizing conflicts with building foundations*. These results align with findings in Lacroix et al. (2024), where a high percentage of stakeholders expressed a desire to exclude the lower-level objective related to air traffic, possibly due to the absence of nearby airports in their city boroughs. Less importance attached to proximity with buildings may be explained by the fact that larger systems are less implemented in dense urban areas, making proximity with buildings less important than for e.g. bioretention systems that infiltrate water into the soil.

Needs :

Climate adaptation emerged as crucial in BGI spatial planning, with consensus across stakeholders on *minimizing exposure to urban heat islands* and *minimizing exposure to urban flooding* (BGI groups A, B and C), reflected in high mean weights and low standard deviations. Similarly, *minimizing heath islands* ranked highest in the preliminary case study (Appendix E.10.1.2). Lower-level objectives for climate adaptation were geared towards reducing vulnerability to climate hazards, which aligns with the observations of Meerow (2019) where stakeholders prioritized social vulnerability.

Maximizing green cover was weighted high among objectives for BGI groups A and B, but ranked average for trees (BGI group C). While Meerow (2019) underlined low importance for landscape connectivity for stakeholders, our study highlighted the importance of *maximizing ecological connectivity*, which received higher weights for BGI group B. This shift may possibly reflect the rising awareness and growing emphasis on biodiversity conservation from BGI in urban areas in recent years (Hansen et al., 2023; Vasiliev & Hazlett, 2025).

Planning objectives related to population health received lower weights across all BGI groups. Stakeholders have weighed the objective of *maximizing air quality* low for all BGI groups. For trees (C), the four least-preferred objectives were health-related. This may reflect a weak association between health benefits and BGI location choices, as socio-economic objectives are underrepresented in guidelines (Kuller, Bach, et al., 2018).

The importance of *maximizing environmental justice* varied across BGI groups, with *maximizing greening of materially and socially disadvantaged areas* being the most important objective under this higher-level objective. For trees (BGI group C), it was the most important objective on average, though weights varied due to high values from two participants (public health and citizen committee). In the preliminary case study, all the lower-level objectives related to *maximizing community well-being* were assigned the least important weights (Appendix E.10.1.2).

Although *water resources protection* received the highest weight among higher-level objectives, its associated lower-level objectives were assigned moderate to low weights, except for trees (BGI group C). These lower-level objectives were assigned highest weights in the preliminary case study (Appendix E.10.1.2). *Minimizing combined sewer overflows* was moderately weighted for BGI groups A and B.

Although higher-level weights focused on runoff management, lower-level objectives weights underscore the value stakeholders place on BGIs co-benefits. This aligns with the increasing recognition of BGIs multifunctionality in compact cities (Hansen et al., 2019) and public interest in multifunctional green spaces (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021; Ligtermoet et al., 2022), while supporting the value of the MCDA approach in BGI planning to enhance such benefits.

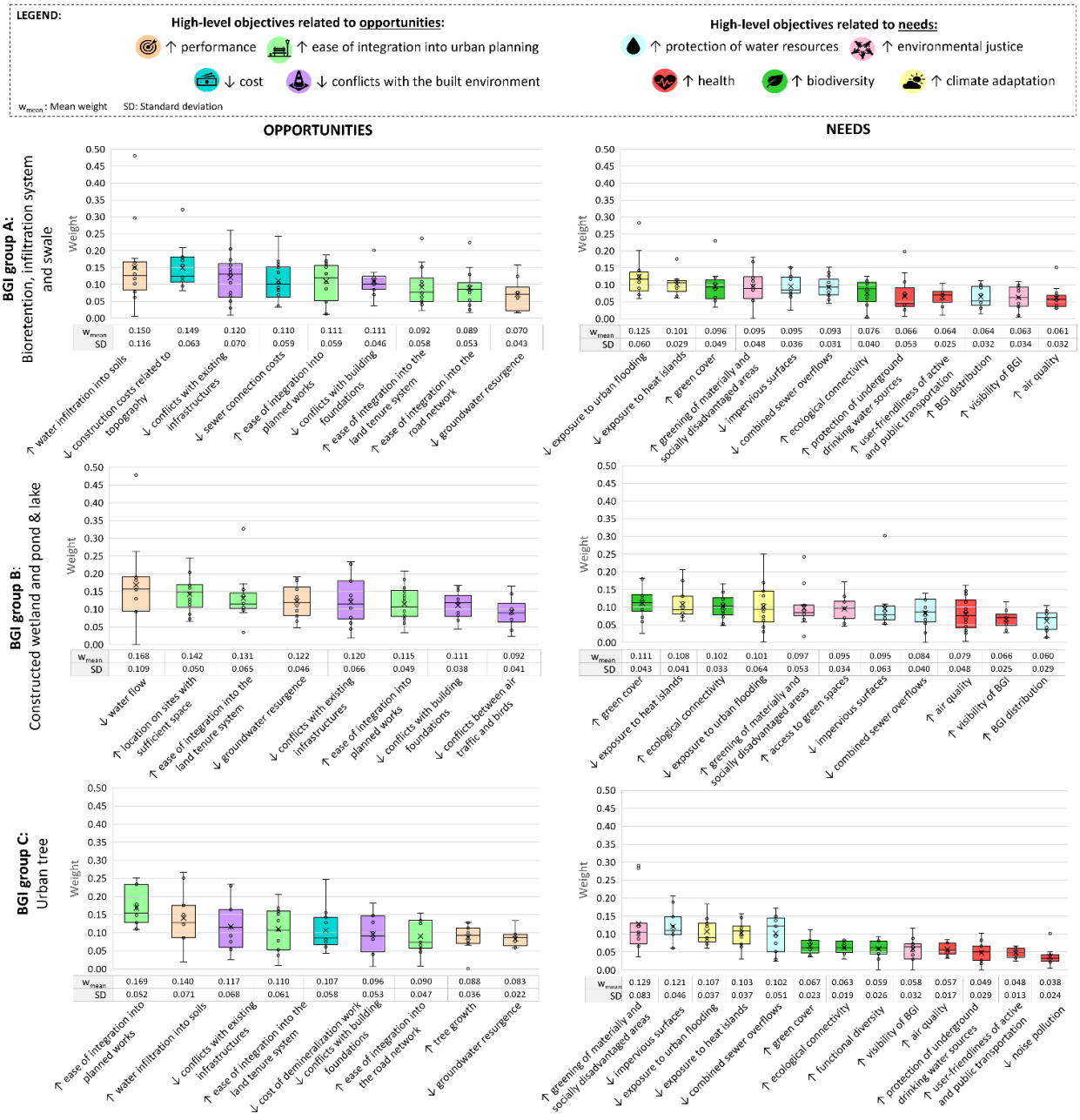


Figure 5.6 Main case study weights by lower-level objective for each BGI group (top to bottom from A to C) for each suitability perspective: opportunities (left) and needs (right). BGI group A (n=14 for opportunities and n=13 for needs), BGI group B (n=14) and BGI group C (n=11). The boxplots are presented in decreasing order of mean weight. Horizontal line shows the median weight, X point shows the mean weight, I bar shows weights maximum and minimum and dots (empty circles) show the individual weights

5.5.3 Stakeholders' consensus on specific objectives

For BGI group A, stakeholders showed higher consensus on needs-related lower-level objectives, with six of 12 having a coefficient of variation (CV) of less than 0.5. However, as also reported with the previous analysis, there was less agreement on opportunities-related lower-level objectives, with only two of nine objectives meeting the CV threshold (CV<0.5). For BGI group C, like group A, agreement was higher on needs-related lower-level objectives, with nine of 13 objectives having a CV of less than 0.5. The greater variability in weights opportunities-related lower-level objectives likely reflects the specificity of urban contexts, while needs align with widely recognized BGI benefits. Conversely, for BGI group B, we observed greater consensus among stakeholders on the weights of opportunities-related lower-level objectives (six of eight objectives with CV<0.5), possibly because they are larger systems (therefore perhaps more evidently impacted by siting constraints represented with opportunity objectives).

The highest and lowest consensus objectives varied by BGI group, with none exceeding the CV threshold of 0.8 (poor consensus). For example, *maximizing air quality* received low mean weights, but varying level of consensus according to the BGI type. The least agreement overall was on *maximizing protection of underground drinking water sources* for BGI group A (CV=0.791), likely due to varying local water sources, i.e. groundwater *vs.* surface water.

Shared objectives across all BGI groups with lower agreement included *minimizing conflicts with existing infrastructures* (CV 0.55–0.58) and *maximizing greening of materially and socially disadvantaged areas* (CV 0.51–0.65). Generally, stakeholders demonstrated a lower consensus in their weights for BGI group A as compared to other BGI types. As we expected, there was strong consensus across all BGI groups *minimizing exposure to heat islands* (CV 0.29- 0.38), which was also weighted with high mean weights.

High-weight, high-consensus objectives (CV and mean weight values in green in Figure 5.2) include *minimizing construction costs related to topography* (BGI group A) and *maximizing ease of integration into planned works* (BGI group C). High-weight, low-consensus objectives (CV and mean weight values in red in Figure 5.2) include *maximizing water infiltration into soils* (BGI groups A and C) and *minimizing water flow* (BGI group C). Low mean weights with strong consensus (CV and mean weight values in green in Figure 5.2) were observed for the objective of *maximizing user-friendliness of active and public transportation*, suggesting that the benefits of

BGI on active transportation are either poorly known or not prioritized, as reflected by limited documentation to date on the synergies between stormwater management infrastructure and active mobility (Lemieux et al., 2023).

Table 5.2 Coefficient of variation (CV) by lower-level objective for each BGI group for both suitability perspectives (opportunities: top; needs: bottom). The color scale reflects the range of values within each BGI group and perspective

	Higher-level objective	Lower-level objectives	CV A	CV B	CV C	w_{mean} A	w_{mean} B	w_{mean} C
Opportunities	↑ performance	↑ water infiltration into soils	0.77		0.51	0.15		0.14
		↓ groundwater resurgence	0.62	0.37		0.07	0.12	
		↓ water flow		0.65			0.17	
		↑ tree growth			0.41			0.09
		↑ space available for roots			0.27			0.08
	↓ costs	↓ construction costs related to topography	0.42			0.15		
		↓ sewer connection costs	0.54			0.11		
		↓ cost of demineralization work			0.55			0.11
	↑ ease of integration into urban planning	↑ ease of integration into the road network	0.60		0.52	0.09		0.09
		↑ ease of integration into the land tenure system	0.63	0.50	0.55	0.09	0.13	0.11
		↑ ease of integration into planned works	0.54	0.43	0.31	0.11	0.11	0.17
		↑ location on sites with sufficient space		0.35			0.14	
	↓ conflicts with the built environment	↓conflicts with building foundations	0.42	0.34	0.55	0.11	0.11	0.10
		↓ conflicts with existing infrastructures	0.58	0.55	0.58	0.12	0.12	0.12
		↓ conflicts between air traffic and birds		0.45			0.09	
Needs	↑ protection of water resources	↓ impervious surfaces	0.38	0.66	0.38	0.10	0.10	0.12
		↑ BGI distribution	0.49	0.49	-	0.06	0.06	
		↓ combined sewer overflows	0.34	0.48	0.50	0.09	0.08	0.10
	↑ territorial equity	↑ visibility of BGI	0.55	0.37	0.55	0.06	0.07	0.06
		↑ greening of materially and socially disadvantaged areas	0.51	0.54	0.65	0.10	0.10	0.13
		↑ access to green spaces		0.35			0.10	
	↑ population health and well-being	↑ user-friendliness of active and public transportation	0.38		0.28	0.06		0.05
		↑ air quality	0.53	0.60	0.29	0.06	0.08	0.06
		↑ protection of underground drinking water sources	0.79		0.60	0.07		0.05
		↓ noise pollution			0.65			0.04
	↑ biodiversity	↑ green cover	0.52	0.39	0.34	0.10	0.11	0.07
		↑ ecological connectivity	0.52	0.33	0.3	0.08	0.10	0.06
		↑ functional diversity			0.44			0.06
	↑ adaptation to climate change	↓ exposure to heat islands	0.29	0.38	0.36	0.10	0.11	0.10
		↓ exposure to urban flooding	0.48	0.63	0.35	0.12	0.10	0.11

LEGEND:

: BGI goup A (bioretention, infiltration systems and swales)

: BGI group B (constructed wetlands and ponds & lakes)

: BGI group C (trees)

Mean weight (w_{mean}) — Low / High

Coefficient of variation (CV)

1 ≥ CV > 0.8: Poor degree of consensus

0.8 ≥ CV > 0.5: Less than satisfactory degree of consensus

0.5 ≥ CV > 0: Good degree of consensus

Objective non-applicable for the BGI group

5.5.4 Stakeholders' agreement on the general set of objectives

Spearman correlation coefficients (ρ) were calculated across stakeholders' assigned weights for the set of needs-based and opportunity-based objectives. This approach does not compare stakeholders

on a single objective at a time, but rather captures the overall similarity in their weighting patterns, thereby assessing whether two stakeholders share a broadly aligned vision of priorities or diverge in their general preferences. Figure 5.7 presents three correlation matrices, one for each BGI group, showing the extent to which each pair of stakeholders had correlated preferences regarding both opportunities- and needs-related objectives.

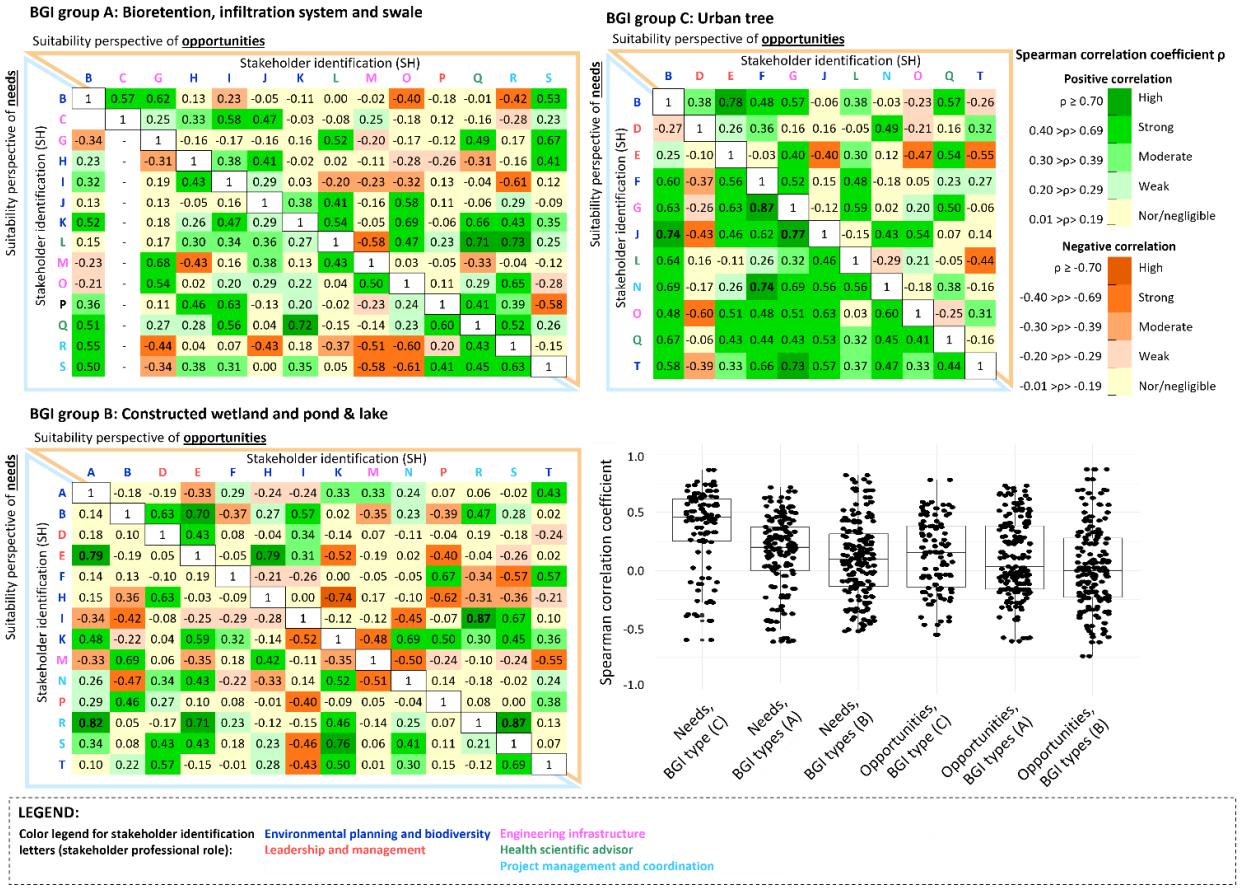


Figure 5.7 Spearman correlation between weights sets derived for each stakeholder (SH; represented by their identification letter from Appendix E.1) from swing elicitation for the main case study, each BGI groups (A, B and C) and each suitability perspective (opportunities and needs). The top half of the matrices shows weights for the opportunities' perspective and the lower half for needs. The color scale reflects correlation strength: positive values indicate agreement, negative values indicate disagreement. **Bold numbers**: p-value<0.01, showing strong evidence against the null hypothesis

Comparing median ρ from the six boxplots (bottom right; Figure 5.7), we observed a similar trend in preferences between stakeholders for needs lower-level objectives compared to opportunities ones (ρ>0.40, representing a strong or very strong positive correlation). For BGI groups B and C and needs-related lower-level objectives, most stakeholder pairs exhibited strong or very strong correlations. For both suitability perspectives, correlations are stronger for BGI group C, followed by group A and weakest for group B.

The three matrices in Figure 5.7 show that relationships between weights varied widely, from very strong (ρ≥0.70) to no or negligible correlation (0.01>ρ>0.19). It is worth noting that most correlations were not statistically significant (i.e. p-value ≥0.1; see Figure E.10.2), likely due to small sample size and high variability in weights. For opportunity-related objectives, most stakeholder pairs showed no or negligible correlation (|ρ|<0.29), with 38% to 44% in all BGI groups. This suggests limited overall strong agreement (ρ>0) or strong disagreement (ρ<0) on the full set of opportunity-related objectives, but rather alignment on specific ones. For needs-related objectives, stronger correlations were observed in BGI groups A and C. BGI group C showed the highest agreement, with 67% of stakeholder pairs displaying strong to very strong positive correlations, possibly reflecting greater familiarity with tree-related BGIs and their benefits. Only one pair of stakeholders showed a very strong negative correlation (ρ=-0.74), indicating minimal strong divergence in weights overall. For BGI group B, a majority showed no clear relationship between their weights (45% of stakeholder pairs). Across all BGI groups, agreement (ρ>0) was more common than disagreement (ρ<0). Interestingly, some stakeholder pairs showed contrasting patterns across BGI groups: they were strongly aligned in one BGI group but strongly opposed in another.

Some qualitative patterns can be observed between high and low correlations and stakeholders' backgrounds, suggesting possible links such as stakeholders from the similar professional role or organizational type tended to share a more similar vision, for example, those from the municipal sector or those from health institutes (Figure 5.7). A strong positive correlation between stakeholders from *public health stakeholders* for opportunities objectives in BGI group A was observed (*SH_L* and *SH_Q*, ρ=0.71, p-value=0.03). For BGI group C, several city-affiliated stakeholders showed agreement on needs-related objectives (*SH_E*, *SH_F*, *SH_G* and *SH_J*, ρ=0.46 to 0.87), with *SH_F* and *SH_G* from the same city displaying a very strong significant positive correlation. Similarly, two biodiversity-focused stakeholders (*SH_R* and *SH_I*) showed a

very strong significant positive correlation for opportunities-related objectives in BGI group B. However, some pairs of stakeholders exhibit surprising patterns, such as *SH_I* (professional role: biodiversity sector coordinator, organizational type: NPO) and *SH_R* (professional role: director of science and research, organizational type: biodiversity consulting firm) sharing similar weights for BGI group B's opportunities objectives (strong positive correlation, ρ=0.87) but differing significantly for BGI group A (strong negative correlation, ρ=-0.61). Notably, *SH_D* diverged from others, showing moderate to strong negative correlations with four stakeholders for needs-related objectives in BGI group C. This may be attributed to *SH_D*, involved with a community garden, who indicated feeling unqualified to evaluate the suitability of BGI sites.

Looking more specifically at the objectives, stakeholders' preferences exhibited distinct patterns across the independent variables. Figure 5.8 presents the rankings of lower-level objectives for stakeholders, grouped by the three categories of independent variables, for BGI group A (bioretention, infiltration systems, and swales). Corresponding figures for BGI groups B and C are provided in the Appendix E (Figures E.10.4 and E.10.5). Here are some observations across the three BGI groups:

- ***Field of study:*** Patterns varied notably across fields of study. Geography and urban planning stakeholders tended to align on integration-related objectives in BGI group A and emphasized site space for BGI group B, but their rankings diverged widely on integration with planned works. Environmental science and biology stakeholders showed diverse preferences in BGI group A, but converged on deprioritizing conflicts with air traffic in group B and strongly prioritized soil infiltration, tree growth, and greening disadvantaged areas in BGI group C. Civil engineers, by contrast, were consistent mainly on minimizing groundwater resurgence in BGI group A, but shifted to flood management priorities in group C, where they ranked ecological connectivity among the least important objectives.
- ***Professional role:*** Distinct role-based patterns emerged. Environmental planners and biodiversity experts aligned in BGI group A on prioritizing topography costs and heat island reduction and in BGI group B on minimizing conflicts with air traffic. In BGI group C, they consistently emphasized reducing heat islands while de-emphasizing transportation, air quality and noise pollution objectives. Engineers tended to show less consensus in BGI group A, but in BGI group B they aligned on BGI visibility and transportation-related objectives, while in

BGI group C they prioritized integration with planned works and protection from flooding. Scientific advisors showed consistent rankings in BGI group A, while in BGI group C they strongly emphasized minimizing land acquisition. Project management coordinators, represented in BGI group B, consistently prioritized minimizing water flow.

- ***Organization type:*** City-affiliated stakeholders revealed both consistencies and divergences across BGI groups. In BGI group A, they shared low-priority views on groundwater resurgence and high-priority views on topography costs; in BGI group B, their rankings were more mixed but consistently highlighted green cover while de-emphasizing BGI visibility; and in BGI group C, they showed strong alignment on planned works integration and prioritization of heat island reduction, while noise pollution remained low priority. Health research institute stakeholders, represented in BGI group A, showed consistency on air quality, green cover and heat reduction, while in BGI group C they prioritized minimizing land acquisition and planned works integration.

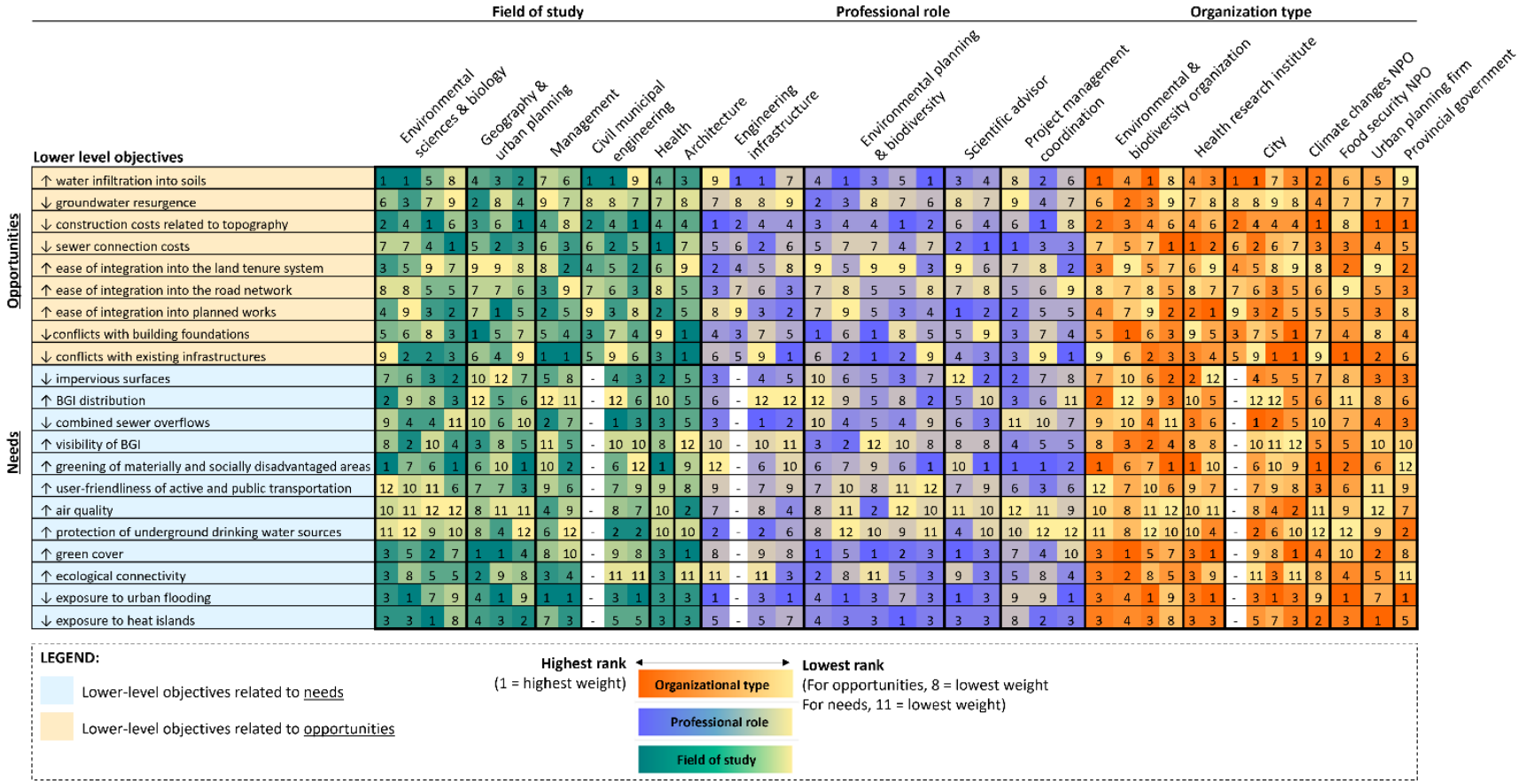


Figure 5.8 Lower-level objectives rankings from stakeholders grouped according to the categories of independent variables (field of study, professional role and organization type) for BGI group A (bioretention, infiltration system and swale)

Figure 5.8 mainly shows stakeholder alignment on specific objectives, where stakeholders within the same category appear to share similar priorities. This could suggest individual preferences played a larger role than these variables, implying that different stakeholders could yield different results even with similar independent variable representation. The small sample size, with some categories of an independent variable represented by a single stakeholder (e.g. one stakeholder from an "urban planning firm"), limits definitive conclusions.

5.5.5 Stakeholder feedback

Stakeholders found the swing weight elicitation questionnaires clear, although they expressed some difficulties (see Appendix E..11 for responses to the feedback questionnaires). Although the stakeholders were not chosen based on this criterion, most were familiar with MCDA and weighting methods (16/18). They understood in majority how to use the best and worst performance levels of the swing weighting method. Still, eight stakeholders found the process difficult, particularly ranking and weighting, with more confidence in rankings. Only two-sided technical issues, though some noted the inability to revisit the questionnaire, hindered answer revision, especially during ratings. Stakeholders emphasized BGI planning complexity and its connection to socio-economic context, knowledge of project operations and expertise specific BGI types. This highlights the importance of adequately supporting stakeholders with varying levels of experience. Tables E.11.1 (Appendix E) presents examples of qualitative feedback from stakeholders on the potential causes of their difficulties.

5.5.6 Summary

The results were generally consistent with our hypotheses. Figure 5.9 presents a summary of the three research questions, showing the top three lower-level objectives weighted as most and least important (RQ1), the highest and lowest consensus objectives (RQ2) and the overall agreement on objective priorities for each suitability perspective (RQ3). The figure also provides a summary of the objectives that stakeholders generally agree to prioritize versus those they generally agree not to prioritize.

Two objectives were ranked among the top both in terms of highest mean weight and strongest consensus (e.g. *minimizing exposure to heat islands and minimizing exposure to urban flooding*;

Figure 5.9). Further research is required to determine whether these highly weighted and widely agreed-upon objectives align with the vision of both researchers and practitioners within their respective contexts. Some objectives were among the top three highest weighted for two BGI groups (e.g., *maximizing water infiltration*, *minimizing conflicts with infrastructures*, *maximizing green cover*, *minimizing exposure to urban floods* and *heat islands*), while the rankings of other objectives depended on the specific type of BGI considered. Interestingly, some objectives with the highest mean weights also showed the lowest consensus (e.g. minimizing soil infiltration and minimizing water flow). Stakeholders' weights were more strongly correlated for both opportunity-based and needs-based objectives in BGI groups A and C, whereas group B exhibited lower correlations. There was no BGI group in which stakeholders were in strong disagreement regarding the overall prioritization of objective sets.

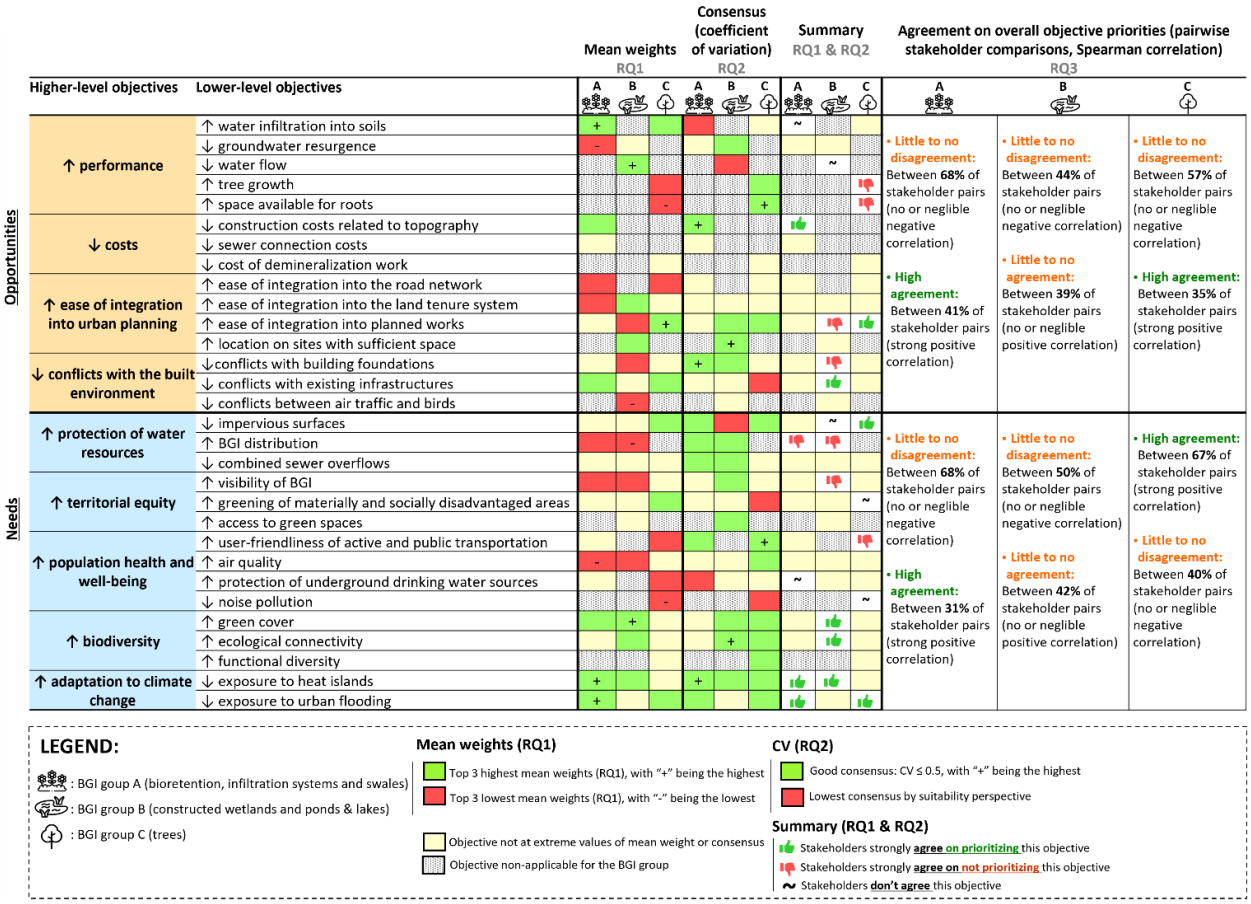


Figure 5.9 Summary of results for the three main research questions (RQ). For RQ1, colors indicate the top 3 highest (green) and lowest (red) mean weights. For RQ2, colors indicate the top 3 highest (green) and lowest (red) consensus. For RQ3, the correlation level class for each majority of Spearman pairwise comparisons in opportunities and needs suitability perspectives is shown

Each set of stakeholder preferences can be integrated into a GIS-MCDA PSS to generate spatial suitability maps for a given BGI type, tailored to individual stakeholders. Mapping stakeholder preferences is therefore crucial for effective PSS use, as these systems are designed to support cities in complex decision-making processes. When two stakeholders hold contrasting preferences, such as *SH_I* and *SH_R*, who show the greatest disagreement in their overall weighting of opportunity-related objectives (Figure 5.7), the resulting BGI suitability maps nevertheless reveal areas of overlap (Figure 5.10). Despite divergent priorities, agreement on high-scoring sites remains possible, though fewer highly suitable areas emerged for *SH_R* overall. Such spatial suitability

maps can serve as valuable inputs for discussion, helping to explore and reconcile differing perspectives by focusing on common sites. Divergent stakeholder preferences can also be addressed through negotiation and iterative refinement. Techniques include argumentation maps to visualize trade-offs and share visions and negotiation workshops where stakeholders iteratively review and adjust group solution maps under a moderator's guidance to reach consensus (Jelokhani-Niaraki, 2021a). More in-depth sensitivity analysis is needed to assess the extent to which changes in preferences influence BGI site selection.



Figure 5.10 Spatial suitability maps of BGI group A implementation according to two contrasting sets of weights (ρ=-0.61 for opportunities objectives) from stakeholder SH_I (left) and SH_R (right), applied in a small case study area(Quebec, Canada)

5.6 Discussion

5.6.1 Practical implications for BGI planning

Table 5.3 summarizes the practical implications of our findings for decision-making in urban BGI spatial planning. While preferences for some objectives were consistent across stakeholders, indicating potential priorities for urban planning strategies, other preferences varied by BGI type, stakeholder background, and individual priorities. These variations highlight the importance of tailoring planning approaches to specific BGI types and local contexts, considering both opportunities- and needs-related objectives. The table also emphasizes the role of bottom-up weighting, stakeholder engagement, and effective communication in reconciling differing

preferences. Overall, integrating these insights into GIS-MCDA PSS can support transparent, inclusive and context-sensitive urban planning.

Table 5.3 Implications for practice of decision-making in BGI planning

Results	Implications for practice
There are some consistent preferences among different stakeholders for all BGI groups **(RQ1)**	**Prioritizing objectives:** • Decision-makers in urban areas of Quebec (Canada) could benefit from these important preferences to define planning strategies, since some objectives appeared to be of high priority across all stakeholders. **Higher-level objectives:** Opportunities: *maximizing ease of integration into urban planning* (preliminary and main case study) Needs: *maximizing protection of water resources* (preliminary and main case study) and *maximizing climate adaptation* (main case study) **Lower-level objectives:** Opportunities: *maximizing water infiltration into soils* (preliminary and main case study) Needs: *minimizing exposure to heat islands* (preliminary and main case study) *and minimizing exposure to urban flooding* (main case study)
Stakeholder preferences do not focus solely on the common benefit of water protection **(RQ1)**	**Focusing on multifunctionality:** • Stakeholder focus may shift towards multifunctional spaces, towards infrastructures that combine stormwater management with other objectives. This highlights the need for a new focus on the social and cultural benefits of BGI and the importance of education about these functions.
Stakeholder preferences vary between different BGI types **(RQ1)**, as does their level of agreement **(RQ3)**	**Adapting priorities for different BGI types:** • Different BGI types show unique patterns in stakeholder preferences. Decision-makers should be careful to state different planning strategies for different types of BGI. • Consensus is weaker on opportunities-related objectives, highlighting preference specificity across BGI groups. For instance, agreement is stronger for tree-related objectives (BGI group C) than for groups A and B, where low or no correlations were observed.
Some preferences may be linked to the stakeholders' urban context **(RQ1, RQ2 and RQ3)**	**Repeating preference elicitation workshops for each urban context:** • Preferences may vary by urban context, as seen in differing priorities between the main and preliminary case studies (e.g. *minimizing drinking water intake vulnerability*, influenced by water sources, groundwater vs. surface water). • The greater divergence in preferences concerning opportunities-related objectives supports that the urban planning and built environment of a city can bring more conflicting opinions depending on the urban context. • These findings emphasize the need for context-specific preference elicitation, with further research required on how such differences affect MCDA outcomes (Kuller et al., 2023). Opportunities' objectives may be less generalizable than needs, potentially varying over smaller distances.

Table 5.3 Implications for practice of decision-making in BGI planning (continued)

Results	Implications for practice
Preferences between lower-level objectives and higher-level objectives are not necessarily aligned **(RQ1)**	**Weighting through a bottom-up approach, lower-level to higher-level objectives:** • The most and least important lower-level objectives may not align with their higher-level objectives. For BGI group A, the highest and the lowest weight among the lower-level objectives stem both from the higher-level objective of *maximizing performance*, which was the least important higher-level objectives. This highlights the need to focus on weighting at the lower-level objective level. It should be kept in mind that the structure of the hierarchy can influence the weights, as the number of lower-level objectives under a higher-level branch may directly affect its overall importance (structuring bias).
Individual preferences for a given objective vary among stakeholders **(RQ2)**	**Tailoring adequate engagement process:** • Stakeholders' conflicting preferences add complexity to decision-making (Axelsson et al., 2021). For a set of objectives, the maximum and minimum weights given among stakeholders are sometimes assigned to the same objective, e.g. *maximizing infiltration into soils* (lower-level objective) for BGI group B or *maximizing performance* (higher-level-objective) for BGI group A. This underscores the importance of carefully selecting the weight-gathering process. This emphasizes the need for tailored weight-gathering methods over a one-size-fits-all approach. Individualized outreach can improve inclusivity and uncover genuine preferences, avoiding group bias (Scholten et al., 2015). However, there is a trade-off between tailoring processes and the ease of adaptation to different contexts. **Prioritizing communication strategies:** • Given varying levels of stakeholder consensus, effective communication is crucial. Decision-makers should communicate project aims and potential impacts in a way that resonates with stakeholder values to reduce resistance to BGI, echoing Meerow and Newell (2017) on the importance of education campaigns to foster acceptance. This is an opportunity to support the value of GIS-MCDA using suitability maps as a means for communication enhancement
Level of correlation (agreement) between a stakeholder vs. another varies from one BGI group to another (**RQ3**)	**Ensuring transparent integration of preferences:** • Preferences for lower-level objectives exhibit a wide range of correlation strengths, from very strong positive to negligible correlations, reflecting diverse viewpoints. Despite organizational or professional affiliations, stakeholders often have unique preferences, challenging generalized assumptions. This highlights the need for decision-makers to create urban strategies that address conflicting stakeholder concerns. A GIS-MCDA-based PSS can support this by democratizing decision-making and ensuring transparency in how preferences are integrated into strategies.

5.6.2 Critical reflections on the preference elicitation procedure

The preference elicitation process, which included the use of an online swing-weight software, offered clear benefits but also revealed challenges and mixed stakeholder feedback.

Fast preference elicitation is essential in decision-making, given time constraints and limited availability of stakeholders and the online platform helped streamline this process.

The online format offered flexibility in geographical reach, allowing stakeholders from different cities and organizations to participate without the logistical challenges of in-person workshops, as also highlighted in Aubert et al. (2020). Finally, the software's capacity to automatically compile and export results in .csv format greatly facilitated data processing and analysis. Clear communication about how elicited preferences are used in final decisions is also essential to support transparency of the decision-making process. Moreover, the ability to work with different sets of weights provides an opportunity to generate discussions among stakeholders, making divergences in priorities visible and fostering a more constructive and inclusive decision-making process. At the same time, some challenges remain, including uncertainty among stakeholders about whether to respond based on their personal views or as representatives of their organizations, as well as the fact that the swing method was not intuitive for all stakeholders.

The following table (Table 4) summarizes the main challenges identified based on the collection of feedback from the stakeholders after completing the elicitation process, along with targeted recommendations to improve stakeholder preference elicitation for GIS-MCDA-based BGI planning.

Tableau 5.4 Key challenges and recommendations for the preference elicitation process

Challenges	Key observations	Recommendations
Ease of responding & MCDA familiarity	• Swing method not intuitive for all: mixed experiences with ranking and scoring; some found tasks easy, others confusing. • Stakeholders varied in familiarity with weighting methods.	• Maintain clear and concise explanations, as they contribute to better-informed decisions. • Provide short training to ensure stakeholders understand the techniques. Acknowledge that, in real-world contexts, many stakeholders may be unfamiliar with MCDA, so training should be adapted accordingly. • Future research should compare swing weighting with simpler elicitation methods (e.g. direct rating) for GIS-MCDA context, especially given the large number of alternatives (sites) that may amplify differences in results between methods, in order to assess the added value of swing weighting for stakeholders who are not MCDA experts.
Objective hierarchies structure	• Stakeholders reported greater difficulty with opportunities-related objectives. • Stakeholders found it challenging to determine relative importance of objectives that were closely related or had overlapping benefits (e.g. imperviousness vs. sewer overflows).	• When using detailed hierarchies, balance granularity with usability. A fine-grained structure can improve the precision of preference elicitation and provide deeper insights into stakeholder priorities. However, it also increases complexity, adds to cognitive load and may risk confusion.
Cognitive load	• Cognitively demanding, as stakeholders had to simultaneously consider BGI type, the relationships between higher- and lower-level objectives, the suitability perspective and the fact that alternatives were represented by sites. • Difficult to prioritize objectives without a concrete context, as priorities can depend on socio-economic and urban planning conditions.	• Consider limiting each stakeholder to one BGI type and one suitability perspective to reduce cognitive burden (though this would require more time/resources). • Providing a specific case study (e.g. a reference city) could potentially help stakeholders ground their answers.
BGI knowledge requirements	• Completing the tasks required prior knowledge of how different BGI types influence specific objectives (e.g. constructed wetlands and their role in maximizing biodiversity), as well as an understanding of the implications of implementing BGIs in urban contexts (particularly for opportunity-related objectives). Although most stakeholders had a background in BGIs, one participant mentioned not feeling sufficiently knowledgeable to complete this type of exercise.	• Carefully select stakeholder profiles. For this kind of technical exercises, especially those involving opportunity-related objectives, it may be necessary to involve stakeholders with a knowledge base on the subject.
Viewpoint adopted	• Uncertainty about whether to answer personally or as the represented entity. This highlights a limitation of a purely quantitative approach, where we did not collect qualitative justifications for all their choices.	• Clarify whether responses should reflect personal or institutional viewpoints. • Capture the motivations behind the expression of stakeholder preferences. • Future research could capture both individual and organizational preferences to account for differences in planning perspectives.
Workshop facilitation	• Real-time facilitation supported stakeholders, but some still felt under-supported. • Risk of random answers without sufficient guidance. • Technical issues could happen and be solved during the workshop.	• Ensure active facilitation at each step of the questionnaire, guiding stakeholders step by step rather than leaving them to complete it independently. For example, walk them through the first swing exercise of the first branch of the hierarchy, explaining the process as they proceed. • Provide technical support during workshops and pre-test the platform to minimize potential disruptions.
Answers certainty	• Stakeholders expressed varying levels of confidence in their ranking and scoring. • A bigger concern was the inability to go back in the questionnaire, limiting the possibility to review and modify responses, particularly in the weighting step.	• Add a self-reported “confidence level” question to contextualize results. • Explore options for a “back” function to let stakeholders revise earlier responses, enhancing user experience. • Include a debriefing session to validate or adjust results.

5.6.3 Limitations and future research

We advise approaching the interpretation of the study results with caution, considering factors such as demographics, decision context, elicitation timing, setting (group vs. individual), weighting method, decision-makers' knowledge and external influences (Kuller et al., 2023; Zheng & Lienert, 2018). Preferences are captured at a single moment, which may not reflect their evolving opinions over time (Aubert & Lienert, 2019; Kuller et al., 2023). Preferences were gathered from stakeholders in various cities and fields, focusing on general preferences over site-specific ones, so results may not apply universally. The hierarchical structure of objectives influences also the results, as the placement of a lower-level objective under different higher-level objectives can affect its assigned weight (e.g. minimizing exposure to urban heat island, categorized under climate change adaptation vs health-related objectives). Issues like weight uniformity, statistical significance, stakeholder understanding and GIS-MCDA settings also play crucial roles in the elicitation process, with recommendations for clearer terminology and improved stakeholder engagement to enhance results and trust in the process (Appendix E.8 for details on each consideration and its explanation).

The relatively small sample size of 11 to 14 stakeholders (out of 20 stakeholders in total) filling out weight elicitation questionnaires for the main case study and the different BGI groups restricted our ability to conduct robust statistical analyses. While 20 stakeholders participated, primarily from BGI planning or related fields, involving more citizen groups in future work would enhance inclusivity and align with the emphasis on public participation in environmental decision-making (Anderson & Renaud, 2021; Aubert & Lienert, 2024; Phillips et al., 2023). However, as the PSS is intended for use by municipalities, this initial study on stakeholder preferences provides a valuable starting point for fostering discussions among the various disciplines involved in BGI spatial planning, contributing to breaking the silos found in municipal work, where organizations still operate in isolation. For opportunities-related objectives, public engagement may be more difficult due to the technical nature of certain tasks, as highlighted by one stakeholder, and may also be perceived as less relevant to their immediate concerns compared to needs-related objectives. Therefore, a second phase of research could incorporate the public input specifically for needs-related objectives, enabling a comparison of perspectives between professional stakeholders and the public.

Future work should address temporal and spatial weight variations, comparing urban contexts and investigating how stakeholder weights affect spatial suitability analysis. Conducting a sensitivity analysis would be particularly valuable to assess how divergences in preferences shape suitability maps. Other future studies could extend the elicitation to include not only individual objectives but also the relative weighting of suitability perspectives (i.e. opportunities versus needs), with careful attention to trade-offs that reflect the compromises inherent in decision-making. Finally, the appropriateness of the swing weighting method in a GIS-MCDA context warrants further investigation. Comparing it with more simple and direct weighting approaches could help determine whether swing weighting provides added value and whether the preference elicitation process can be made more efficient for stakeholders.

5.7 Conclusion

This study provides empirical evidence on how stakeholders prioritize objectives for strategic BGI spatial planning and advance preference elicitation procedure within GIS-MCDA framework by using a novel online swing-weighting software, thereby contributing a methodological innovation for BGI planning problems. The approach allows for systematic collection and analysis of stakeholder priorities and supports translating these preferences into spatial suitability assessments. Across two municipal case studies in Quebec, Canada, we considered three BGI groups: A (bioretention, infiltration systems, and swales), B (constructed wetlands, ponds, and lakes), and C (urban trees), engaging stakeholders from municipalities, private and professional sectors, NGOs, research, and community groups. Key conclusions are:

- **Priority objectives (RQ1):** Stakeholders consistently prioritized objectives related to climate adaptation, water protection, and heat island mitigation. In contrast, health, biodiversity, and cultural service objectives were generally ranked lower. At the lower hierarchy level, some disagreements emerged. For instance, maximizing water infiltration was contentious across all BGI types, while prioritizing sites according to planned public works was specific to urban trees. Heat island mitigation and minimizing impermeable surfaces were widely prioritized. We observe a shift in stakeholder preferences from a traditional emphasis on water management functions of BGI toward a broader recognition of co-benefits such as climate adaptation, heat island mitigation and biodiversity, reflecting a multifunctional approach also

noted in other studies. Preferences varied across BGI types, highlighting the need to consider them separately.

- **Consensus and variation (RQ2):** Needs-related objectives (i.e. needs that BGI should fulfill) exhibited stronger consensus than opportunities-related objectives (i.e. leveraging site-specific opportunities), indicating a shared consensus on urban challenges objectives over operational potential objectives for BGI. The level of consensus for a same objective varied from one BGI group to another, highlighting the influence of BGI group context on preferences while suggesting a baseline of shared priorities. Urban trees (BGI C) showed higher alignment among stakeholders, while smaller or more technical systems demonstrated more divergent preferences. No objective exhibited universally poor consensus.
- **Stakeholder agreement (RQ3):** We examined whether priorities for BGI planning could be generalized across variables such as stakeholder backgrounds (e.g., municipal planners, climate scientists, civil engineers, NGOs). Preferences did not clearly correlate with stakeholder backgrounds, though urban context appeared to influence some priorities. Most stakeholder pairs showed moderate agreement on opportunities-related objectives and stronger agreement on needs-related objectives. Overall, stakeholders from different fields aligned on specific objectives but diverged in ranking the complete set of priorities.

As secondary findings, this study demonstrates the feasibility and value of using an online swing-weight elicitation software within a GIS-MCDA framework to collect structured stakeholder preferences. The software facilitated broader participation, streamlined data collection and allowed automated aggregation of results for spatial suitability analysis. By integrating stakeholder preferences into a GIS-MCDA-based PSS, this approach uncovers divergences in priorities, supports collaborative decision-making and can help break down planning silos, providing insights that can inform both objective prioritization and strategic decisions on BGI siting and multifunctional implementation. Challenges identified highlight the need for careful stakeholder selection, targeted training and active facilitation during elicitation. Importantly, this approach allows municipalities to recognize how differing priorities may influence BGI placement, enhances transparency, bridges communication gaps and integrates diverse perspectives into suitability maps for BGI location choice. By making convergence and divergence visible, GIS-MCDA-based preference elicitation supports systematic, integrated and collaborative spatial planning for

multifunctional BGI systems, a process that remains rare but particularly valuable in urban governance.

Acknowledments

This research project has been funded by the Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie du Québec (Social Innovation Projects), the Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (individual grant of the last author, Research Support for New Academics), the Observatoire Ivanhoé Cambridge, and CentrEau (individual student start-up scholarship of the first author). The authors thank the partner municipality and all the stakeholders in the elicitation process. We also thank J. Petrucci and A. Rioux for their invaluable help in organizing workshops. A special thanks to J. Jalbert for his help in processing the results.

This project has been the subject of an ethical assessment by Polytechnique Montreal (CER-2021-44-D), with recognition from the University of Montreal (CERAH-2021-053-R(1)) and the National Institute of Scientific Research (CER-22-688).

Data availability

The raw data generated during the current study are not publicly available due to the clauses of the consent form signed by the participants, but anonymized data are available from the corresponding author on reasonable request. All the information required to reproduce the study, as well as the anonymized and processed data, are available in supplementary material.

Appendix. Supplementary data

Supplementary Information to this article can be found at: Annexe E

Author contribution

S.L., M.K., D.D. and F.B. conceptualized the work and developed the methodology (conceptualization). S.L. managed and coordinated the research activity planning related to the weight elicitation workshops, conducted the workshops (investigation and data collection), conducted the data analysis (formal analysis), prepared and created data presentation of the published work (visualization) and wrote the original manuscript (writing – Original Draft Preparation). M.K. provided help and resources in the design of the weight elicitation workshops (resources), supervised the research activity planning (supervision) and validated the methodology

(validation). A.A. developed the online swing elicitation software and helped with technical issues (software). D.D. assisted the team during the weight elicitation workshops and supervised the research activity planning (supervision). F.B. acquired financial support (funding acquisition) and supervised the research activity planning (supervision). All authors revised and edited the manuscript and approved its submission for publication.

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors used ChatGPT in order to improve readability and language. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

CHAPITRE 6 ARTICLE 3 : ARE WE ELICITING THE RIGHT PREFERENCES ? INSIGHTS FROM SPATIAL MCDA SENSITIVITY AND UNCERTAINTY ANALYSIS

Ce chapitre présente l'article scientifique à soumis dans *Environmental Modelling and Software* le 20 novembre 2025.

Beyond the surface: how do preferences really impact spatial suitability of blue-green infrastructure?

Sandrine Lacroix[a] , Martijn Kuller[b,*], Jonathan Jalbert[c], Danielle Dagenais[d], Françoise Bichai[a]

[a] *Department of Civil Engineering, Polytechnique Montréal, 2900, boul. Édouard-Montpetit, Montréal, QC, Canada*

[b] *Copernicus Institute of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands*

[c] *Department of Mathematics and Industrial Engineering, Polytechnique Montréal, 2900, boul. Édouard-Montpetit, Montréal, QC, Canada*

[d] *Faculté de l'Aménagement, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada*

**Corresponding author email address: sandrine.lacroix@etud.polymtl.ca*

Keywords*:* Global sensitivity analysis; uncertainty analysis; Sobol; GIS-MCDA; blue-green infrastructure.

6.1 Highlights

- First-ever joint variation of preferences to reveal spatial suitability drivers
- Non-additivity parameter is the main driver of spatial MCDA sensitivity
- Value scale shape has much less impact than objective weights on spatial variability
- Even low-influence parameters can have strong local effects on spatial results
- Use spatially explicit sensitivity analysis to identify robust and sensitive areas

6.2 Abstract

GIS-MCDA-based planning support systems (PSS) are inherently sensitive to uncertainties in their input parameters. Yet, such uncertainties are often overlooked in PSS development, with most attention traditionally focused on objective weighting, while other sources of preferential uncertainty remain neglected. This study applies a joint uncertainty analysis (UA) and Sobol global sensitivity analysis (GSA) to systematically assess all major preference-related uncertainties in the Spatial Suitability Analysis Tool (SSANTO), a GIS-MCDA PSS used here for blue-green infrastructure planning. We examined three key components: objective weights, attribute value scales and the aggregation function type, including the non-additivity parameter (γ). By combining spatially explicit Sobol sensitivity analysis with Monte Carlo-based uncertainty propagation across 90,000 input combinations, we quantified how different sources shape the variability and spatial patterns of suitability, revealing which inputs most strongly drive model outcomes. Results show that only a limited subset of parameters exerts substantial influence on model behavior. The γ emerged as the dominant driver of sensitivity, highlighting the strong dependence of results on assumptions about additivity, followed by objective weights, while value scales had comparatively minor effects. Moreover, spatial sensitivity results should not be overlooked, as input parameters with a low average contribution among all pixels to overall variance may still exert strong localized effects within the study area. Together, these findings provide practical guidance for prioritizing parameters during elicitation in participatory planning processes based on spatial MCDA, optimizing data collection and designing more robust and transparent GIS-MCDA workflows. Our approach provides a replicable framework for simultaneously analyzing uncertainties arising from different types of preferences in GIS-MCDA PSS.

6.3 Introduction

Planning blue-green infrastructure (BGI) for stormwater management requires a multi-disciplinary approach to consider the diverse co-benefits and the plurality of stakeholders' preferences. Utilizing geographic information systems (GIS) and multi-criteria decision analysis (MCDA) models allows for the visualization of site performance by integrating a combination of "objective" and preference inputs: measurable objectives, spatial attributes, weights of objectives, attribute value scales and an aggregation function that combines them into a final performance score

(Ferretti et al., 2014).

GIS-MCDA model outputs are prone to input parameter uncertainties. Assessing model stability and determining confidence in model outputs are increasingly recommended and even deemed crucial (Lilburne & Tarantola, 2009a; Şalap-Ayça et al., 2021a). It is therefore beneficial to identify critical inputs that contribute most to variability in model outputs to define potential simplifications, update the model, reduce uncertainties and increase output stability (Jeon-Young Kang et al., 2022; Lilburne & Tarantola, 2009a), and also to potentially reduce the burden on stakeholders to provide preferences.

Two established methods are used to assess the impact of uncertainties, namely the uncertainty analysis (UA) and the sensitivity analysis (SA). UA and SA should be used complementarily (Chen, J.Yu, et al., 2010; Feizizadeh & Kienberger, 2017; Malczewski & Jankowski, 2020; Tenerelli & Carver, 2012).

The following sections further elaborate on the definitions of UA and SA methods (Section 6.3.1) and provide an overview of the GIS-MCDA literature using these methods (Section 6.3.2 6.3.1).

6.3.1 Definitions

UA is a "forward-looking" approach allowing to evaluate how the uncertainty of input parameters propagate through the model and affects its outputs (Feizizadeh et al., 2014b; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Malczewski & Jankowski, 2020; Scholten et al., 2015). Ultimately, UA helps assess whether the model's output quality is sufficient to reliably support decision-making (Crosetto & Tarantola, 2001). It relies heavily on simulation techniques, such as Monte Carlo (Saltelli et al., 2019). Inputs are represented as random variables with estimated probability distribution functions (PDF), which often vary between inputs in GIS models (Crosetto & Tarantola, 2001). It provides descriptive statistics for the model (standard deviation, mean, min, max, etc.), as well as a probabilistic distribution of the results (Malczewski & Jankowski, 2020).

SA is a "backward-looking" approach allowing to evaluate which parameters are most responsible for the variability of the model outputs and how much each input uncertainty contributes to the output uncertainties (Feizizadeh et al., 2014b; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Malczewski & Jankowski, 2020; Saltelli, 2002; Scholten et al., 2015). There are two types of SA: local sensitivity analysis (LSA) and global sensitivity analysis (GSA).

LSA looks at how outputs vary with small changes in one input at a time, while all others are fixed, hence the name of the most popular method “One-At-A-Time (OAT)” (Daniel, 1958). Due to its simplicity and intuitiveness, OAT has been often prioritized in literature (Aidinidou et al., 2022; Cartwright et al., 2022; Chen, J.Yu, et al., 2010; de Brito et al., 2019a; Fildes et al., 2022b; Romanoa et al., 2015; Saltelli et al., 2019). LSA is computationally less demanding and well-suited for models where behavior is expected to be relatively linear or when the focus is on understanding local behavior, such as critical thresholds (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Saltelli et al., 2019). However, its deterministic nature means that changes are evaluated only at specific, chosen points within a limited region of the input space, making results highly dependent on these choices (Lilburne & Tarantola, 2009b; Saltelli et al., 2019; Saltelli et al., 2008). This type of SA is then often ad-hoc (Lilburne & Tarantola, 2009b).

GSA looks at how outputs’ variations are attributed to multiple sources of uncertainty, including relationships between the parameters (de Brito et al., 2019a; Feizizadeh et al., 2014b). Unlike OAT, which relies on "best-guess" input parameter values, GSA allows to explore the entire input space defined as “the set of all possible combinations of input parameters” (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Saltelli et al., 2019). It facilitates easy visualization through graphical and probabilistic results, since its techniques, such as Monte Carlo Simulation, generate PDF of outcomes (Plata-Rocha et al., 2012b). Additionally, GSA explores correlations and interactions between parameters and serves as a strong verification tool that helps to detect model errors (Saltelli et al., 2019). However, GSA is computationally expensive and requires an understanding of statistics for both implementation and interpretation (Saltelli et al., 2019). There are several GSA methods, such as the Morris elementary effects approach (Morris, 1991), moment-independent methods (Da Veiga & Martins, 2015), extended FAST technique (Crosetto & Tarantola, 2001), variogram-based approaches (Razavi & Gupta, 2019) and variance decomposition (Saltelli et al., 2010b), based on Sobol (Sobol, 1967). Variance-based decomposition is considered one of the most effective techniques for GSA (Feizizadeh et al., 2014b; Malczewski & Jankowski, 2020; Puy, Becker, et al., 2022; Saltelli, 2004).

6.3.2 Review of UA and SA for GIS-MCDA models

While UA and SA are acknowledged as essential approaches, their application is not yet common practice (Scholten et al., 2015). In spatial contexts, their usage is even scarcer, often being

employed in a rudimentary manner or disregarded entirely (Chen, J.Yu, et al., 2010; de Brito et al., 2019a; Delgado & Sendra, 2004; Lilburne & Tarantola, 2009a; Xu & Zhang, 2013). Spatial analysis introduces complexities such as the computational cost associated with the large number of pixels in maps, the heterogeneity of data inputs, the potential auto-correlation among inputs, the lack of specialized GIS tools to carry out UA/SA and the difficulty of visualizing spatial change dynamically (Chen, Yu, et al., 2010; de Brito et al., 2019a; Delgado & Sendra, 2004; Ferretti & Montibeller, 2016; Lilburne & Tarantola, 2009a; Plata-Rocha et al., 2012b).

Nevertheless, application of UA and SA in spatial contexts is one of the emerging frontiers of research (Malczewski et al., 2020), and spatial GSA has been receiving increasing attention in recent years (Abily et al., 2016a; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Şalap-Ayça, 2022; Şalap-Ayça et al., 2021b). UA is far more prevalent than SA in GIS-based modeling and the two methods are generally treated in isolation (Crosetto & Tarantola, 2001). Only few studies have performed joint UA and SA (e.g. Feizizadeh et al. (2014a);Ligmann-Zielinska and Jankowski (2014b); Feizizadeh and Kienberger (2017); Tang et al. (2018); de Brito et al. (2019b); Fildes et al. (2022a)). Most sensitivity analyses in GIS-MCDA models are local (LSA) in scope rather than global (GSA), with only rarely performing GSA (e.g. Saint-Geours et al. (2012); Feizizadeh et al. (2014a); Ligmann-Zielinska and Jankowski (2014b); Feizizadeh and Kienberger (2017); Tang et al. (2018); Peñacoba-Antona et al. (2021b); Campos et al. (2023)). Inputs should not be analyzed in isolation without considering the increasing dimensional complexity introduced by their interactions and combinations. GSA methods are particularly well-suited to assess sensitivity in GIS models, as these models are rarely additive or linear. Additionally, GIS models often use spatially heterogeneous inputs that may be auto-correlated, making GSA an effective approach for capturing complex interactions and dependencies within the data (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Peñacoba-Antona et al., 2021a).

Weights of objectives are the most studied uncertainty sources given their inherent subjectivity coming from human preference, the potential biases arising during their elicitation and the ease with which they can be varied in the model (Chen, J.Yu, et al., 2010; Haag et al., 2022a). UA and SA predominantly focus on varying criteria weights in GIS-MCDA studies (e.g. Saint-Geours et al. (2012);Feizizadeh et al. (2014a); Ligmann-Zielinska and Jankowski (2014b); Romano et al. (2015); Feizizadeh and Kienberger (2017); Tang et al. (2018); (Doorga et al., 2019); de Brito et

al. (2019b); (Hošková-Mayerová et al., 2020); Peñacoba-Antona et al. (2021b); Cartwright et al. (2022); Anteneh et al. (2022); Fildes et al. (2022a); Soliman et al. (2022); Campos et al. (2023); Aidinidou et al. (2023); Rafiquee and Shabbiruddin (2024); Marzouk and Azab (2024); Membele et al. (2024). Only focusing on uncertainties arising from weights of objectives has however been often criticized, since models are prone to additional sources of uncertainty (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). Importantly, other sources of uncertainty are also specifically linked to preferences, beyond the weights of objectives. For MCDA, uncertainty can be categorized in three main sources (Bertsch & Fichtner, 2016): (i) input data uncertainties, (ii) preferential uncertainties, further categorized into *intra-criteria preferences* (representing the sites performance within an objective - modelled by value scales) and *inter-criteria preferences* (representing relative importance between objectives - modelled by objectives weighting) and (iii) model uncertainties, referring to simplifications or approximations of reality in model structure. Only a few addresses other parameters, such as value scales for attribute objectives (e.g. Saint-Geours et al. (2012); Peñacoba-Antona et al. (2021b); (Anteneh et al., 2022); (Rane et al., 2023)).

6.3.3 Research aims

This research employs UA and GSA approaches to elucidate all forms of uncertainties in preference parameters: weights of objectives (inter-objectives preferences), value scales of attributes (intra-objectives preferences) and aggregation function type, as represented in the GIS-MCDA planning support system (PSS) named SSANTO: Spatial Suitability Analysis Tool (Kuller, Bach, et al., 2019; Lacroix et al., 2024). Such a PSS can inform spatial planning through its outputs, making it essential to conduct these analyses (Saltelli et al., 2019). Our study addresses a gap in the literature: to our knowledge, no previous study has systematically quantified how different sources of uncertainty in preference parameters, specifically weights, value scales and aggregation function types, affect the outputs of GIS-MCDA PSS. We fill this gap by combining spatially explicit sensitivity analysis with uncertainty propagation across a large set of input combinations, using a Monte Carlo approach tailored to spatial planning.

We seek to answer the following research questions: How stable are the spatial outputs of a GIS-MCDA PSS when subjected to variations in its input parameters? Which input parameters are most influential (between weights of objectives, value scales of attributes and aggregation function) and what is their impact on variability of the BGI suitability maps? What role does robust preferences

elicitation play in setting spatial priorities when integrating diverse stakeholder values into GIS-MCDA PSS?

We aim to (1) identify key input parameters that require better calibration or higher-resolution data to reduce uncertainty in decision outcomes, (2) assess the procedural necessity of thorough preferential parameters elicitation processes, especially in participatory planning contexts where preferences are diverse, conflicting or unstable, and (3) provide a replicable uncertainty and sensitivity analysis approach that enhances the transparency, interpretability and reliability of GIS-MCDA PSS.

6.4 Methodology

6.4.1 Methodological overview

Simultaneously varying input parameters improves UA and SA robustness. Whenever feasible, GSA should be employed to capture full model variability (de Brito et al., 2019a). In this study, we applied the variance-based decomposition method under GSA, with Monte Carlo simulations (MCS), to assess the influence of input parameters on model outputs (spatial suitability maps; Figure 6.1). We performed J model runs, with N samples generated using Sobol quasi-random sequences (Sobol, 1967) and adjusted to specific probability distribution functions (PDF) (see section 6.4.4 for details on the sampling strategy). K denotes the number of input parameters studied.

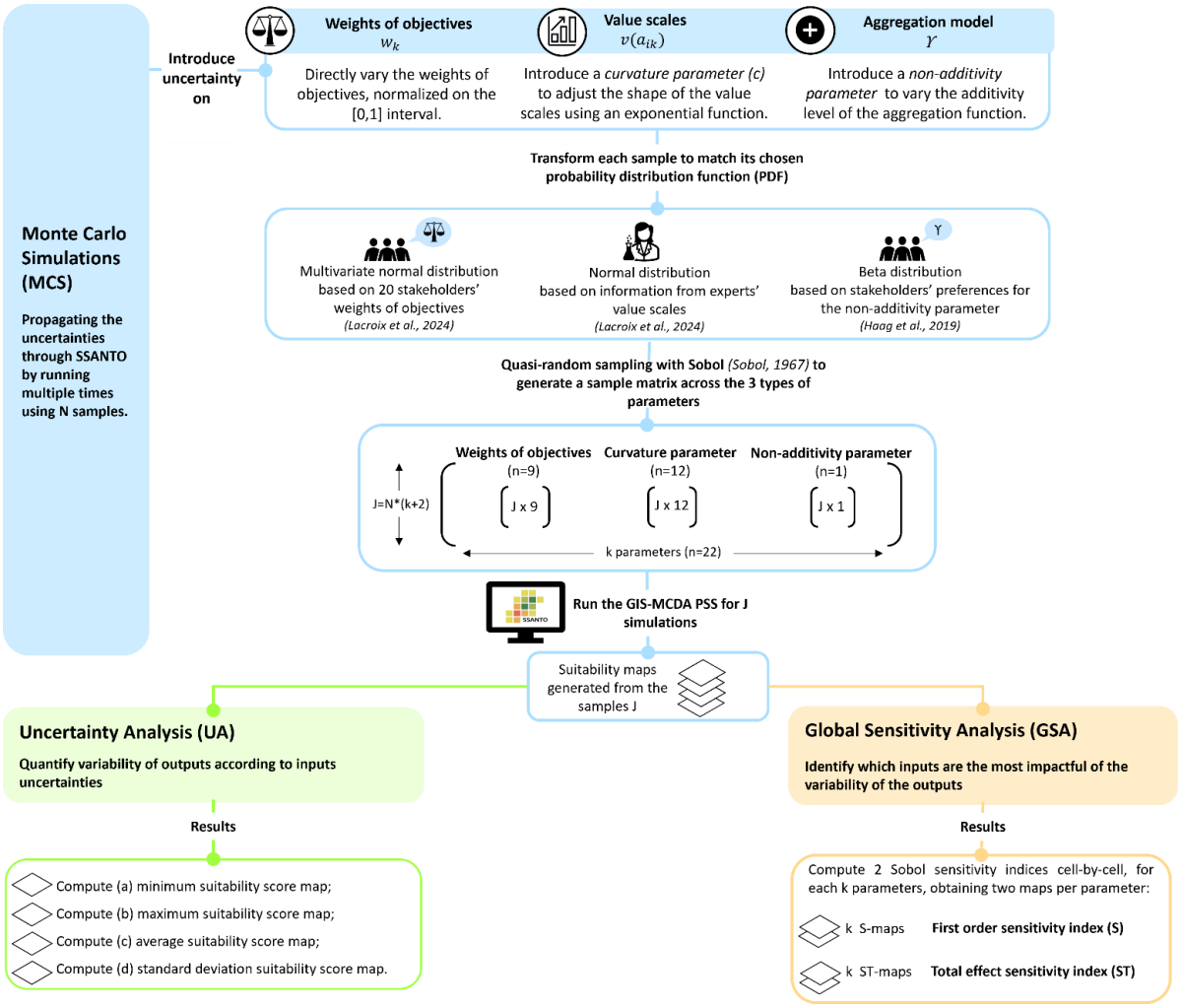


Figure 6.1 Overview of the approach used to perform sensitivity and uncertainty analyses on spatial suitability score maps derived from a GIS-MCDA PSS, based on three types of input parameters (n = 22)

6.4.2 Case study settings

We conducted the UA and SA of a GIS-MCDA PSS called SSANTO (Kuller, Bach, et al., 2019), using Lacroix et al. (2024) hierarchical framework as input, applied to a case study in Quebec, Canada.

6.4.2.1 SSANTO: A GIS-MCDA PSS

SSANTO (Kuller, Bach, et al., 2019) is a computer software integrating MCDA with GIS to generate spatial suitability maps. While we applied it to BGI planning in urban areas, it is suitable

for any spatial analysis. We applied the hierarchical framework by Lacroix et al. (2024), co-developed with stakeholders in Quebec, Canada, as input parameters in the SSANTO model, to conduct UA and SA with realistic stakeholders and experts values.

According to this hierarchical framework, SSANTO takes as input a *hierarchy of objectives*, each measured by *attributes*, which are represented by geospatial data. *Value scales* measure site performance in relation to each objective by translating geospatial attribute data to a value between 0 and 1. This step was done through experts' consultations (17 experts during 12 sessions) in the previous study of Lacroix et al. (2024). Users can then assign a weight to each objective to express their preferences regarding trade-offs between objectives. This step has been executed with 20 stakeholders during a previous case study Lacroix et al. (2024). The hierarchical framework defines the higher-level objectives, lower-level objectives, attributes and their associated geospatial datasets (see Lacroix et al. (2024).

SSANTO was developed using a weighted linear combination (WLC) (Eisenführ et al., 2010; Malczewski, 2000) with full additivity to aggregate information into raster suitability scores. However, a newer version allows non-additive aggregation following this study.

Spatial analysis considers two perspectives: needs and opportunities (Kuller et al., 2017). The *opportunities* perspective, also known as "a BGI needs a site," refers to locations that offer the best opportunities for implementing them. The *needs* perspective, also known as "a site needs a BGI," refers to locations with the greatest need for the benefits provided by them. In this UA and SA study, we focus on the needs perspective for small BGI systems (bioretention cells, infiltration systems, swales) to limit parameters, reduce computation and because of its sufficiency to achieve the study's research aims. Figure 6.2 shows SSANTO PSS inputs, processes and outputs.

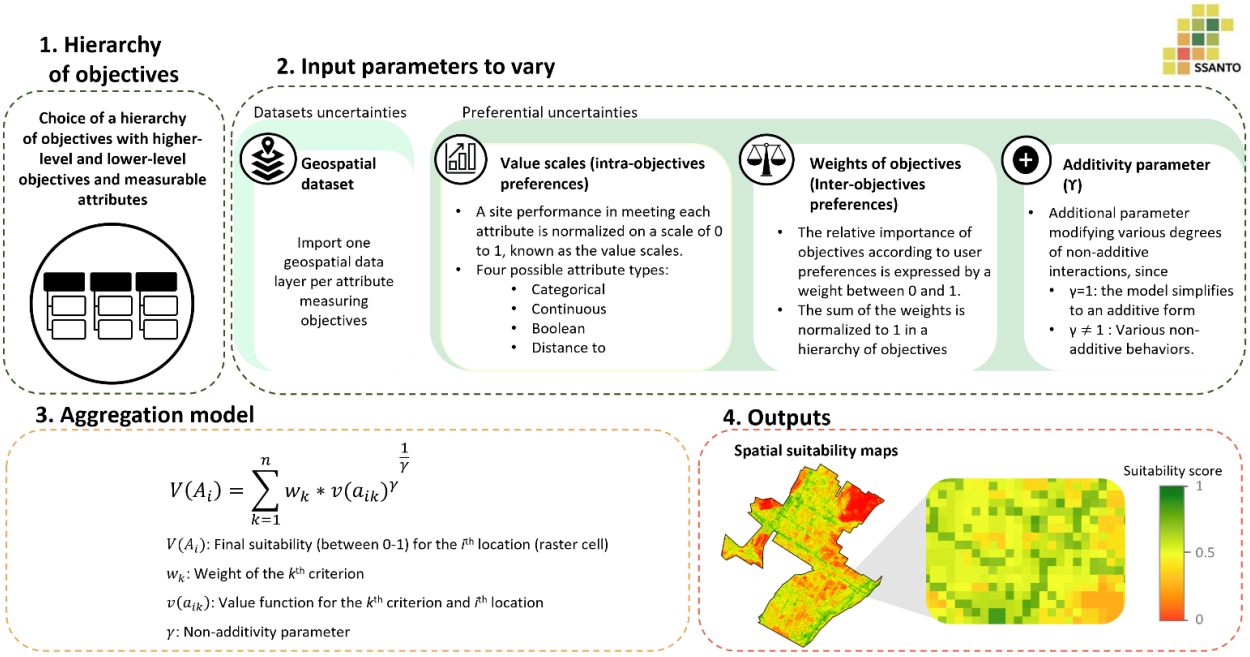


Figure 6.2 Operating diagram of the PSS SSANTO

6.4.2.2 Study area selection

We selected an area in a large city in Southern Quebec (Canada) to limit pixel numbers and speed computation, while maintaining geospatial variability. Among five candidate boroughs (all part of a larger ongoing project), this one had the widest range of attribute values across the geospatial datasets, ensuring meaningful combinations of input geospatial datasets and broader applicability of UA and SA results to other regions in Quebec using the same datasets. We calculated a Shannon entropy index (Shannon, 1948) to quantify spatial heterogeneity and the effective number of categories across datasets (Altieri et al., 2021). The selected study area covers an area of 10.1 km², divided into 12,838 raster pixels at a 40-meter resolution. Further details are in Appendix F-1.1.

6.4.2.3 Geospatial datasets

Table 6.1 details the objectives, attributes and geospatial datasets used in the GIS-MCDA PSS all related to small BGI types. We did not assign default scores to areas lacking data, assuming exclusion would reduce bias. Thus, UA and SA focus on nine sub-objectives (of 12) evaluated via 12 attributes (of 18) to assess needs-based suitability within Lacroix et al. (2024)'s framework, balancing completeness and parameter reduction.

Table 6.1 Selected objectives, attributes and geospatial data for UA and SA in the BGI suitability analysis based on Lacroix et al. (2024)

Objective	**Identification**	**Attribute**	**Attribute type**	**Geospatial data**	**Source**	**Studied input parameter** ***w*** **: Weight of objective** ***VS*** **: Value scale**
1.Minimizing exposure to urban flooding	1.Floods_Vulnerability	Level of vulnerability to flooding due to runoff	Categorical	Heavy rain vulnerability index	Open data Montréal (2022)	*w_1.Floods* *vs_1.Floods_Vulnerability*
2.Minimizing exposure to heat islands	2.Heat_Vulnerability	Level of vulnerability to heat waves	Categorical	Heat wave vulnerability index	Open data Montréal (2022)	*w_2.Heat* *vs_2.Heat_Vulnerability* *vs_2.Heat_Temperature classes*
	2.Heat_Temperature classes	Relative temperature difference classes	Categorical	Urban heat/coolness islands and relative temperature differences	Institut national de santé publique du Québec-INSPQ (2023)	
3.Maximizing user-friendliness of active and public transportation	3.Transport_Active	Distance to active transportation infrastructure depth (m)	Distance to	Bicycle network	Open data Montréal (2023)	*w_3.Transport* *vs_3.Transport_Active* *vs_3.Transport_Public*
	3.Transport_Public	Distance from public transit infrastructure depth (m)	Distance to	Bus and metro routes	Société de transport de Montréal -STM (2023)	
4.Maximizing protection of underground drinking water sources	4.Water_Contamination	Presence of contaminated sites	Boolean	List of contaminated sites	Open data Montréal (2018)	*w_4.Water*
5.Maximizing the visibility of BGI	5.Visibility_Point of interest	Distance to a point of interest depth (m)	Distance to	Recreational, sports and cultural facilities	Open data Montréal (2020)	*w_5.Visibility* *vs_5.Visibility_Point of interest* *vs_5.Visibility_Population density* *vs_5.Visibility_Land use type*
	5.Visibility_Land use type	Land use type	Categorical	Property assessment units - CUBF	Open data Montréal (2017)	
	5.Visibility_Population density	Population density (population/km^2)	Continuous	Population density by dissemination area	Statistics Canada (2016)	
6.Maximizing greening of socially and materially disadvantaged areas	6.Disadvantage_Index of disadvantage	Index of material and social disadvantage	Categorical	Quebec Deprivation Index 2021	Institut national de santé publique du Québec-INSPQ (2021)	*w_6.Disadvantage* *vs_6.Disadvantage_Index of disadvantage*
7.Minimizing impervious surfaces	7.Impervious_Percentage of imperviousness	Percentage of impervious surfaces per urban drainage basin (%)	Continuous	Percentage calculation from Canopy index	Modified from Montreal Metropolitan Community-CMM (2021)	*w_7.Impervious* *vs_7.Impervious_Percentage of imperviousness*
8.Maximizing green cover	8.Green_NDVI	Vegetation cover [threshold with NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)]	Categorical	Canopy index	Montreal Metropolitan Community-CMM (2021)	*w_8.Green* *vs_8.Green_NDVI*
9.Maximizing BGI distribution	9.Distribution _Deficit of BGI	Percentage of deficit of non-street drainage infrastructure area per drainage basin (%)	Continuous	On-street drainage infrastructure	City of Montréal	*w_9.Distribution* *vs_9.Distribution _Deficit of BGI*

6.4.3 Simulation method

Simulations are powerful for assessing uncertainty propagation in spatial models, particularly with unknown error distributions (Feizizadeh et al., 2014b; Tenerelli & Carver, 2012). MCS allow inputs to vary across their full range, generating multiple suitability maps from PDFs and has become the dominant statistical approach for UA (Feizizadeh et al., 2014b). MCS introduces randomness via repeated sampling, which can use pseudo-random or low-discrepancy sequences for better reproducibility and computational efficiency (Burhenne et al., 2011). Quasi-Monte Carlo simulations (QMCS) employ quasi-random sequences like Sobol to reduce sampling variability and accelerate convergence of sensitivity indices (Burhenne et al., 2011). We ran *J* QMCS simulations, calculated with equation 1:

$$J = (k + 2) * N \tag{6.1}$$

Where *k* is the number of input parameters and *N* the number of samples, which is 3,750 in our case, leading to 90,000 model runs with 22 input parameters (*k*).

6.4.4 Sampling strategy for input parameters

Sample generation critically affects convergence speed and sampling points coverage in simulations. Simple random sampling is the simplest, but advanced methods Latin Hypercube Sampling (LHS), the winding stairs method (Jansen et al., 1994), the FAST (Cukier et al., 1978), its extended version (Saltelli et al., 1999), random balance designs (Tarantola et al., 2006) and quasi-random sequences (QR) such as Sobol sequences (Sobol, 1967). Sobol sequences are low-discrepancy (or quasi-random sequences), deterministic and uniformly distributed, offering efficient space-filling, faster convergence, and reproducibility, while being cost-effective compared with LHS (Burhenne et al., 2011; Renardy et al., 2021; Saltelli & Annoni, 2010). They have been applied in spatial models (Delgado & Sendra, 2004; Jeon-Young Kang et al., 2022; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Lilburne & Tarantola, 2009b).

In this study, we used Sobol sequences to generate a sample matrix of *J* simulations and *k* parameters (22 parameters, including objective weights, value scale curvatures and the non-additivity parameter), transforming each to match its PDF and range. Table 6.2 summarizes the

simulation setup. This approach allows simultaneous inclusion of all preference-related parameters in UA and SA, using stakeholder-based and expert-based ranges for realistic uncertainty representation.

Table 6.2 Characteristics of input parameters

Parameter type	**Varying input parameter**	**Number of input parameter per simulation**	**PDF**	**Range**
Weights of objectives	Weights (*w*)	One *w* per objective (9)	Multivariate normal distribution centered around real elicited weights with stakeholders, normalized	Varies across objectives
Value scale	Curvature parameter (c)	One *c* value per attribute (12)	Normal distribution centered on the curvature parameter c of the exponential function that best approximates the expert-derived value scale	Varies across attributes
Aggregation function	Non-additivity parameter (ϒ)	One ϒ value for the hierarchy of objectives (1)	Beta distribution with α=1.5 and β=1	$\gamma \in [0.1, 1]$

The next three sections outline the sampling strategies used for each category of input parameters: weights of objectives (section 6.4.4.1), value scales (section 6.4.4.2) and the aggregation function (section 6.4.4.3).

6.4.4.1 Weights of objectives

Stakeholders' weights assigned to objectives are often assumed as the main source of uncertainty, reflecting trade-offs between competing objectives (Chen, J.Yu, et al., 2010; Haag et al., 2022b). We assessed this uncertainty as follows (Figure 6.3):

- We first generated Sobol sequences from a uniform PDF across the full range $w \in [0, 1]$ and normalized them to sum to 1. In order to obtain weights consistent with the stakeholder-elicited multivariate normal distribution, the inverse transformation using the quantile function of the multivariate normal cumulative distribution function has been used (Zhao et al., 2022). We used a normal distribution informed by 13 stakeholder-elicited weights from a previous study (Lacroix et al., 2025), where the ranges of the distribution vary across objectives. While 12 objectives were originally considered (Lacroix et al., 2025), we focused on nine objectives, renormalizing weights accordingly. Normal distributions were

centered on elicited means with standard deviations reflecting stakeholder variability (Appendix Table F.1.1), producing weight combinations that realistically capture stakeholder preferences.

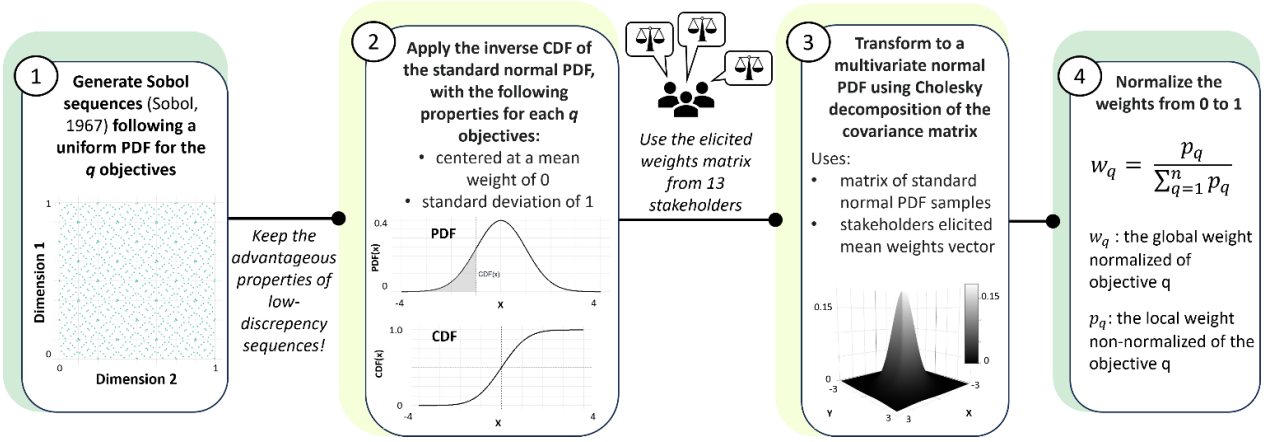


Figure 6.3 Procedures for generating samples of weights of objectives following two different strategies

6.4.4.2 Shape of the value scales

Under multi-attribute value theory (MAVT), value scaling transforms attribute values into a common scale ranging from 0 to 1 (Eisenführ et al., 2010). This approach is based on the principle that decision-making can be modeled using value scales that reflect stakeholders' preferences, enabling the transformation of different alternatives into numerical scores for ranking and comparison (Ferretti et al., 2014). A common simplification often made under MAVT is assuming linear value scales (Scholten et al., 2015). In our previous study (Lacroix et al., 2024), value scales were elicited through consultation with experts for the hierarchy of objectives and were mostly non-linear. Value scales reflect expert judgment (Keeney, 1996) and are therefore inherently subjective. Although this input parameter is rarely examined, it is acknowledged that it should be considered for a more comprehensive and integrated UA/SA ((de Brito et al., 2019a; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014a; Plata-Rocha et al., 2012a).

We varied the shape of the attributes value scales to assess its impact on suitability results and evaluate the usefulness of employing robust value scale elicitation. We used the one-parameter representation method to modify the shape of value scales by transforming them into an exponential

function and introducing the curvature parameter c (Kirkwood, 1997). The curvature parameter is varied by the following equation (Lahdelma & Salminen, 2012):

$$v(x_i, c) = \begin{cases} \dfrac{1 - \exp(-c \cdot z)}{1 - \exp(-c)} & for\ c \neq 0 \\ z = \dfrac{(x - x_{worst})}{(x_{best} - x_{worst})} & for\ c = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

where x_i is the attribute value of a given pixel for the attribute i, x_{worst} represents the worst attribute level x, x_{best} represents the best attribute level x, c is the curvature parameter of the exponential value scale and $v(x, c)$ is the exponential value scale of attribute x based on the curvature parameter c.

We used the value scales elicited with experts in the study by Lacroix et al. (2024) and transformed them into exponential functions for three of the four measurable attribute types: categorical, continuous, and distance-based. For categorical attributes, we ranked the categories based on the order provided by experts as the first step of the direct method (Eisenführ et al., 2010) used for value scale elicitation. These ranks were then used to determine x_{worst} and x_{best}. For continuous and "distance to" attributes, we directly used the best and worst attribute values defined by the experts. For boolean attributes, whose "shape" cannot be varied (only two attribute values), we kept the value scales fixed as provided by the experts. See Figure 6.4 for the procedure followed according to the attribute type.

We used again a sampling strategy, initiated with quasi-random Sobol sequences:

- We first generated Sobol sequences from a uniform distribution. We transformed these low-discrepancy sequences into a normal distribution centered on the curvature parameter c of the exponential function that best approximates the expert-elicited value scale for each attribute from Lacroix et al. (2024), with a standard deviation (SD) of 0.25, following Haag, Lienert et al. (2019). Varying the curvature parameter preserves both the direction and general shape (concave, convex, or linear) of the experts' value scales. To identify the optimal curvature parameter (c*) that best approximates the expert-elicited value scale with an exponential function, we minimized the sum of squared errors (SSE) between the expert-defined values (y_i) and the candidate exponential function $v(x_i; c)$, (see Equation 6.3). For each expert-defined value scale, this minimization isolated the parameter c* that provided

the best fit. To incorporate uncertainty, we then defined a PDF from a normal distribution centered on c^* and used a range wide enough to encompass the original expert-defined points.

$$c^* = min \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - v(x_i, c)\right)^2 \tag{6.3}$$

Where c^* is the optimal curvature parameter obtained by minimizing SSE, $v(x_i, c)$ is the exponential value scale of attribute x_i based on the curvature parameter c, y_i is the expert-assigned suitability score corresponding to the attribute value x_i. These are the points directly provided by the experts in the original value scale, which we seek to approximate with an exponential function. See Appendix F.1.2.2 for the representation of the value scales elicited by experts in Lacroix et al. (2024), along with the best exponential function fit and the maximum and minimum variation range of each attribute.

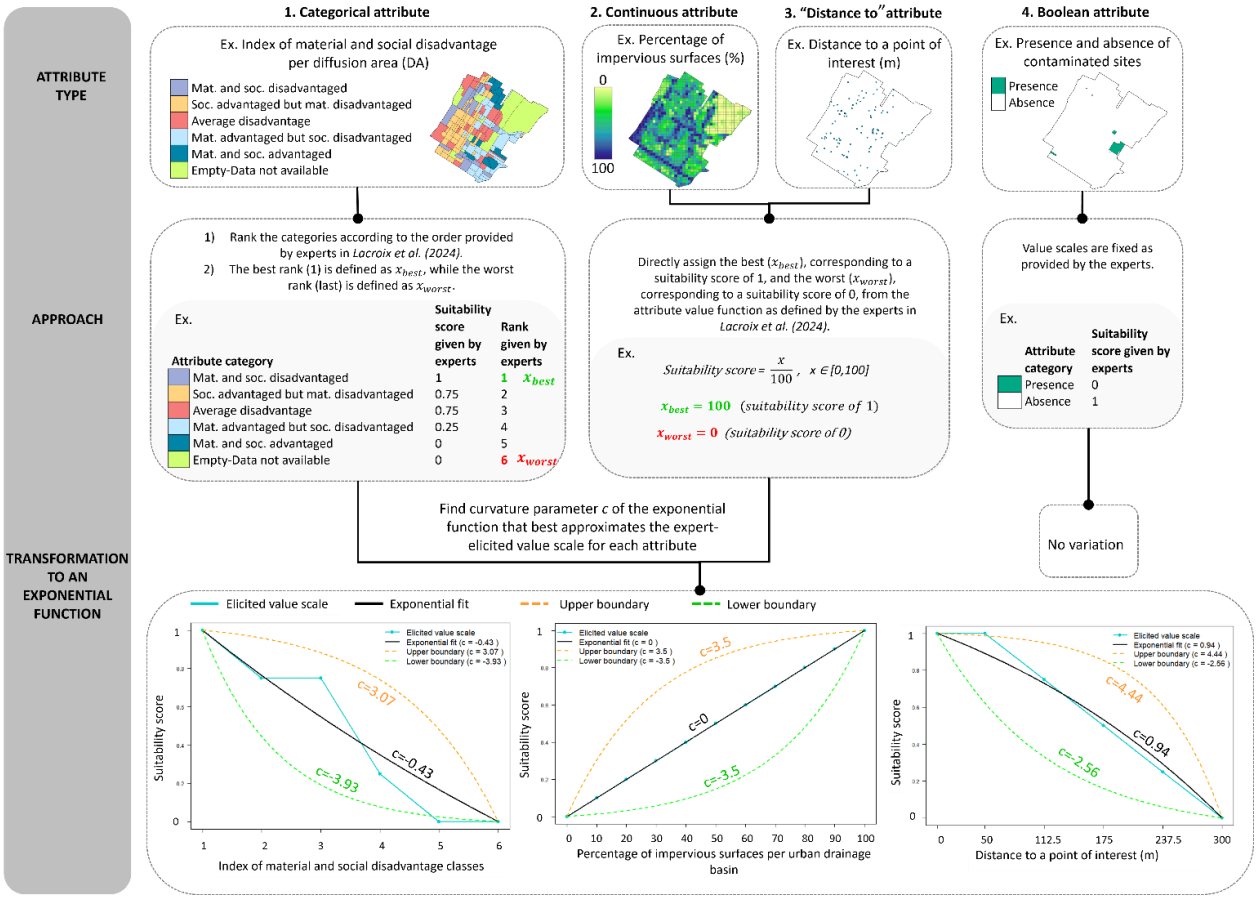


Figure 6.4 Procedure for generating samples of value scales according to the attribute type

6.4.4.3 Aggregation function

The aggregation function selected to combine the partial evaluations of objectives into a suitability score significantly influences the result (Langhans et al., 2014). The choice of aggregation function may vary depending on the study context. For example, in aquatic ecological assessments, minimum aggregation is often applied to render water quality unsatisfactory when only one of the objectives is not met (Langhans et al., 2014). The most commonly used aggregation in MCDA is the simple fully additive value model (Zheng & Lienert, 2018). However, applying full additivity allows a poor performance in one objective to be compensated by strong performance of other objectives (Langhans et al., 2014). For example, if two objectives are assigned equal weights and a pixel performs poorly with respect to *maximizing water infiltration into soils*, a fully additive aggregation function would allow this deficit to be fully compensated by a strong performance on

minimizing conflicts with building foundations. As a result, the final suitability score for implementing a BGI at that location could still be moderate. However, it might misalign with stakeholder preferences, since they could not want any compensation, as with the minimum aggregation where the pixel would take the worst performance as the final suitability score (Langhans & Lienert, 2016a). In non-additive models, weights can differ in interpretation from those in additive models, as they may either compensate for or amplify the effects of the non-additivity parameter (Haag, Lienert, et al., 2019).

We wanted to assess whether the additivity assumption had a significant impact on spatial suitability results. We introduced the non-additivity parameter γ using the power mean aggregation, given by the equation (Haag et al., 2022b):

$$V(A_i) = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^{n} w_i v_i(\mathrm{a})^{\gamma}\right)^{\frac{1}{\gamma}} & for \;\; \gamma \neq 0 \qquad if\ all\ v_i(\mathrm{a}) > 0 \\ 0 & for \;\; \gamma \neq 0 \qquad if\ one\ v_i(\mathrm{a}) = 0 \end{cases} \tag{6.4}$$

where $V(A_i)$ is the final suitability score (between 0 and 1), $v_i(\mathrm{a})$ is the normalized value scale between 0 and 1 representing the degree of performance of the alternative for objective i, w_i is the weight of objective i and γ is the non-additivity parameter. The parameter γ can range from −∞ to +∞, with the following implications :

- For $\gamma = 1$, the model is fully additive and for $\gamma \neq 1$ the model is to some degree non-additive. When any attribute value in the value scale equals 0, the aggregation function becomes undefined due to division by 0. To address this computational limitation, if any pixel contains a 0 value in its attribute scale, the suitability score automatically defaults to 0 (Langhans et al., 2014).
- For $\gamma \rightarrow +\infty$, the highest-performing objective within the pixel dominates (optimistic model), whereas for $\gamma \rightarrow -\infty$, the lowest-performing objective dominates (pessimistic model).
- For $\gamma = 0$, the model corresponds to a geometric mean, making it sensitive to low-performing objectives: a very low value in any objective strongly reduces the final pixel score.

- For $\gamma > 1$, the influence of high-performing objectives is amplified, while for $\gamma < 1$, the influence of low-performing objectives is amplified.

Our sampling strategy is as follow:

- We first generated Sobol sequences from a uniform distribution. We transformed these low-discrepancy sequences into a beta distribution where γ bounded between $\gamma \in [0.1, 1]$ with shape parameters $\alpha=1.5$ and $\beta=1$, consistent with best practices (Haag, Reichert, Maurer, & Lienert, 2019). This parameterization yields an expected γ value of approximately 0.64, indicating a moderately non-additive aggregation model. The selected interval accommodates diverse aggregation scenarios spanning from near-geometric mean behavior ($\gamma \to 0$) to fully additive models ($\gamma=1$) (Haag, Reichert, Maurer, & Lienert, 2019). While stakeholder preferences regarding aggregation functions were not explicitly surveyed in our study, we adopted the parameter ranges from Haag, Lienert, et al. (2019) as they comprehensively elicit stakeholder preferences observed in practice.

6.4.5 Uncertainty analysis

For this study, we applied QMCS to generate four UA maps: (a) a minimum suitability map, (b) a maximum suitability map, (c) an average suitability map and (d) a standard deviation suitability map. UA helps quantify and visualize spatial uncertainty in suitability maps and the general stability of SSANTO outputs. Since model inputs span a wide range of possible values, running numerous simulations with sufficiently large sample sizes is essential to ensure robust results (Jeon-Young Kang et al., 2022). Sample size depends on factors such as the number of input parameters and the complexity of the model (Awad et al., 2019). We performed 90,000 runs (J) in the SSANTO PSS and used ArcGIS Pro 3.3.0 (Esri, 2024), using geostatistical operations to analyze spatial variations.

6.4.6 Global sensitivity analysis

6.4.6.1 Variance-based decomposition

We used the variance-based decomposition because it is one of the most effective techniques for GSA (Feizizadeh et al., 2014b; Malczewski & Jankowski, 2020; Puy, Becker, et al., 2022; Saltelli,

2004). This approach is particularly valuable because it accounts for parameter interactions, which play a crucial role in model behavior (Puy, Becker, et al., 2022; Saltelli et al., 2010a). As a model-independent method, variance decomposition explores the entire input distribution probabilistically, often through MCS methods (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). While it has been applied in GIS modeling (Feizizadeh et al., 2014b; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b), its adoption remains novel and limited (Malczewski & Jankowski, 2020). Nonetheless, it offers strong advantages for GIS-MCDA applications (Gómez-Delgado & Tarantola, 2006b). This method decomposes the total variance of model outputs into contributions from each input parameter including both individual effects and interactions. Sensitivity indices derived from this approach include the first-order sensitivity index (S_i), which quantifies the direct impact of an input parameter and the total effect sensitivity index (S_{Ti}), which captures both direct and interaction effects (Saltelli et al., 2008). The first-order index is defined as Equation 6.5:

$$S_i = \frac{Var_i}{Var(Y)} = \frac{Var_{Xi}[E_{x-i}(Y|X_i)]}{\sum_i Var_i + \sum_i \sum_{j>i} Var_{ij} + \cdots + Var_{12\ldots k}} \qquad Si \in [0;\ 1] \tag{6.5}$$

where $S_i \in [0,1]$ represents the proportion of output variance attributed to input Xi, Xi is the i-th input parameter (with up to k parameters), Y is the model output (a scalar value), Var_i is the variance of the conditional expectation of Y given a fixed value of Xi , and $Var(Y)$ is the total variance of the model output Y (Feizizadeh et al., 2014b). The sum of all first-order indices is always less than 1, with the remainder accounting for interaction effects (Saint-Geours et al., 2012).

An example of the calculation of the total effect index S_{Ti} for three input parameters is given by the following Equation 6.6 (Puy, Becker, et al., 2022):

$$S_{T1} = S_1 + S_{1,2} + S_{1,3} + S_{1,2,3} \tag{6.6}$$

Variance-based techniques such as the Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) and Sobol decomposition are widely used (X. Y. Zhang et al., 2015).

6.4.6.2 Indices calculation

Each sampling technique is associated with a specific calculation method or estimator used to compute the sensitivity indices (Lilburne & Tarantola, 2009b; Puy, Piano, et al., 2022). These methods rely on specialized sampling techniques to reduce computational costs while maintaining accuracy (Saltelli et al., 2010a). Sobol analysis is considered one of the most powerful techniques

due to its robustness and efficiency in estimating sensitivity indices (Lilburne & Tarantola, 2009a; Saltelli, 2002; Saltelli et al., 2010b; Sobol, 1993). Radial sampling further improves the estimation of total sensitivity indices (Campolongo et al., 2011; Saltelli et al., 2010a). In spatial modeling, Sobol analysis offers several advantages: it requires no assumptions about the model, calculates both first-order and higher-order sensitivity indices with the same method, explores the full input space and accommodates complex spatial inputs without constraints on their realizations (Lilburne & Tarantola, 2009a). While computationally demanding, Sobol analysis remains one of the most efficient techniques for spatially variable inputs (Lilburne & Tarantola, 2009a).

We used the R package *sensobol* (Puy, Piano, et al., 2022) to estimate both first and total order Sobol sensitivity indices (see Appendix Table F.1.3 for more information).

The variability in spatial suitability maps (resulting from SSANTO) was thus attributed to each input parameter: objective weights, the shape of value scales used to measure objectives and the non-additivity parameter of the aggregation function. In Sobol analysis, a parameter has a low first-order index if its variation produces little change in the model output, meaning it contributes little to the output variance. Conversely, if even small variations in a parameter lead to large changes in the output, its Sobol index will be high. The sensitivity indices were calculated for every pixel of the maps. We produced 2**k parameters* maps, one S_i-map and one S_{Ti}-map for each input parameter. We thus produced 44 sensitivity maps.

Evaluating convergence is essential to assess the stability of the SA, the confidence based on sample size and the justification of assumptions (Sun et al., 2024). Methods for assessing the convergence of the GSA, including criteria for determining an adequate sample size (N), are presented in Appendix F.1.3, where we also specify the approach we employed. These included: the sum of first-order indices $S_i \leq 1$ (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; X. Y. Zhang et al., 2015); the sum of total-order indices (S_{Ti}) greater than the sum of first-order indices (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; X. Y. Zhang et al., 2015); all indices being positive (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; X. Y. Zhang et al., 2015); confidence intervals (CI) ≤ 0.05 (Sarrazin et al., 2016); the upper bound of the CI ≤ 0.1 (Baroni et al., 2018); CI $\leq$ 10% of the value of the most sensitive parameter's index (Herman et al., 2013); and the percentage variability of sensitivity indices between two blocks of model runs $\leq$ 0.5% (Vanrolleghem et al., 2015).

6.4.6.3 Assessment of sensitivity analysis relative to elicited weights and geospatial datasets

To better understand what drives the sensitivity results of the PSS input parameters and whether certain factors might explain the ranking of their influence on the outputs, we explored:

- Links between the first-order sensitivity indices among pixels from weights of objectives and the mean weights elicited from stakeholders (see Appendix F.1.2.1 for the elicited weights of objectives from stakeholders).
- Links between S_{Ti} - S_i (%) from value scale shapes and spatial correlations of individual attribute suitability maps. S_{Ti}-S_i (%) quantify the isolated effect including interactions with other parameters, calculated as the difference between the mean total-order (S_{Ti}) and the mean first-order (S_i) sensitivity indices across the sensitivity map. Individual attribute suitability maps were generated by converting each geospatial dataset into its suitability map on a scale from 0 to 1 using the best exponential approximation of the expert-elicited value scales ($\gamma = 1$). See Appendix Figure F.1.1 for the individual attribute suitability maps and F.2.2 for pairwise Pearson correlations. We compared the S_{Ti}-S_i (%) for each value scale shape parameter to the mean Pearson correlation of its individual attribute suitability maps with all others. This analysis was conducted similarly for the weight of objectives parameters: we compared the S_{Ti} - S_i (%) of each weight of objective (e.g. W_2_*Heat*) with the mean Pearson correlation of all associated individual attribute suitability maps that measure that objective (e.g. *heat vulnerability* and *heat classes* maps).

6.5 Results

Several validation measures allowed us to ensure that 90,000 model runs were sufficient to provide confidence in the results. Results of the convergence measures of the sensitivity indices can be found in Appendix F.2.1. Given the computationally intensive nature of the model, we also concluded that 90,000 simulations represented a reasonable number within the available time constraints. Running the sensitivity indices using the supercomputer *[Narval]* under the management of *Calcul Québec* and *the Digital Research Alliance of Canada* (the Alliance) took 3 hours and 16 minutes, while running the SSANTO model required around 1,000 hours (41.7 days)

to generate the 90,000 maps. We used a computing cluster, a group of interconnected computers that work together as a single, to run three instances of the SSANTO tool in parallel.

6.5.1 Uncertainty analysis

The results of the uncertainty analysis, based on 90,000 Monte Carlo runs, are summarized in Figure 6.5. The minimum (Figure 6.5a) and the maximum (Figure 6.5b) suitability maps show the full range of possible suitability scores for each pixel. Some sites exhibit a minimum suitability of 0, indicating that under certain input parameter combinations, they are unsuitable. Conversely, the same sites can reach maximum values close to 1, meaning they can become highly suitable under alternative input parameter combinations. This large spread highlights the importance of considering uncertainty into decision-making, as certain areas may shift from very suitable to unsuitable depending on assumptions and preferences. The mean suitability map (Figure 6.5c) shows suitability scores that are generally distributed around mid-range suitability levels, indicating that, on average, results are not dominated by extreme scores. The standard deviation (σ) map (Figure 6.5d) depicts the spatial distribution of uncertainty, with values ranging from 0.017 to 0.18. High standard deviation values correspond to areas where suitability scores fluctuate the most, changing according to the choice of weights of objectives, value scales shape of attributes or the degree of non-additivity. Low standard deviation map represents robust areas where suitability remains stable regardless of parameter value choices. Notably, no pixel exceeds a standard deviation of 0.18 on the 0 to 1 scale, indicating that the SSANTO PSS is precise under uncertainties. This suggests that the model does not behave chaotically and that the priority pixels are likely to remain consistent.

By comparing areas of high mean suitability with areas of low σ, we can identify robust zones areas where the model consistently predicts high spatial suitability. Conversely, areas with both low mean and low σ correspond to areas that are consistently unsuitable, offering more confidence in their exclusion. The combination of the mean and standard deviation maps therefore provides valuable insight into both the stability and reliability of model predictions.

Spatially, the eastern part of the study area tends to exhibit both lower mean suitability (low suitability scores) and lower uncertainty (low σ), indicating a more stable suitability pattern under

diverse input parameter combinations. In contrast, the central and western areas show higher mean suitability (high suitability scores) and higher uncertainties (high σ), pointing to a stronger dependency on subjective choices.

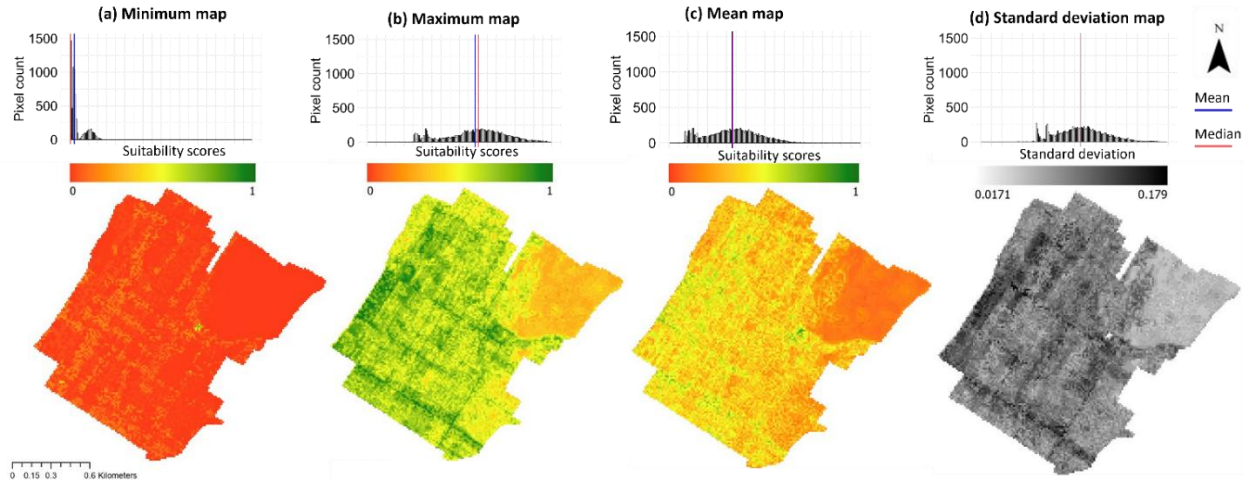


Figure 6.5 Uncertainty maps: Minimum (a), maximum (b), mean (c) and standard deviation (d) suitability maps

6.5.2 Global sensitivity analysis

6.5.2.1 Descriptive statistics results

The results of Sobol GSA were summarized by calculating descriptive statistics among pixels of the study area, i.e. mean, standard deviation, maximum and minimum sensitivity indices values, presented in Table 3. Input parameters with higher sensitivity indices (i.e. close to 100%) exert a stronger influence on the model outcomes. While no universal threshold exists, a value of 5% is often used is GSA to distinguish important from less important input parameters in complex models in SA (X. Y. Zhang et al., 2015). However, this rule of thumb should not be applied to models with only a few input parameters (X. Y. Zhang et al., 2015). In this study, only two parameters exhibited S_i values above 5%.

The Sobol GSA shows that the non-additivity parameter (γ) overwhelmingly dominates the model's spatial suitability outcomes, with first-order sensitivity index (S_i) of 72.40% as shown in Table 6.3. This indicates that the overall model behavior is strongly sensitive to how contributions are combined (i.e. additive vs. non-additive aggregation). This result is entirely consistent with our

expectations, as γ controls how individual performance interact to produce the aggregated suitability score and it changes the structure of the aggregation. Thus, even if the weights of objectives or the shape of the value scales vary, the value of γ can reverse the final suitability score in a pixel. In comparison, the weights assigned to the nine objectives account for a non-negligible share of the outputs variance (mean S_i for all weight parameters: 23.49%), particularly *W_4.Water* (5.10%), *W_1.Floods* (4.91%) and *W_8.Green* (4.43%), while the least influent are *W_5.Visibility* (1.44%), *W_2.Heat* (0.959%) and *W_9.Distribution* (0.315%). The influence of value scales (curvature parameters) is almost negligible (mean S_i for all value scales parameters: 0.23%), suggesting that the shape of the value scale is far less important than aggregation structure and weighting of objectives.

A difference of approximately 0.2 (or 20%) between S_{Ti} and S_i is generally considered as a threshold to determine if a parameter's influence arises from interactions with other parameters (Peñacoba-Antona et al., 2021a). In this analysis, all S_{Ti}-S_i differences were well below this threshold, indicating that model variability is primarily driven by the individual effects of parameters rather than by their combined interactions. This interpretation is further supported by the fact that the sum of all S_{Ti} indices is close to 100% (i.e. 104.66%), confirming that most of the variance in model outputs can be attributed to independent parameter contributions rather than synergistic effects.

Table 6.3 Statistics on sensitivity analysis (first-order index Si and total effect STi) between pixels over the study area. STi-Si (%) quantifies the isolated effect resulting from interactions with other parameters

Input type	Input parameter	S_i (%)				S_{Ti} (%)				S_{Ti}-S_i (%)
		Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	
Aggregation function	Non-additivity parameter (γ)	72.400	12.200	4.660	91.600	74.400	11.000	4.630	91.800	2
Weight (*w*)	w_4.Water	5.100	5.410	-0.0647	39.500	6.920	6.720	0.417	41.100	1.820
	w_1.Floods	4.910	3.210	-1.560	43.000	6.120	3.860	0.357	52.300	1.210
	w_8.Green	4.430	5.340	-3.720	30.800	5.460	5.650	0.215	32.500	1.030
	w_6.Disadvantage	2.160	2.410	-1.270	42.900	3.120	2.590	0.211	42.400	0.960
	w_7.Impervious	2.140	2.250	-0.145	33.400	2.150	2.320	0.0278	19.300	0.0100
	w_3.Transport	2.040	2.170	-4.170	19.600	2.360	2.360	0.0169	22.600	0.3200
	w_5.Visibility	1.440	1.270	-1.450	21.000	2.140	1.780	0.0314	24.300	0.7000
	w_2.Heat	0.959	0.989	-0.241	7.100	1.090	1.080	0.0463	8.780	0.131
	w_9.Distribution	0.315	0.300	-1.340	2.020	0.581	0.276	0.164	3.600	0.266
Value scale (VS)	VS_1.Floods_Vulnerability	0.0888	0.135	0.000	5.930	0.0770	0.128	0.000	6.280	-0.0118
	VS_2.Heat_Temperature classes	0.0399	0.0291	-0.00227	1.300	0.0279	0.0260	0.000	1.450	-0.0120
	VS_8.Green_NDVI	0.0361	0.0619	-0.0303	0.942	0.0640	0.0887	0.000	1.700	0.0279
	VS_7.Impervious_Percentage of imperviousness	0.0338	0.103	-0.0331	7.400	0.0947	0.125	0.000	8.490	0.0609
	VS_5.Visibility_Population density	0.0118	0.00943	-0.0117	0.0684	0.00348	0.00410	0.000	0.115	-0.00832
	VS_5.Visibility_Land use type	0.00980	0.0221	-0.00627	1.570	0.00713	0.00643	0.000	0.348	-0.00267
	VS_6.Disadvantage_Index of disadvantage	0.00612	0.0136	-0.0443	0.127	0.0318	0.0350	0.000	0.378	0.0257
	VS_2.Heat_Vulnerability	0.00336	0.0119	-0.118	0.0791	0.0136	0.0211	0.000	0.144	0.0102
	VS_9.Distribution _Deficit of BGI	0.000632	0.00557	-0.00213	0.0947	0.000715	0.00604	0.000	0.135	8.300E-05
	VS_3.Transport_Active	0.0000941	0.000269	-0.000352	0.00402	0.00000270	0.00000980	0.000	0.000430	-0.0000914
	VS_3.Transport_Public	0.0000908	0.000296	0.000	0.0121	0.00000235	0.00000744	0.000	0.000152	-0.0000885
	VS_5.Visibility_Point of interest	-0.0000605	0.000157	-0.000952	0.00106	0.00000185	0.00000261	0.000	0.0000846	0.0000624

Legend : Low — High

6.5.2.2 Sensitivity in relation to stakeholder weights and geospatial datasets

Figure 6.6 shows the results of the dispersion between the sensitivity of weights of objectives and the mean weights elicited from stakeholders (Figure 6.6a) and the relationship between spatial correlation of individual attribute suitability maps and percentage of interaction contribution (S_{Ti}-

S_i), which reflects how much a parameter, in combination with others, contributes to the variance of the outputs (Figure 6.6b and 6.6c). These analyses demonstrate that uncertainty modeling processes are far from trivial. The relationships between data correlations, stakeholder weights and parameter sensitivities for example are complex and cannot be inferred from simple assumptions without being tested.

Figure 6.6a highlights that there is no consistent relationship between stakeholder-assigned weights and sensitivity indices. We can observe that the highest elicited weights (e.g. *w_1.Floods*, *w_8.Green*, *w_6.Disadvantage* and *w_7.Impervious*) generally correspond to the input parameters that also appear as the most influential in terms of sensitivity. For example, *w_1.Floods* has the highest mean weight assigned by stakeholders during elicitation and also has one of the largest impacts on the variation of the spatial suitability results. That said, we cannot conclude to a general trend, as this is not always the case. For instance, *w_2.Heat* has the second highest mean weight but only a moderate impact on the variance of the results. Consequently, employing a normal distribution centered on the stakeholder-elicited mean weights had no clear influence on the relative ranking of these objective weights regarding their effect on the results.

Figure 6.6b highlights that there is no clear relationship between the mean spatial correlation of the individual attribute suitability maps and the $S_{Ti} - S_i$ indices. We attempted to explore whether the spatial correlation between individual attribute suitability maps (translated form geospatial datasets) could help explain why certain parameters have higher interaction effect. For example, in the study area, *VS_7.Impervious_Percentage of imperviousness* has a S_{Ti} (0.0947%) that is higher than its S_i (0.0338%). The imperviousness dataset is in average the most spatially correlated dataset. The *imperviousness* dataset is the most spatially correlated dataset (r=0.81) with *Heat-Temperature classes*. The second strongest positive spatial correlation (r=0.68) is between *Percentage of imperviousness* and *Heat-Vulnerability*. This suggests that the fact that this dataset is correlated with two other datasets may explain the higher S_{Ti} value. However, no clear trend can be concluded, as the dispersion between these two variables is high and low S_{Ti} indices are also associated with geospatial datasets that are correlated with others.

Similarly, Figure 6.6c highlights that stronger interaction effects for the weights of objectives (*w_4.Water*, *w_2.Heat*, *w_8.Green* and *w_6.Disadvantage*) may be related to higher spatial correlations among the associated individual attribute suitability maps. This relationship could be

explained by the fact that the weights directly modulate the geospatial datasets during the aggregation process. When a weight of objective is applied to individual attribute suitability maps, and thus to the underlying geospatial datasets, that already exhibit strong spatial correlations, it can increase the overall interaction effects observed in the sensitivity analysis.

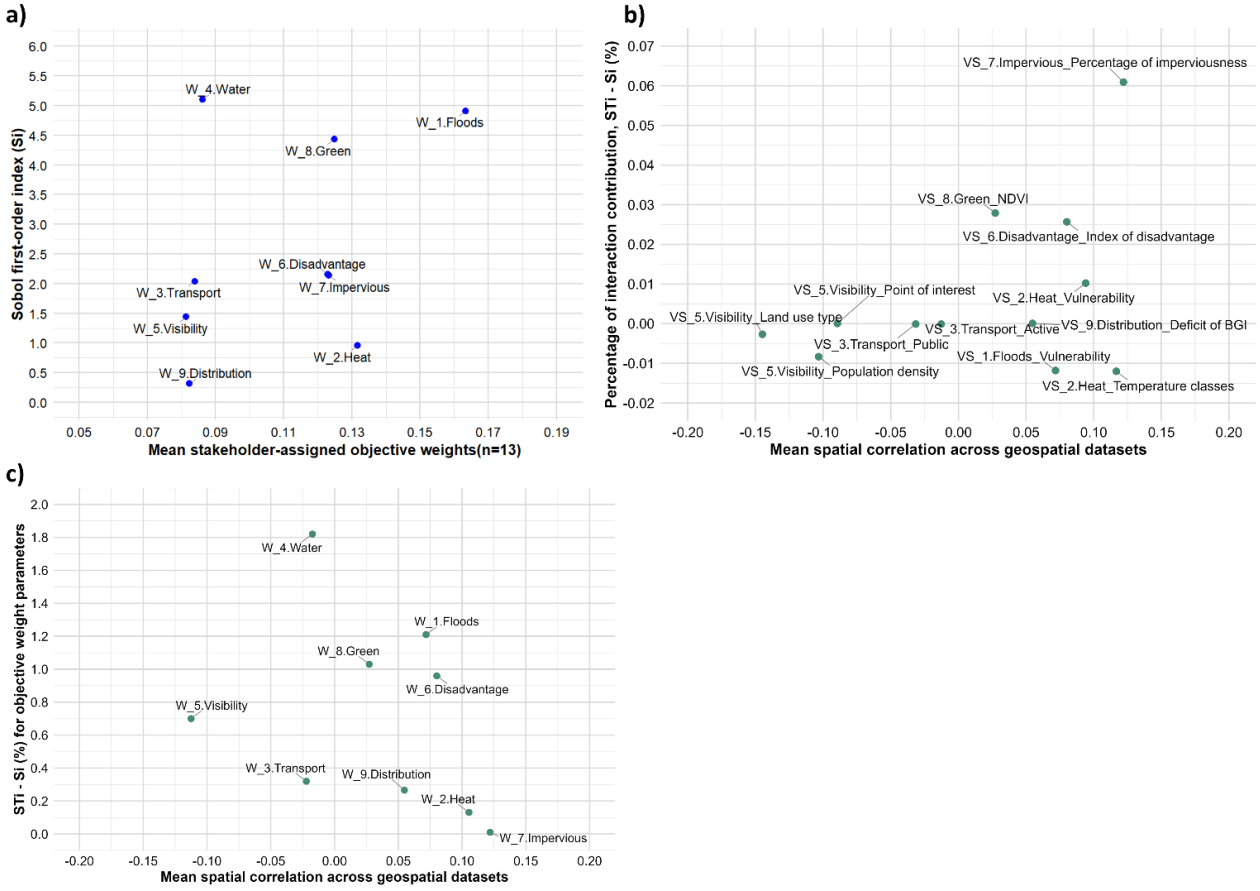


Figure 6.6 (a) Relationship between the mean Si (%) across pixels for weight of objective parameter and the mean stakeholder-assigned weights. (b) Relationship between the mean STi - Si (%) across pixels for value scale shape parameters and the spatial correlation

6.5.2.3 Spatial GSA results

The spatial maps of the first-order Sobol indices (S_i) in Figure 6.7 provide valuable insights into how different input parameters contribute to the variance of the model output across the study area for selected input parameters. Maps of all S_i and S_{Ti} values for each input parameter can be found in Supplementary Information presented in Appendix F.2.3. Overall, the results reveal strong

contrasts in the relative importance of input parameters, as well as pronounced spatial heterogeneity in their influence. The spatial results of the Sobol GSA show that even if an input parameter does not appear as the most influential on average across all pixels, its impact can be localized in certain areas. This highlights the importance of complementing Table 6.3 with Figure 6.7, which highlights spatial variability of the sensitivity indices.

While the average S_i values of the weights of the nine objectives remain modest (typically 2 to 7%), the S_i maps (Figure 6.7) reveal localized "hotspots" where their importance can exceed 20 to 40%. For instance, *w_1.Floods* exhibit particularly strong local influences in specific sectors, suggesting that the weighting of these objectives can substantially alter the suitability outcomes in those areas. These spatially concentrated sensitivities highlight that weight elicitation is not uniformly important across the study area.

We hypothesize that the individual attribute maps, i.e. the translation of geospatial datasets into standardized value scales, affect the range observed in the S_i maps. During aggregation, when multiple objectives contribute to a pixel's suitability, a weight of objective applied to a high individual performance (i.e. a high value scale score) produces a greater amplitude in the final suitability score (i.e. a wider range of possible final suitability scores between 0 and 1). This leaves more room for that weight to influence the output compared to another objective whose individual attribute suitability score is lower in the same pixel. Thus, individual performance of an attribute in a pixel could influence the variability in Si maps. *w_1.Floods* objective's value scale map spans a wide range (0 to 1) across pixels, resulting in higher S_i variability in areas with heterogeneous underlying performance values.

However, high local performances in the individual attribute suitability maps do not necessarily correspond to high sensitivity in the same pixels. This underlines the necessity of conducting a spatially explicit GSA, as underlying interactions among objectives and geospatial datasets.

Considerable spatial variability is observed for several parameters, for example, *W_4.Water, W_8.Green* and *VS_5.Visibility_Population density* show large ranges, while non-additivity remains consistently high across space (average min: 4.6, average max: 91.6), confirming its robustness as a dominant parameter.

The value scales (e.g. curvatures of the value scales) contribute negligibly (<0.1%). Their nearly uniform and very low S_i values indicate that the functional form of the value transformations has little impact compared to the aggregation structure and the choice of weights.

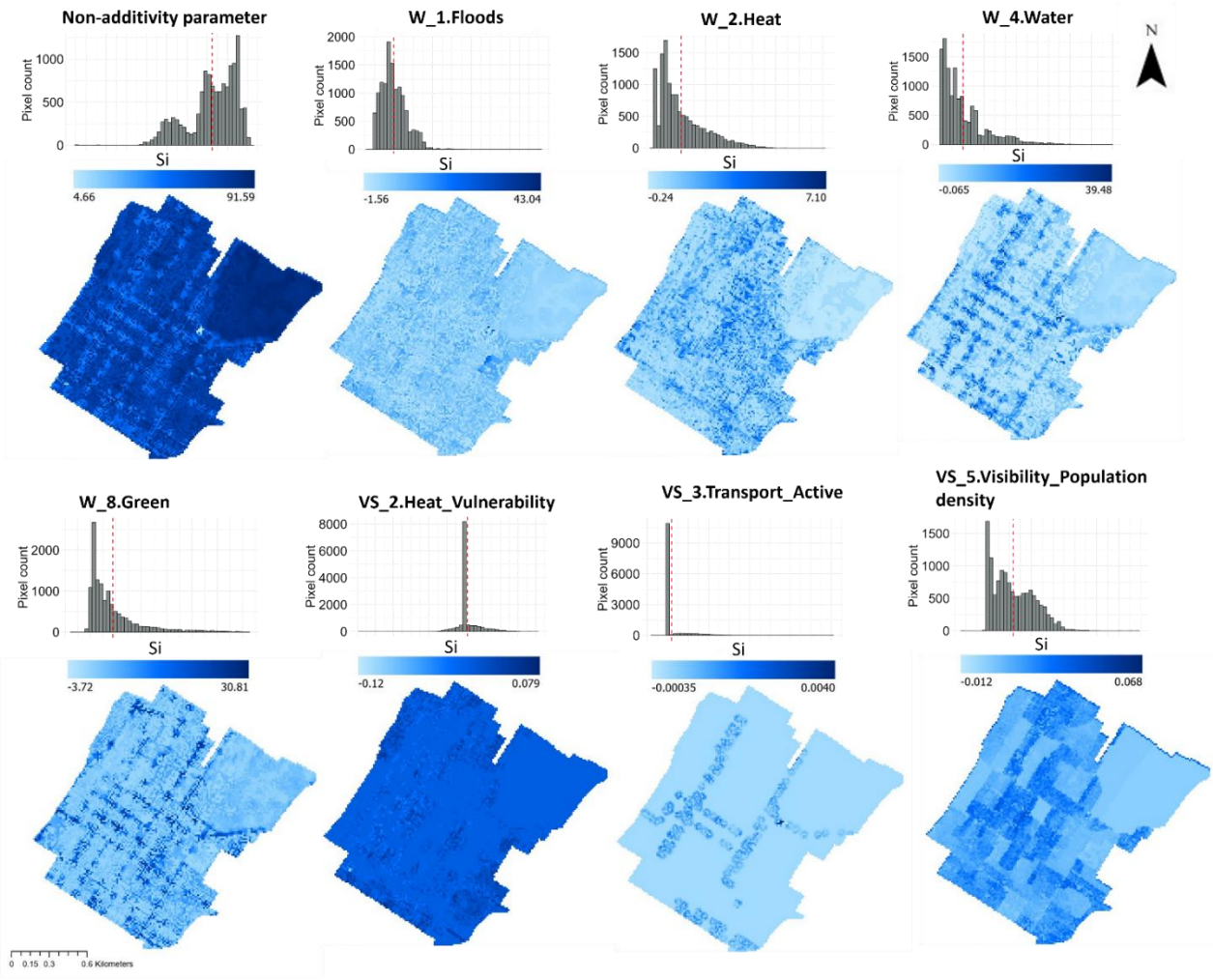


Figure 6.7 Sensitivity maps of first-order index Si

The S_i and S_{Ti} maps are largely similar, indicating that for most input parameters, the individual contribution (S_i) aligns with the total contribution including interactions (S_{Ti}) (see Figure 6.8). In other words, across the majority of the study area, interactions with other parameters do not substantially alter the spatial distribution of effects, which is consistent with the generally low percentage of interactions observed between parameters (i.e. low S_{Ti} values). However, for certain parameters, namely *VS_2.Heat-Vulnerability*, *VS_5.Visibility_Point of interest* and *VS_9.Distribution*, the spatial distribution of pixel values differs between S_i and S_{Ti}. This suggests

that the individual impact of these parameters does not occur in the same locations as their combined effects with other parameters, revealing specific spatial interactions. Despite these exceptions, the overall spatial variation of S_{Ti} indices for the value scales remains low, indicating that interactions between parameters do not lead to major spatial differences across the study area for these parameters.

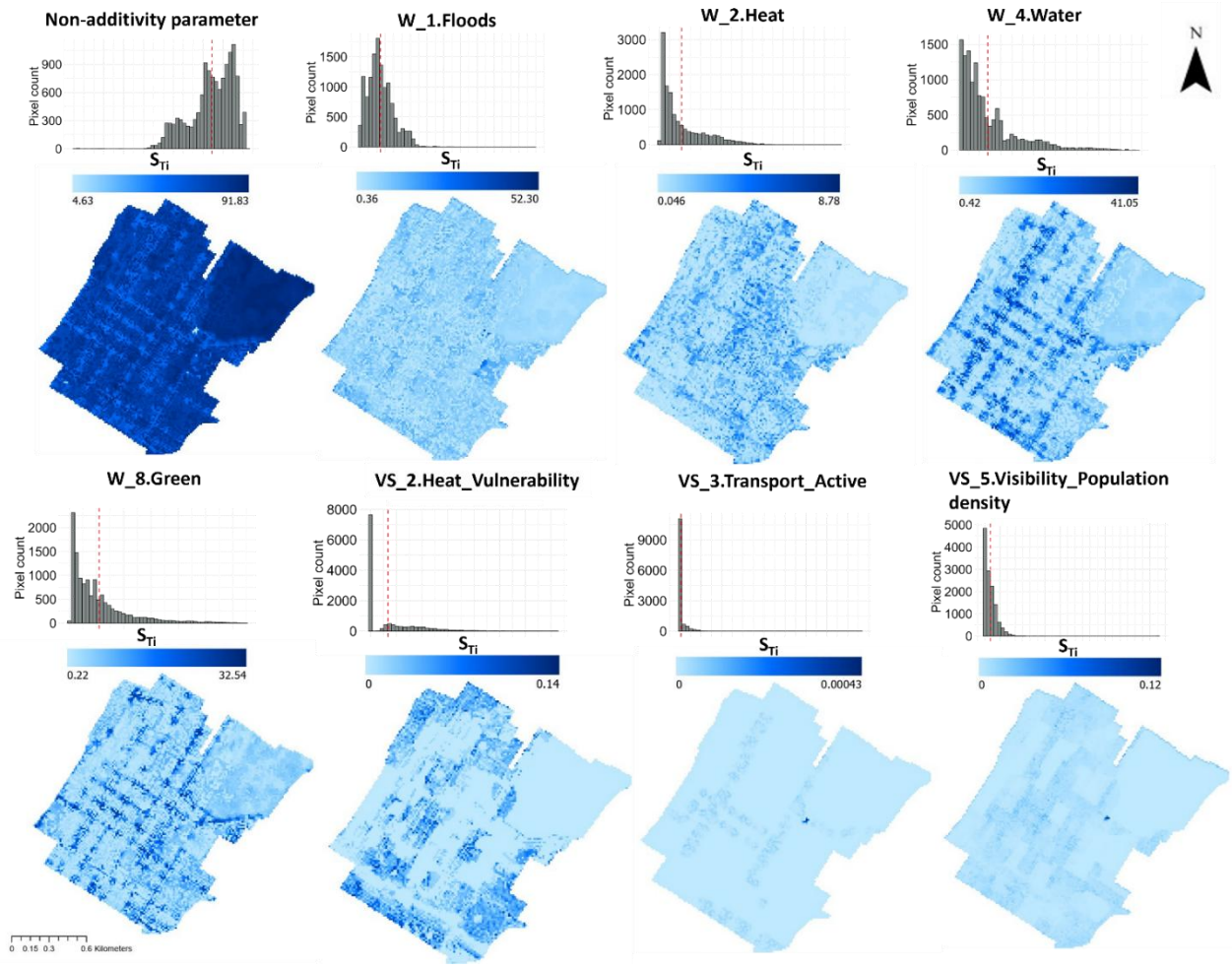


Figure 6.8 Sensitivity maps of Total effect index STi

6.6 Discussion

Section 6.6 is structured into two main parts: section 6.6.1 discusses how the results inform the process of preference elicitation, focusing on methodological implications and section 6.6.2 presents the study's limitations and outlines avenues for future research.

6.6.1 Implications for elicitation process

The elicitation process required to obtain weights of objectives and value scales for each attribute is both a time-consuming and challenging process for the research team and the participating stakeholders and experts (Lacroix et al., 2024). For example, Lacroix et al. (2024) spent 21 hours across 12 distinct sessions with 17 experts eliciting value scales (35 experts*hours) of 56 attributes. Estimating these parameters remains one of the main challenges in developing spatially explicit MCDA models (Malczewski & Jankowski, 2020). Therefore, it is essential to examine the influence of these input parameters to determine whether such an extensive elicitation effort is truly necessary, and, if so, to justify it as a means of supporting transparent and defensible participatory decision-making. In comparison, eliciting weights of objectives took two hours with 32 stakeholders (64 stakeholders*hours) (Lacroix et al., 2025).

Previous studies have often focused primarily on the impact of weights, without considering other sources of uncertainty such as value scales or the aggregation model (Chen, J.Yu, et al., 2010; Haag et al., 2022a; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). This limits the ability to identify which parameters should be prioritized during the elicitation process. Our study sheds light on this issue by analyzing parameter sensitivities relative to one another, rather than in isolation. When compared across all input parameters in the model, the influence of individual value scales appears one to two orders of magnitude less important than that of individual weights, while weights are an order of magnitude less influential than the non-additivity parameter (γ). The results demonstrate that by varying more than just the weights of objectives, we gained valuable insight into the model's behavior. Otherwise, one might have assumed that the model could be simplified without losing meaningful information. For instance, when comparing the ranking of first-order sensitivity indices (S_i) by parameter type, *VS_2.Heat_Temperature classes* ranks among the most sensitive value scales (S_i = 0.0399, SD = 0.0291), whereas *W_2.Heat* shows one of the lowest sensitivity indices among the objective weights (S_i = 0.00959, SD = 0.00989).

Our results are consistent with previous GIS-MCDA sensitivity studies, in that only a few parameters exhibit a strong influence on the model outcomes (Gómez-Delgado & Tarantola, 2006a; Peñacoba-Antona et al., 2021a; Perpiña et al., 2013). In particular, the γ emerged as a decisive parameter shaping the results, underscoring the importance of engaging stakeholders in discussions about the degree of additivity underlying their preferences. Similarly, Haag, Lienert, et al. (2019)

found that the ranking of alternatives in their MCDA application was highly sensitive to the aggregation model used (mean S_i : 72.40%). The literature also highlights that non-additive preferences are emerging as a common phenomenon in practical decision-making (Haag, Reichert, Maurer, Lienert, et al., 2019; Langhans & Lienert, 2016a; Reichert et al., 2019). The γ parameter can in fact be elicited to discriminate between additive and non-additive preference structures. Haag, Lienert, et al. (2019) developed a probabilistic framework using indifference statements to elicit trade-offs between combinations of attributes and derive aggregation preferences. Their approach, based on computer-assisted personal interviews and an interactive tool, allows respondents to express when two scenarios with different attribute levels are perceived as equally preferable.

Although eliciting preferences for model aggregation entails additional effort (Zheng & Lienert, 2018), our GSA suggests that prioritizing this effort is warranted, as other parameters have comparatively lower influence, indicating that less effort may be needed in eliciting them. This further suggests that tools may be needed to more effectively guide the elicitation of additivity levels within models and beyond elicitation tools, it may be valuable for GIS-MCDA tools to include the capability to vary the γ parameter, as implemented in the latest version of the SSANTO tool. These conclusions are important, considering that the full additivity is a predominant assumption made in majority of (GIS-)MCDA models (Eisenführ et al., 2010; Haag, Lienert, et al., 2019; Zheng & Lienert, 2018).

Our results indicate that the weights had a comparatively lower influence on model outcomes (mean S_i for all weight parameters: 23.49%). As all preference-related parameters were varied simultaneously, the Sobol indices express each parameter's proportional contribution to total model variance. Therefore, while the weights appear less influential than the γ parameter, they still play a meaningful role in shaping the model's outcomes. Peñacoba-Antona et al. (2021a) similarly found that the weights were not the primary drivers of model sensitivity; rather, variations in the values within the input data layers had a greater influence on the outcomes of their GIS-MCDA model for the optimal location of constructed wetlands. This raises the question of the relevance of using a robust method for eliciting objective weights, such as the swing weighting method we used to define the ranges of variation (Lacroix et al., 2025). Especially since Lacroix et al. (2025) noted that stakeholders found the process cognitively demanding and experienced the swing weighting

method differently: while some found ranking and scoring intuitive, others found it confusing. Haag, Lienert, et al. (2019) demonstrated that simply ranking objectives, rather than applying the swing weighting method, had a substantial impact on the results, potentially highlighting the sensitivity of model outcomes to the elicitation procedure itself. Given the range of impact that variations in objective weights had on the results in our study (from 0.315% to 5.10% per objective and 23.49% for all weight parameters), we believe it remains important to carefully elicit these weights with stakeholders. There are additional benefits to using an online elicitation of stakeholder weights, as it facilitates "factual learning", providing insights into stakeholders' preferences, the information they consider and their value-based reasoning (Aubert et al., 2024), while also encouraging them to reflect on and communicate their priorities, fostering engagement and a sense of empowerment in decision-making.

Furthermore, representing stakeholders' subjective uncertainties as PDFs, as proposed by Haag et al. (2022b) and Refsgaard et al. (2007), could enhance the depiction of preferential uncertainty while potentially easing the cognitive demands of the elicitation process.

The GSA also helped identify specific objectives that warrant particular attention due to divergent stakeholder preferences. For instance, Lacroix et al. (2025) found that *W_1.Floods* showed moderate agreement among stakeholders (CV = 0.48), while *W_4.Water* exhibited the lowest consensus (CV = 0.79). Both parameters also demonstrated relatively high sensitivity, with Sobol indices of 5.10% (reaching up to 39.50% locally) and 4.91% (up to 43% locally), respectively (see Table 6.3). Such cases highlight the importance of paying special attention in participatory decision contexts to influential parameters associated with low agreement as they may more strongly influence the spatial suitability maps.

We found that the shape of the value scales had comparatively little influence on the results (mean S_i for all value scales parameters: 0.23%). Haag, Lienert, et al. (2019) similarly observed for 'regular' (non-spatial) MCDA Lahdelma and Salminen (2012), suggesting that the exact form of the value scales may play a limited role in shaping the overall results. Some studies have employed rough elicitation methods to capture only the direction and shape of the value scale(Scholten et al., 2015; Zheng et al., 2016; Zheng & Lienert, 2018), which can reduce the time and cognitive load for experts, rather than eliciting the function using a more robust approach, such as the bisection method.

To guide decision-makers in designing and implementing GIS-MCDA, Tableau 6.4 presents practical recommendations for eliciting preference-related input parameters based on the findings of this study

Tableau 6.4 Recommendations regarding the elicitation process of input parameters

	Input parameter	**Conclusion**	**Potential recommendations**
High sensitivity	Aggregation function	The variation of the non-additivity parameter (γ) in the aggregation function has a strong influence on the variability of suitability scores (mean S_i of 72.40%).	• It is advisable to explicitly elicit the additivity or interaction preferences from stakeholders rather than assuming full additivity, which is a common but potentially oversimplified assumption.
Medium sensitivity	Weights of objectives	Weights of objectives generally exhibit high to moderate sensitivity (mean S_i of 23.49%), confirming their critical influence on model outcomes.	• Continue using a structured, supervised elicitation process for obtaining weights of objectives, as this remains a key driver of variability in MCDA results. • Since weighting methods could lead to potential inconsistency and biases, adding more consistency checks (e.g. logical checks in ranking or scoring to ensures weights sum to 1 or follow a predefined order. or alert stakeholders if their assigned weights are contradictory, etc.) and using imprecise or interval-based weights would be advisable (Scholten et al., 2015; Zheng et al., 2016). • Communicate transparently with participants about how weight uncertainty affects the robustness of spatial prioritization. Sobol sensitivity maps highlight areas where uncertainty or stakeholder disagreement has the greatest impact, helping to guide targeted stakeholder engagement and prioritize data improvements in those high-sensitivity zones.
Low sensitivity	Value scales	The shape of value scales, guided by the know direction and extreme points elicited from experts, has a negligible influence on the variability of suitability scores (mean S_i of 0.23%).	• Although their sensitivity is low compared to other input parameters, eliciting representative value scales remains good practice to ensure interpretability and legitimacy of the decision model. However, rough elicitation of the shape of the value scales could be considered to reduce the cognitive load and the time (Scholten et al., 2015; Zheng et al., 2016). Eliciting the extreme points (suitability scores of 0 and 1) and the direction of the value scale should also be considered. In this study, we varied the curvature of an exponential function while maintaining the experts elicited direction and extreme points; this had only a limited impact on the results. Nevertheless, caution is needed and this should not be interpreted as implying that eliciting the value scale is unimportant. • We could focus on spending more time eliciting the shape of the value scales in areas with high spatial variability, since more diverse data points across the territory will engage the value scale more fully, making its accurate specification more important.

6.6.2 Limits and future research

Some limitations of this study remain. First, although we concluded that 90,000 Monte Carlo simulations were sufficient in this context, increasing the sample size *N* further could have reduced the number of negative sensitivity indices. Related to the sampling strategy, we explored variations in the shape of the value scales by using exponential functions to approximate the experts' elicited value ranges. This is a simplification, as the actual value scales provided by the experts did not strictly follow exponential forms. Furthermore, we restricted the variation of the γ parameter to a range representing stakeholders' actual preferences (between 0.1 and 1). However, γ can take negative values or exceed 1. Future studies could explore a wider range of γ values to assess its broader impact with other types of aggregation functions. It is also important to note that we assumed a constant γ across all branches of the objective's hierarchy. Varying γ across branches could allow capturing the diversity in stakeholders' reasoning or different levels of uncertainty among objectives, potentially revealing additional insights into the model's sensitivity. Since the γ parameter influences how the other parameters in the model interact (Haag, Lienert, et al., 2019), future work could conduct a similar sensitivity analysis with a stable γ value to assess the relative sensitivity of the other input parameters in that case.

Moreover, while our analysis accounted for uncertainty in preferential parameters, it did not include uncertainty in the geospatial input datasets. This decision was made to keep the analysis manageable in terms of time and computational resources, as the number of parameters had to be realistically limited. Prior research suggested considering spatial resolution and data quality when conducting SA (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Lilburne & Tarantola, 2009b).

Our geospatial datasets contained "No Data" areas. To avoid biasing the analysis by assigning suitability scores to these locations in the value scales, we limited the study to the nine objectives for which complete spatial coverage was available, without any gaps. However, a potential solution for future work would be to elicit preferences for these "No Data" areas directly from stakeholders.

Future research could examine alternative assumptions for the PDFs of input parameters, such as uniform distributions, to assess whether Sobol sensitivity indices are influenced not only by the structural role of each parameter in the model but also by the way these parameters are sampled. As noted by Feizizadeh and Kienberger (2017), both the type of PDF and the range of variation

can affect the results. In our study, we used ranges that reflect real stakeholder preferences, consistent with their recommendation when such information is available. Conducting the analyses with uniform distributions could further clarify the extent to which the choice of sampling distribution impacts the sensitivity outcomes.

Finally, the spatial resolution chosen for the maps could also influence the results. Higher-resolution maps may smoothen out uncertainties, potentially reducing the apparent importance of certain parameters (Lilburne & Tarantola, 2009b). Saint-Geours et al. (2012) similarly observed that the relative contribution of uncertain spatially distributed model inputs decreases as the size of the spatial units considered for output aggregation increases. Additionally, we could explore whether excluding objectives with minimal influence, such as *maximizing BGI distribution*, along with its parameters (*W_9.Distribution* and *VS_9.Distribution _Deficit of BGI*) affects the outcomes of analyses. If results remain largely unchanged, this could provide a rationale for simplifying the model without compromising its insights.

6.7 Conclusion

This study provides the first comprehensive assessment of how stakeholder-defined parameters, namely weights of objectives, value scale shapes of attributes and the degree of additivity in the aggregation function, jointly affect the outcomes of a GIS-MCDA model in a participatory planning context. To our knowledge, this is the first time that a full uncertainty and global sensitivity analysis has been simultaneously applied to all these preferential parameters derived from real stakeholder and expert inputs for GIS-MCDA PSS. Conducting 90,000 Monte Carlo simulations to explore the variation of 22 input parameters represents a rare and technically demanding effort, providing a robust empirical foundation for identifying which inputs most strongly influence the spatial distribution of suitability and for guiding researchers and practitioners in efficiently prioritizing resources when including stakeholders in a PSS.

Our results reveal a clear hierarchy of influence among input parameters: the non-additivity parameter (γ) dominates model sensitivity, with an order of magnitude greater impact than weights of objectives and another order of magnitude greater than value scale shapes. This finding has critical implications: the assumption of additivity, commonly made for simplicity in MCDA, can therefore substantially alter spatial suitability outcomes. Certain weights of objectives remain

influential in SSANTO PSS, particularly for *maximizing protection of underground drinking water sources* (W_4.Water), *minimizing exposure to urban flooding* (W_1.Floods) and *maximizing green cover* (W_8.Green), with the latter two generally assigned higher weights by stakeholders. The shape of value scales, however, exerts only minor influence on outcomes. Interactions among parameters are limited, confirming that most variability arises from individual effects rather than complex parameter interdependence.

Importantly, the spatially explicit global sensitivity analysis reveals that parameters with modest global influence can still exert pronounced local effects. Some inputs that appear minor when averaged across the study area nonetheless drive substantial variations in suitability within specific regions. This highlights the need to complement aggregated sensitivity indices (e.g., Table 6.3) with spatial representations (e.g., Figure 6.7) to fully capture the heterogeneous nature of model sensitivity. Relying solely on global indices risks overlooking these localized dynamics, potentially leading to misguided simplifications or the omission of parameters that are locally critical. Indeed, the uncertainty analysis reveals that certain areas fluctuate from entirely unsuitable to highly suitable depending on the combination of input parameters, while others remain robust across all scenarios. Recognizing this distinction between sensitive and robust zones is essential for supporting more informed and spatially nuanced prioritization.

From a practical standpoint, these insights have direct implications for how resources should be allocated during participatory MCDA processes. Explicitly eliciting or at least questioning the additivity assumption in aggregation function should become standard practice in participatory modeling, marking a potential paradigm shift in how such models are constructed. Consequently, stakeholder engagement should focus far more on eliciting and discussing the degree of additivity, while weights deserve secondary but still meaningful attention and value scales could be de-prioritized. Here is a summary of implications for practice:

- **γ dominates model sensitivity:** its impact exceeds weights by an order of magnitude and weights exceed value scales by another.
- **Modeling choices matter:** assumptions about additivity can reshape spatial suitability results.
- **Elicit and discuss γ explicitly:** don’t assume additivity.

- **Focus stakeholder effort strategically:** emphasize γ and key weights; de-prioritize value scales.
- **Consider spatial variability:** parameters with low global influence may still drive important local effects.
- **Sensitivity analysis is essential:** model behavior is not trivial or predictable from stakeholders mean elicited weights or spatial autocorrelation alone, comprehensive uncertainty and sensitivity analyses are needed to reveal underlying dynamics.

Overall, this work represents a significant methodological and practical contribution. It demonstrates that integrating uncertainty and global sensitivity analyses into participatory GIS-MCDA is not only feasible but essential. The approach provides a transparent, replicable framework for identifying which subjective and structural assumptions most shape spatial outcomes, offering a valuable tool for designing more robust, defensible and practice-oriented decision-support systems.

CRediT authorship contribution statement

Sandrine Lacroix: Writing – original draft, Writing – review & editing, Data curation, Investigation, Software, Visualization, Methodology, Formal analysis, Conceptualization. **Martijn Kuller:** Writing – review & editing, Conceptualization**,** Methodology, Supervision, Resources, Validation. **Jonathan Jalbert:** Writing – review & editing, Conceptualization, Methodology, Software, Supervision, Validation. **Danielle Dagenais:** Writing – review & editing, Methodology, Supervision, Validation. **Françoise Bichai:** Writing – review & editing, Conceptualization, Resources, Methodology, Validation, Supervision, Funding acquisition.

Acknowledgements

The calculations were performed on the supercomputer *[Narval]* under the management of Calcul Québec and the Digital Research Alliance of Canada (the Alliance). The operation of this supercomputer is funded by the Alliance, Québec's Ministry of Economy, Innovation and Energy (MEIE) and the Fonds de recherche du Québec (FRQ). We would like to express our gratitude to the Solydd Solutions team (K. Leumassi, E.Kenmogne and J.-R. Guiala) for their substantial

contribution to the software development of the SSANTO PSS and the integration of the sensitivity analysis functionalities into the system.

This research project has been funded by the Ministère de l'Économie, de l'innovation et de l'énergie du Québec (Social Innovation Project 22-24-PSOv2a-57337) and the Fonds de recherche du Québec, Nature et technologies (individual grant of the last author, Research Support for New Academics).

Appendix. Supplementary data

Supplementary Information to this article can be found at: Annexe F

Data availability

Data will be made available on request.

CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE

La discussion générale de la thèse vise à lier les résultats présentés dans les chapitres 4, 5 et 6 afin d'en ressortir les principales contributions académiques et pratiques. Un retour sur les objectifs de recherche et les principaux résultats est d'abord présenté à la section 7.1 . Les questions de recherche abordées dans la thèse sont ensuite présentées séparément à la section 7.2 afin de discuter plus en profondeur des principales conclusions. Des questions de recherche supplémentaires sont approfondies aux sections 7.3 et 7.4 afin de discuter des implications pratiques des résultats issus des chapitres 4, 5 et 6.

7.1 Synthèse des contributions du projet de recherche

Ce projet de recherche étudie le développement d'un outil d'aide à la planification (OAP) basé sur les systèmes d'information géographique (SIG) et l'aide à la décision multicritère (ADMC) pour la planification spatiale stratégique des infrastructures bleues-vertes (IVB) de gestion des eaux pluviales en milieu urbain. S'appuyant sur les principes de la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT), le projet explore trois axes majeurs de l'adaptation et du développement de l'OAP: la structuration du problème décisionnel par le développement d'un cadre d'analyse spatiale multicritère (CHAPITRE 4), la détermination des informations préférentielles, telles que les échelles de valeurs en collaboration avec des experts clés et les préférences de parties prenantes vis-à-vis des objectifs de planification des IVB (CHAPITRE 4 et 5) et l'évaluation de l'OAP par l'analyse des incertitudes et de la sensibilité des cartes d'adéquation spatiale à la variation des entrées liées aux préférences (CHAPITRE 6). Les objectifs du projet de recherche étaient les suivants :

(1) Développer un cadre structuré sous forme de hiérarchie d'objectifs pour la planification stratégique des IVB, incluant un ensemble d'objectifs mesurables reflétant les besoins des parties prenantes et les connaissances des experts, pour supporter l'adaptation de l'OAP SSANTO à différents contextes, en s'appuyant sur la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT).

(2) Évaluer les préférences et le consensus de parties prenantes du milieu institutionnel, municipal, gouvernemental, professionnel et citoyen, par rapport aux objectifs de planification spatiale stratégique de trois groupes d'IVB : les petits systèmes (groupe A : biorétention, système

d'infiltration et noue), les gros systèmes (groupe B : marais artificiel, étang et lac) et les arbres urbains (groupe C).

(3) Quantifier l'influence de l'incertitude dans les paramètres d'entrée liés aux préférences des parties prenantes et experts, soit les poids des objectifs, la forme des échelles de valeurs et le degré d'additivité de la fonction d'agrégation, sur les cartes d'adéquation spatiale des IVB de l'OAP SSANTO.

Dans le cadre de cette thèse, plusieurs améliorations ont été apportées à la version originale de l'OAP SSANTO, développée à Melbourne (Australie) (Kuller, Bach, et al., 2019). Ce développement ne constitue pas uniquement des ajustements contextuels à la réalité québécoise, mais représente également des avancées méthodologiques significatives qui contribuent à la littérature sur le développement des outils SIG-ADMC pour les IVB.

La Figure 7.1 présente les principales contributions académiques et pratiques de chacun des trois objectifs principaux de la thèse.

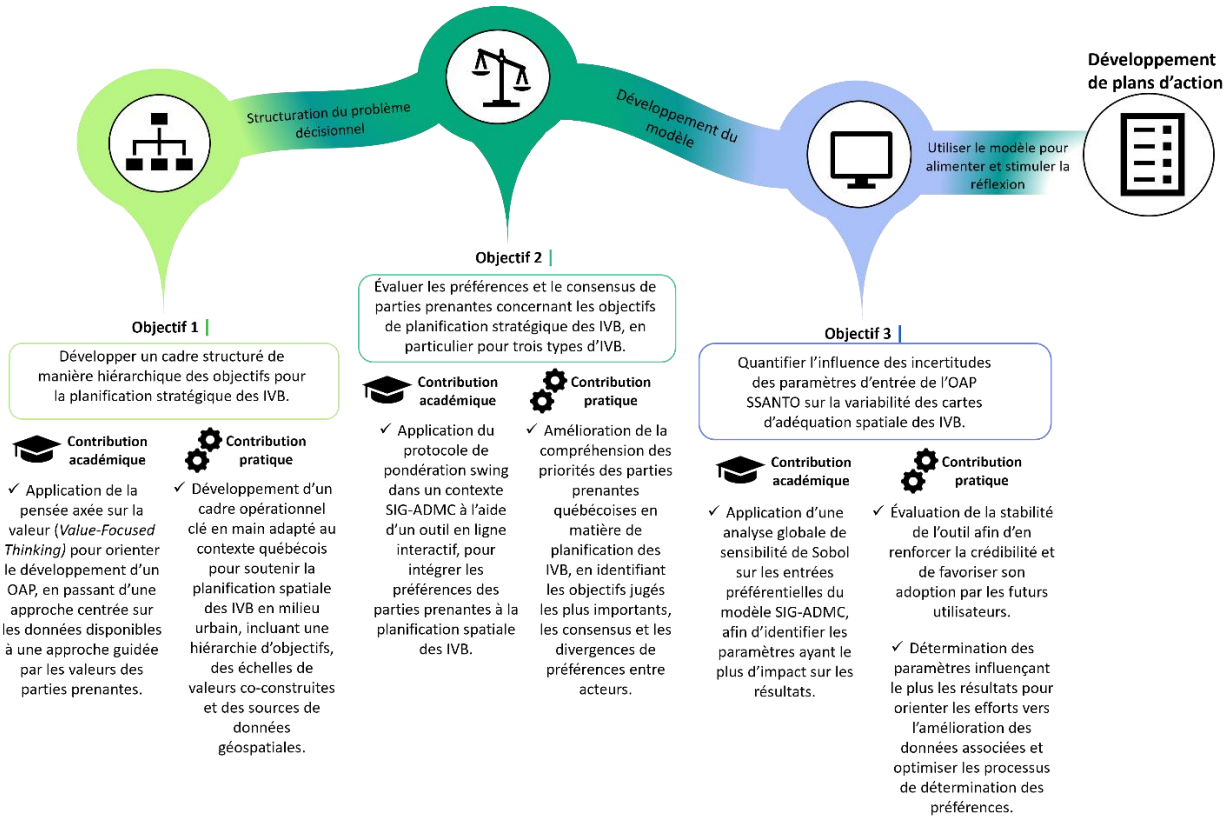


Figure 7.1 Principales contributions académiques et pratiques des trois objectifs du projet de recherche au fil du processus ADMC (Belton & Stewart, 2010)

7.2 Retour sur les questions de recherche

La Figure 7.2 résume le fil conducteur de la thèse, suivant les étapes clés de la MAVT, ainsi que les résultats clés par question de recherche.

L'atteinte du premier objectif principal (CHAPITRE 4) a permis d'identifier les objectifs de planification spatiale stratégique des IVB généralement visés par un ensemble de parties prenantes clés au Québec et souhaités dans un OAP comme SSANTO. Ce travail démontre comment un OAP existant peut être développé pour un nouveau contexte urbain, en tirant profit des ressources et connaissances existantes, tout en intégrant de manière systématique les priorités des parties prenantes.

L'atteinte du second objectif principal (CHAPITRE 5) a permis d'étudier les préférences des parties prenantes vis-à-vis des objectifs de planification spatiale stratégique des IVB, en se basant

sur trois grands groupes d'IVB; les petits systèmes, les gros systèmes et les arbres urbains. Cette quantification a contribué à mieux comprendre les priorités en matière de planification de ces systèmes en milieu urbain.

L'atteinte du troisième objectif principal (CHAPITRE 6) a permis d'identifier le classement des paramètres d'entrée de l'OAP du moins influant au plus influant sur la variation des cartes d'Adéquation spatiale. Le paramètre de degré d'additivité dans la fonction d'agrégation jouait un rôle crucial sur l'adéquation spatiale des petits systèmes d'IVB.

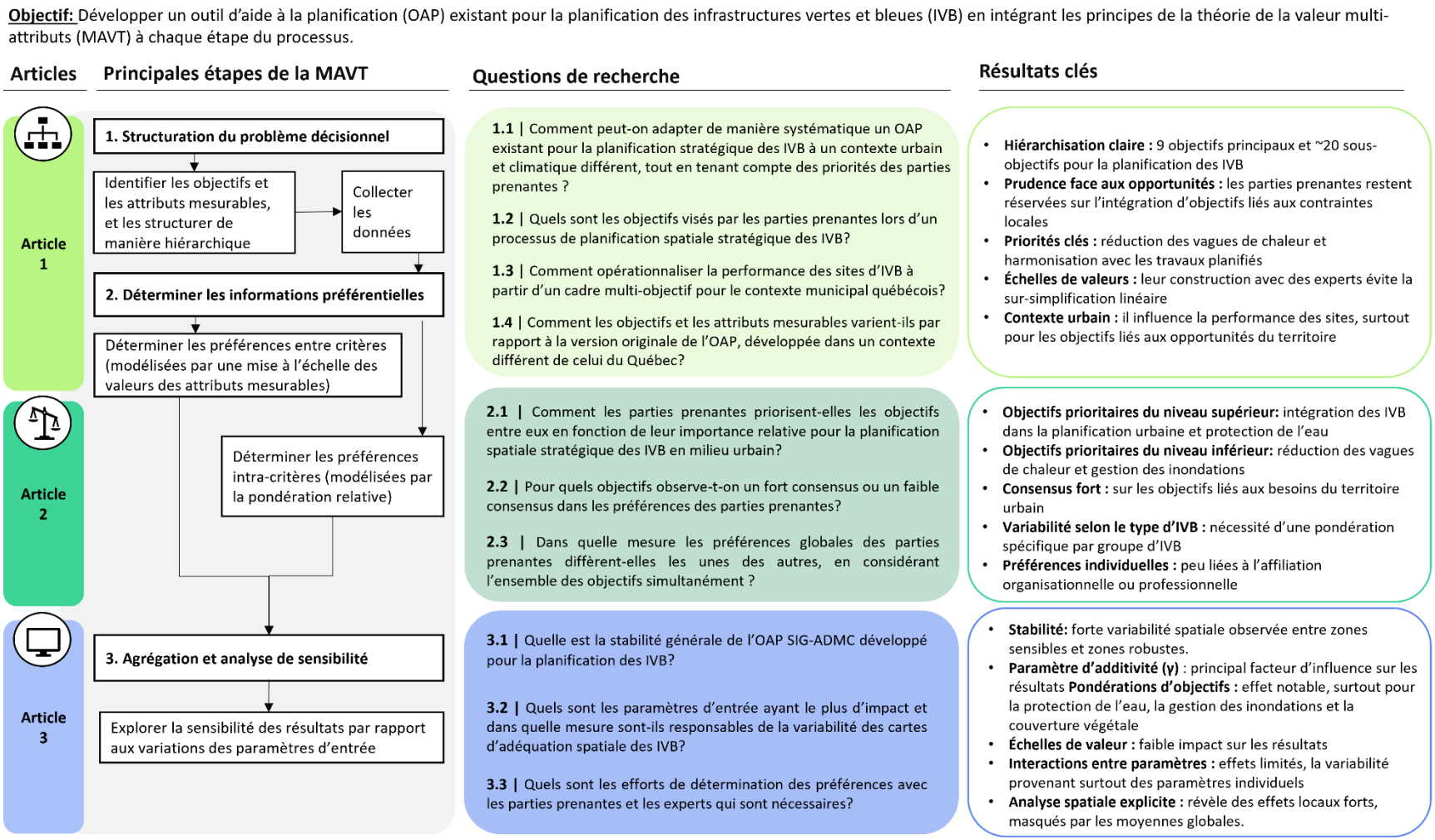


Figure 7.2 Organigramme illustrant le fil conducteur de la thèse, suivant les étapes clés de la MAVT de Bertsch and Fichtner (2016) et Lienert and Aubert (2020) et un retour sur les résultats clés

7.2.1 Apports de la structuration hiérarchique pour l'adaptation d'un OAP

D'une part, la contribution scientifique de la thèse repose sur l'intégration structurée des parties prenantes à plusieurs étapes du processus de développement de l'OAP : choix et l'organisation des objectifs, le choix des attributs mesurables, l'élaboration des échelles de valeurs (CHAPITRE 4) et la pondération des objectifs (CHAPITRE 5). Cette approche répond aux recommandations de la littérature soulignant l'importance d'un engagement actif des parties prenantes dans le développement des OAP (Ferretti & Montibeller, 2016). Étant donné que le manque de gouvernance collaborative dans la planification des IVB constitue l'un des principaux freins à leur implantation (Voskamp et al., 2021), il est essentiel, comme le démontre l'approche de ce projet, d'impliquer activement les parties prenantes et de renforcer la coordination entre les différents services municipaux. Le développement de SSANTO illustre notamment que la gestion fragmentée des données géospatiales entre services constitue un défi, mais que l'outil peut favoriser la collaboration interdisciplinaire et créer une communauté d'échange utile à la planification des IVB.

D'autre part, cette thèse contribue à l'adaptation d'un OAP existant selon une logique orientée vers les objectifs des parties prenantes, en contraste avec l'approche fréquemment guidée par la disponibilité des données (Ferretti & Montibeller, 2016). L'organisation hiérarchique des objectifs représente ici un choix méthodologique central : elle clarifie les liens entre finalités stratégiques et actions opérationnelles, tout en rendant plus explicite la logique de l'ADMC. Contrairement à une simple liste de critères, cette hiérarchie aide les utilisateurs à comprendre le rôle de chaque critère et comment il contribue à des objectifs plus larges (Keeney, 1996; Marttunen et al., 2019). Par exemple, un critère comme le « type de sol », pris isolément, ne permet pas de savoir à quel objectif il se rattache (par exemple, infiltration des eaux, biodiversité, etc.), ce qui rend sa pondération difficile pour les parties prenantes.

En regroupant les sous-objectifs sous des objectifs fondamentaux, cette structuration permet d'identifier plus facilement quelles dimensions viser pour atteindre un objectif fondamental (par exemple, améliorer l'adaptation climatique) et comment ces dimensions peuvent être représentées spatialement. Elle renforce la transparence du processus décisionnel et facilite l'expression des préférences. La structuration réfléchie des objectifs permet d'éviter une dilution des poids (résultats du CHAPITRE 5) pouvant limiter la capacité des analyses ADMC à faire émerger des priorités

claires. Par exemple, plus le nombre d'objectifs considérés est élevé, plus les poids attribués à chacun sont faibles, rendant plus difficile l'identification de différences marquées entre eux.

L'un des constats majeurs de cette étude est que l'engagement actif des parties prenantes a permis d'enrichir le cadre hiérarchique, en menant à une formulation plus claire et à une sélection d'objectifs jugés pertinents par ces parties prenantes (voir CHAPITRE 4). Ce constat rejoint les travaux démontrant que les ateliers fondés sur la pensée axée sur les valeurs améliorent la qualité et la précision des objectifs et permettent une réflexion sur les manières concrètes de les mesurer (Ferretti, 2019). Alors que la planification des IVB repose encore souvent sur des approches descendantes (« *top-down* ») (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021), la littérature soutient que partir des utilisateurs finaux devrait être la base d'un outil innovant pour la planification des IVB (Voskamp et al., 2021). En impliquant les parties prenantes dès les premières étapes du développement des objectifs, notre démarche vise à éviter l'enjeu fréquent d'un développement technologique déconnecté des besoins réels des utilisateurs finaux, tel que souligné dans la littérature où de nombreux outils ont été conçus selon une logique de *technology push* (Voskamp et al., 2021).

7.2.2 Apports de la co-création dans la définition des objectifs d'un OAP

Les ateliers de co-création menés avec un ensemble de parties prenantes clés au Québec (CHAPITRE 4) ont permis d'identifier des objectifs de planification spatiale stratégiques des IVB à intégrer dans un OAP. Parmi ces objectifs figurent la réduction des îlots de chaleur, la lutte contre les inondations urbaines, la prise en compte des travaux prévus, ainsi que la diminution des surverses. Les parties prenantes ont exprimé un intérêt marqué pour l'inclusion des objectifs liés à la biodiversité, tels que l'amélioration de la connectivité écologique et l'augmentation de la couverture végétale, et pour des enjeux sociaux, tels que l'équité sociale et matérielle, le potentiel éducatif et la convivialité des transports actifs et collectifs. Ces résultats soulignent la nécessité d'intégrer les bénéfices sociaux dans les stratégies de planification spatiale des IVB, comme le recommandent plusieurs études antérieures (Hansen et al., 2019; Meerow & Newell, 2017) et en cohérence avec ce que le public valorise (Campbell-Arvai & Lindquist, 2021).

Bien que de nombreux outils traitent divers aspects des IVB (voir la revue de la littérature, section 2.4.1), peu intègrent simultanément une large gamme de co-bénéfices, notamment ceux liés à

la biodiversité ou le développement socio-économique, notamment l'agriculture urbaine, l'amélioration de la qualité de l'air, la production d'énergie, les activités récréatives, la réduction du bruit et la santé et le bien-être (Voskamp et al., 2021). Or, les ateliers de co-création montrent pourtant que les parties prenantes, grâce à leur connaissance du terrain, valorisent une diversité d'objectifs complémentaires qu'il est essentiel de considérer. À ce titre, cette recherche élargit le spectre des objectifs pris en compte dans un OAP, en y intégrant des éléments souvent négligés, plus larges que la biodiversité et les aspects socio-économiques (par exemple, justice environnementale, transport actif, qualité de l'air et santé publique). L'objectif d'un OAP comme SSANTO est non seulement de maximiser des co-bénéfices parfois négligés dans la planification traditionnelle, mais aussi d'intégrer des objectifs réellement visés par les parties prenantes et déjà ancrés dans les processus décisionnels dans la pratique.

Deux constats principaux se dégagent des ateliers de co-création: d'une part, le rôle central joué par la liste maîtresse d'objectifs, élaborée en amont pour soutenir la réflexion des parties prenantes (section 7.2.2.1) et d'autre part, la complémentarité entre les ateliers de co-création et ceux de pondération des objectifs (section 7.2.2.2).

7.2.2.1 Importance de la liste maîtresse d'objectifs

Les résultats des ateliers de co-création des objectifs (CHAPITRE 4) soulignent la pertinence d'utiliser une liste maîtresse d'objectifs, élaborée à partir de la littérature, comme point de départ aux réflexions des parties prenantes. Bien que certains objectifs de cette liste aient été peu évoqués lors des activités de remue-méninges individuelles, ils n'ont pas été exclus lors des étapes suivantes, montrant qu'ils ont été jugés pertinents une fois présentés. Cette approche rejoint Haag, Zürcher, et al. (2019), qui recommandent de dépasser le simple remue-méninges et s'inscrit dans la lignée d'autres études où les objectifs retenus provenaient majoritairement de listes prédéfinies plutôt que des parties prenantes elles-mêmes (Bond et al., 2008; Haag, Zürcher, et al., 2019). Par ailleurs, la forte concordance entre la littérature et les préoccupations exprimées par les parties prenantes, 28 des 37 objectifs initiaux ayant été repris au moins une fois dans les suggestions formulées en ateliers, confirme la bonne compréhension qu'ont les parties prenantes des enjeux de la planification spatiale stratégique des IVB, tout en renforçant la légitimité de la liste maîtresse comme outil de co-création.

Contrairement à l'étude de Ferretti (2019), aucun nouvel objectif important n'a émergé, mais la démarche adoptée s'est révélée particulièrement utile pour susciter des discussions sur de nouvelles pistes de réflexion et surtout pour bonifier la liste existante en y ajoutant des attributs mesurables. Il convient de souligner que la liste maîtresse d'objectifs utilisée dans ce projet reposait déjà sur une revue de littérature approfondie (Kuller et al., 2017), ainsi que sur une analyse rigoureuse de guides techniques et d'une étude menée au Québec (Chesapeake Stormwater Network, 2013; CSA Group, 2018; Dagenais et al., 2014; International Civil Aviation Organization, 2012; MDDEFP, 2011; MDDELCC, 2017; The Prince George's County Maryland, 2007; TRCA/CVCA, 2010).

7.2.2.2 Complémentarité entre les ateliers de co-création et de pondération des objectifs

Bien que les parties prenantes aient exprimé, lors des ateliers de co-création, le souhait d'intégrer des objectifs de santé publique, tels que la promotion du transport actif et collectif, l'amélioration de la qualité de l'air ou l'accès aux espaces verts, ces objectifs n'ont pas été jugés prioritaires lors de l'exercice de pondération en ADMC (CHAPITRE 5). Dans les deux études de cas, représentant une trentaine de parties prenantes, la santé publique s'est avérée, en moyenne, l'objectif le moins priorisé, malgré quelques pondérations élevées individuelles. Cela suggère un écart entre l'importance perçue de certains objectifs dans les discussions qualitatives (CHAPITRE 4) et leur priorisation réelle lorsqu'un choix quantitatif et comparatif est requis (CHAPITRE 5). L'atelier de pondération (CHAPITRE 5) s'est ainsi montré complémentaire, en fournissant des informations complémentaires à celles obtenues lorsque les parties prenantes sélectionnent simplement les objectifs à intégrer dans l'outil.

L'implication des parties prenantes dès les phases de définition et de structuration des objectifs a d'ailleurs permis d'identifier que l'harmonisation des implantations d'IVB aux travaux prévus est un objectif incontournable à considérer dans un OAP (CHAPITRE 4). Toutefois, les exercices de pondération (CHAPITRE 5) ont montré que sa priorité varie selon le type d'IVB, notamment plus forte pour les arbres urbains. Cela souligne l'importance : (i) de pondérer les objectifs par type d'IVB ; et (ii) d'utiliser cette étape pour nuancer les hiérarchies co-construites. Cela souligne l'importance de : i) réaliser l'exercice de pondération par type d'IVB, et ii) l'utiliser pour

approfondir et nuancer les résultats issus des hiérarchies d'objectifs co-construites avec les parties prenantes.

Le croisement des résultats qualitatifs (tâches de remue-méninges et de votes d'exclusion des ateliers de co-création des objectifs, CHAPITRE 4) et les pondérations quantitatives des objectifs (CHAPITRE 5), met en évidence une certaine cohérence: les objectifs souvent exclus sont en général ceux ayant reçu des pondérations faibles, et inversement (corrélation négative). La Figure 7.3 présente la corrélation entre le pourcentage de parties prenantes ayant voté pour l'exclusion d'un objectif ou l'ayant suggéré dans les remue-méninges individuels (CHAPITRE 4) et les pondérations moyennes (n=11 ou 14) attribuées aux objectifs par la méthode de pondération swing (CHAPITRE 5) par type d'IVB. La corrélation entre la fréquence de génération d'un objectif dans les activités de co-création des objectifs et la pondération moyenne attribuée aux objectifs par les parties prenantes est particulièrement forte pour les objectifs de type besoins (corrélation positive forte). Ces résultats rejoignent Haag, Zürcher, et al. (2019), selon lesquels les objectifs formulés par les parties prenantes elles-mêmes étaient considérés comme les plus importants. Cette cohérence entre approches qualitatives et quantitatives soutient la validité des objectifs identifiés dans les hiérarchies d'objectifs, tout en soulignant que les deux approches doivent être vues comme complémentaires plutôt que substitutives.

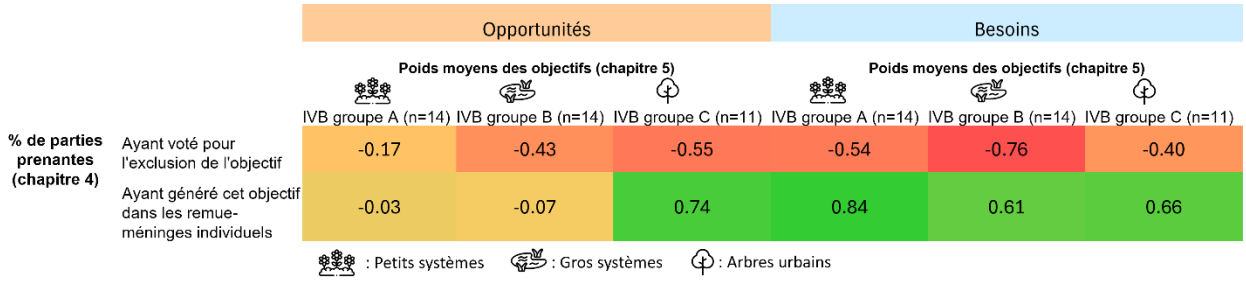


Figure 7.3 Coefficient de corrélation de Pearson entre la proportion de parties prenantes ayant voté pour l'exclusion d'un objectif ou l'ayant suggéré dans les remue-méninges individuels (CHAPITRE 4) et les pondérations moyennes attribuées aux objectifs par la méthode de pondération swing (CHAPITRE 5) par type d'IVB

7.2.3 Opérationnalisation des objectifs avec des experts clés

Lors des consultations avec les experts (CHAPITRE 4), 52% des attributs ont été modifiés, soulignant la valeur ajoutée de cette démarche participative. L'implication directe des experts a permis de partir d'objectifs prédéfinis avec les parties prenantes pour réfléchir collectivement aux meilleures manières de les mesurer. Contrairement au processus classique dicté par la disponibilité des données (Ferretti & Montibeller, 2016), cette approche favorise la construction d'un cadre généralisable. En procédant ainsi, les futurs utilisateurs peuvent adapter les attributs aux données de leur propre territoire, tout en s'appuyant sur une base structurée d'objectifs cohérente, non redondante et pertinente.

Toutefois, cette méthode comporte certaines limites. Les objectifs définis en amont peuvent nécessiter des données géospatiales non disponibles, comme le pourcentage de surface inoccupée pour évaluer la capacité d'implanter de grands systèmes végétalisés (voir CHAPITRE 4), ce qui demande la création de couches spécifiques.

Une contribution majeure de ce travail réside dans la construction de 56 échelles de valeurs pour 21 des 24 sous-objectifs, réalisée via une approche rigoureuse combinant méthodes directe et de bissection, en collaboration avec des experts. Un exercice similaire a également été mené pour les arbres urbains dans un projet connexe (Rioux et al., 2025). Cette méthode, plus exigeante que celles où les échelles sont dérivées de sources secondaires ou définies par les chercheurs (Kuller, Bach, et al., 2019), permet de renforcer la légitimité et la précision de l'opérationnalisation des objectifs. Elle s'avère essentielle pour des OAP comme SSANTO, qui peuvent contribuer à surmonter le manque d'expertise, frein à l'implantation des IVB (Voskamp et al., 2021).

Les résultats montrent que, même pour un même attribut, les échelles peuvent varier selon le type d'IVB : 54 % des cas ont nécessité des échelles distinctes, reflétant la sensibilité des experts à la nature spécifique de l'infrastructure considérée. De plus, bien que généralement linéaires, 83 % des échelles présentent des variations aux extrémités (CHAPITRE 4), ce qui souligne la valeur du jugement expert par rapport à la simplification linéaire courante (Langhans & Lienert, 2016a; Lienert et al., 2022; Zheng et al., 2016). L'analyse d'incertitude et de sensibilité de l'OAP (CHAPITRE 6) indique toutefois que ces variations ont un impact limité sur les cartes d'adéquation spatiale. Cela soulève la question de savoir si seule la détermination de la direction et de la forme

générale des échelles ne serait pas suffisante pour obtenir l'information nécessaire. Toutefois, l'utilisation de la méthode de bissection présente d'autres avantages pédagogiques intéressants, notamment en favorisant chez les experts une meilleure compréhension des caractéristiques du contexte décisionnel analysé (Ferretti & Montibeller, 2016).

Enfin, les échelles utilisées sont « absolues » (discuté au CHAPITRE 4), couvrant l'ensemble du spectre théorique et non seulement les valeurs locales, ce qui favorise la reproductibilité à l'échelle du Québec. Cependant, cette approche présente une limite: elle peut réduire la finesse de l'analyse locale. Certaines valeurs extrêmes peuvent ne pas être représentées sur le territoire étudié, rendant nécessaire une interprétation relative des cartes. Cela peut donner l'impression qu'aucun site n'est pleinement stratégique, même si certains sont les plus pertinents localement. Certaines échelles conservent néanmoins un caractère contextuel, notamment celles liées aux opportunités d'implantation, reflétant règlements municipaux ou des particularités du milieu bâti. Ce compromis entre le caractère généralisable des outils et le caractère contextuel illustre un enjeu ayant été soulevé dans la littérature par d'autres études (Bousquet et al., 2023; Street et al., 2019).

7.2.4 Priorisation et consensus des objectifs par les parties prenantes

Le travail a révélé que l'importance relative des objectifs varie en fonction du type de système considéré. En effet, certains objectifs prennent une importance plus grande selon les caractéristiques propres à chaque IVB et leur intégration dans l'environnement urbain. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les différents types d'IVB remplissent des fonctions distinctes et, par conséquent, ne fournissent pas les SE au même niveau (Hanna et al., 2024). Par exemple, dans l'étude de Lu et al. (2024), les résidents ont accordé une importance relative plus importante aux IVB qui offrent des bénéfices directs et quotidiens (par exemple, fonctionnels et esthétiques), tels que les arbres et les pavés perméables, parmi six différents types (c.-à-d., toits végétalisés, jardins de pluie, fossés végétalisés, pavé perméable, micro-parcs et arbres de rue).

Un constat majeur est que la facilité d'intégration dans la trame urbaine est un objectif prioritaire pour les parties prenantes et que la protection des ressources en eau demeure un enjeu central. Le but d'un OAP comme SSANTO est de préserver la protection des ressources en eau tout en maximisant les autres bénéfices environnementaux et sociaux offerts par les IVB.

Les enjeux climatiques comme les îlots de chaleur et les inondations urbaines ressortent comme des priorités unanimes par les parties prenantes. La chaleur et les inondations sont d'ailleurs les deux aléas climatiques les plus fréquemment pris en compte dans les outils pour les IVB (Voskamp et al., 2021). La réduction des vagues de chaleur et la gestion des inondations sont également deux objectifs clés visés par le gouvernement du Québec pour l'adaptation aux CC (Gouvernement du Québec, 2025a). Bien qu'il soit recommandé que les utilisateurs définissent leurs propres préférences sous forme de pondération des objectifs dans le cadre de leur étude de cas, celles obtenues dans le présent projet de recherche peuvent servir de référence aux municipalités souhaitant baser leur analyse sur les priorités de ces parties prenantes québécoises.

Le CHAPITRE 5 présente également une méthode de pondération rigoureuse et éprouvée pour capter les préférences des parties prenantes, appliquée dans un contexte, en s'appuyant sur un nouveau logiciel de pondération en ligne, spécifiquement testé pour ce projet. Cette approche permet de mieux refléter les préférences individuelles, en comparaison avec des méthodes plus simples comme la pondération directe (Eisenführ et al., 2010), tout en facilitant leur participation. Bien que les recherches soient encore récentes sur ce sujet, l'élicitation des poids de parties prenantes en ligne permettrait de mener à l'« apprentissage factuel» d'apprendre sur leurs préférences, sur les informations présentées ou sur la pensée axée sur les valeurs (Aubert et al., 2024).

Le choix diversifié des parties prenantes impliquées dans les ateliers du projet de recherche (CHAPITRE 4 et CHAPITRE 5) a permis d'observer l'étendue des préférences et parfois la divergence de priorités, sans lien évident entre le rôle professionnel des participants et les types d'objectifs qu'ils privilégiaient (CHAPITRE 5). Il peut s'avérer difficile de combiner ces opinions pouvant se contredire sans cadre ou outil. Par exemple, les résultats du CHAPITRE 5 ont montré que les priorités des parties prenantes ne sont pas toujours alignées. Certains objectifs, tels que la *maximisation de l'infiltration de l'eau dans les sols* par les petits systèmes, la *protection des sources d'eau potable* par les petits systèmes ou encore *la réduction de la pollution sonore* grâce aux arbres urbains, ont suscité moins de consensus. Par ailleurs, certaines préférences peuvent même apparaître contradictoires : par exemple, alors qu'un consensus relativement fort a été obtenu autour de la *réduction des îlots de chaleur* par les gros systèmes, le consensus est plus limité en ce qui concerne la *réduction des surfaces imperméables*.

Cette analyse est particulièrement intéressante, car elle met en évidence des conflits de valeurs légitimes dans la planification urbaine, qui est par nature complexe et multidisciplinaire. Elle illustre également l'importance d'inclure plusieurs parties prenantes : sans cette diversité, on n'aurait accès qu'à une seule vision des priorités. Les résultats du CHAPITRE 5 montrent que différents groupes de parties prenantes hiérarchisent les objectifs différemment, ce qui renforce la valeur des OAP non seulement comme outils d'aide à la décision, mais aussi comme moyens permettant de représenter ces divergences de priorisation. Comme le montrent les résultats du CHAPITRE 6, ces différences de poids ont un impact assez important sur les cartes d'adéquation spatiale.

L'influence du choix des parties prenantes impliquées mérite cependant d'être approfondie. Par exemple, Nastran et al. (2022) concluent que différents groupes de parties prenantes ne voient pas ou ne priorisent pas les mêmes SE de manière identique et ces différences peuvent être liées à plusieurs facteurs comme le niveau de connaissance sur les SE, les bénéfices valorisés, le lien émotionnel et fonctionnel avec le paysage, les valeurs et les priorités personnelles et les modèles mentaux.

7.2.5 Optimisation de l'effort participatif par l'analyse d'incertitudes et de la sensibilité

L'implication des parties prenantes et des experts à toutes les étapes d'un processus d'ADMC demeure particulièrement exigeante en temps et en ressources. Par exemple, la construction des échelles de valeurs auprès de 17 experts a nécessité 21 heures sur 12 sessions (35 experts*heure, pour 56 attributs, pour trois types d'IVB) (CHAPITRE 4). Cette expérience soulève une question centrale : un tel niveau de détail est-il réellement nécessaire? En revanche, si les échelles sont conçues pour être transférables à un grand nombre de municipalités, l'effort consenti pour leur élaboration se justifie, d'où l'intérêt de les développer avec des experts et de privilégier, autant que possible, des échelles « absolues » plutôt que strictement locales. L'analyse d'incertitude et de sensibilité menée par la suite (CHAPITRE 6) permet d'apporter des éléments de réponse concrets à cette question. En explorant simultanément les poids des objectifs, la forme des échelles de valeurs et le degré d'additivité de la fonction d'agrégation, cette analyse offre une évaluation globale de la propagation de l'incertitude issue des jugements humains. Cette approche s'inscrit

dans une logique de transparence méthodologique, déjà amorcée par la structuration hiérarchique des objectifs (CHAPITRE 4). En rendant explicite la sensibilité du modèle à différents paramètres, elle permet aux utilisateurs de visualiser comment leurs choix et préférences influencent concrètement la carte d'adéquation spatiale. Ce type de retour visuel rend l'incertitude tangible et discutable, conformément à la vision de Voinov and Bousquet (2010) selon laquelle la transparence est un levier essentiel de confiance et de collaboration dans la modélisation participative.

Sur le plan pratique, cette approche permet de mieux gérer le coût cognitif du participatif, un enjeu majeur pour les villes qui souhaitent utiliser SSANTO tout en limitant le temps et l'expertise nécessaires. Par exemple, certaines municipalités pourraient simplifier l'analyse en écartant des objectifs ou paramètres qui ont peu d'impact sur la sensibilité globale, sans compromettre la fiabilité des résultats. Par exemple, quatre paramètres d'entrée seulement expliquent environ 87 % de la variabilité des cartes d'adéquation de SSANTO, un niveau comparable à d'autres études (par ex. Peñacoba-Antona et al. (2021b), où trois paramètres expliquaient 78 %).

Les résultats montrent que les poids des objectifs et le mode d'agrégation des valeurs influencent fortement les résultats, ce qui confirme que la voix des parties prenantes façonne réellement les cartes produites. C'est une observation positive, car elle légitime l'usage de SSANTO comme outil d'aide à la décision. De plus, il est intéressant de constater que les objectifs pour lesquels les préférences divergeaient le plus entre participants (*maximiser la protection des sources d'eau potable* ou *maximiser le couvert végétal*; CHAPITRE 5) sont également ceux pour lesquels la sensibilité du modèle est la plus élevée à la variation des poids des objectifs (CHAPITRE 6). Cela renforce l'importance d'une élicitation soignée et d'un dialogue structuré autour de ces dimensions.

Enfin, les cartes de sensibilité produites constituent un outil pratique pour la communication et la décision. Elles permettent d'identifier les zones robustes, à prioriser pour l'action, et les zones sensibles, qui nécessitent davantage de données, de raffinement du modèle ou de consultation des parties prenantes. Cette distinction contribue à mieux orienter les ressources et à réduire les risques décisionnels.

7.3 Quel rôle joue le contexte local sur le développement et l'utilisation des OAP?

Dans le cadre du travail de recherche à la maîtrise (2019-2020), l'OAP SSANTO avait été appliqué dans sa version originale à un contexte urbain différent de celui de son développement initial (Melbourne, Australie), celui de la ville de Trois-Rivières (Québec, Canada). Ce travail a permis d'identifier plusieurs défis de la transférabilité d'un OAP existant. Dans la littérature, la question de savoir s'il est préférable de développer de nouveaux outils ou d'adapter des outils existants demeure d'actualité, notamment en regard des considérations de rentabilité (Voskamp et al., 2021). Le présent projet de recherche a mis en évidence la nécessité d'adapter et de développer l'outil afin d'assurer la pertinence des résultats dans un nouveau contexte territorial, ce qui a motivé le présent projet de recherche. Toutefois, il a également souligné la valeur ajoutée d'avoir accès à un outil existant comme point de départ pour développer une approche mieux ancrée dans le contexte québécois.

L'un des principaux défis rencontrés a été la disponibilité et l'échelle des données géospatiales nécessaires à la représentation des attributs mesurables des objectifs. Certains jeux de données utilisés dans la version originale de l'OAP SSANTO n'étaient pas accessibles pour le cas d'étude de la ville de Trois-Rivières (Québec, Canada), ce qui a entraîné soit l'impossibilité d'évaluer certains objectifs, soit la nécessité d'identifier de nouveaux attributs pour lesquels des données locales étaient disponibles. De plus, les données géospatiales disponibles au Québec ne sont pas toujours suffisamment précises à l'échelle municipale, étant parfois limitées à des résolutions régionales ou provinciales, ce qui en réduit la pertinence opérationnelle. Leur accessibilité varie également d'une ville à l'autre selon les ressources et les bases de données disponibles.

Pour pallier ces limites, ce projet a privilégié le recensement de données géospatiales accessibles de sources publiques afin de favoriser la transférabilité des outils vers d'autres villes québécoises. Toutefois, en pratique, les données géospatiales produites par les villes sont parfois plus précises que les données ouvertes gouvernementales (communication personnelle, 20 novembre 2024), ce qui souligne la nécessité d'adapter l'approche en fonction des spécificités de chaque ville.

Certains enjeux essentiels dans le contexte québécois, tels que les surverses des réseaux d'égout (Leveque et al., 2021) et la vulnérabilité des prises d'eau potable (MELCC, 2018), étaient absents

de la version originale de l'OAP et ont dû être ajoutés. À l'inverse, certains enjeux présents dans le modèle australien, comme la salinité des sols, ne sont avérés non pertinents au cas du Québec. En Australie, la salinité des sols constitue un problème environnemental majeur, affectant la qualité de l'eau, la croissance des végétaux et les infrastructures (Government of Western Australia, 2020). Ce phénomène est principalement dû à un climat souvent aride, où les précipitations insuffisantes ne permettent pas de lessiver les sels accumulés dans le sol. Au Québec, bien que la salinité puisse poser problème dans certains contextes, il n'existe pas de données géospatiales pertinentes à l'échelle municipale.

De même, la forte variabilité des précipitations observée dans des régions comme le Grand Melbourne, influencée par l'oscillation australe El Niño (ENSO), représente un enjeu local majeur (Agriculture Victoria, 2021; Keywood et al., 2016; Khastagir & Jayasuriya, 2010). Ce n'est pas le cas pour les villes québécoises, où cette variabilité est moindre à l'échelle locale comme une ville et pour laquelle aucune donnée géospatiale fine n'est disponible. Cette différence a été confirmée lors des ateliers de co-création des objectifs menés au Québec (CHAPITRE 4), où certains objectifs de la version originale de l'OAP ont été jugés non pertinents par les parties prenantes locales.

L'élaboration des échelles de valeurs avec les experts (CHAPITRE 4) a mis en évidence que ces dernières peuvent varier selon le contexte urbain, même au sein de la même région, comme le sud du Québec, et entre deux villes de taille moyenne à élevée. D'abord, étant donné que ces échelles sont directement liées aux données géospatiales disponibles, il est souvent difficile de les appliquer tels quels à un autre jeu de données. Cela a notamment été observé lors de l'adaptation de la version originale de l'OAP SSANTO au cas de Trois-Rivières.

Comme l'a montré le premier objectif du projet (CHAPITRE 4), les objectifs liés aux opportunités du territoire, incluant les contraintes réglementaires ou les caractéristiques de l'environnement bâti, dépendent fortement des réalités locales. Bien que Montréal et Trois-Rivières soient toutes deux des villes de taille moyenne à élevée situées dans le sud du Québec, les experts ont parfois proposé des échelles différentes pour un même attribut. Par exemple, dans une ville, l'implantation d'IVB sur des terrains municipaux peut être perçue comme plus complexe que sur des terrains privés, en raison de la gestion décentralisée du territoire par sous-unité géographique et des démarches administratives complexes. Dans une autre, c'est l'inverse, les terrains municipaux étant plus facilement mobilisables.

La vulnérabilité des sources d'eau potable illustre aussi cette variation contextuelle : elle diffère selon que la ville soit alimentée par des eaux de surface (comme Montréal) ou des eaux souterraines (comme Trois-Rivières). Ces différences renforcent la nécessité d'une approche flexible et adaptée au contexte dans la définition des objectifs. Ces constats rejoignent ceux de Bousquet (2024b), qui souligne que les outils d'aide à la décision restent, dans une certaine mesure, spécifiques au contexte dans lequel ils sont appliqués.

Il aurait été pertinent d'examiner jusqu'à quel point les objectifs co-construits reflètent les spécificités du contexte québécois et si des objectifs différents auraient émergé dans un autre territoire. Cette réflexion met en lumière la nécessité d'analyser la dépendance contextuelle des résultats et de tester la transférabilité du cadre dans d'autres milieux urbains et climatiques. L'hypothèse formulée dans le cadre de ce projet de recherche était toutefois que, grâce à l'utilisation d'une liste maîtresse d'objectifs issue de la littérature scientifique et des guides locaux, combinée à la mobilisation d'un nombre important et diversifié de parties prenantes issues de milieux variés, les objectifs identifiés ne seraient pas strictement dépendants du contexte local. Cela dit, Haag, Zürcher, et al. (2019) ont conclu qu'il n'existait pas de lien clair entre l'expérience des parties prenantes et leur capacité à formuler des objectifs lors d'un processus de co-création. Par ailleurs, selon ces mêmes auteurs, un groupe de 5 à 9 participants peut suffire à faire émerger un ensemble complet d'objectifs, ce qui soutient l'hypothèse de la taille suffisante du groupe mobilisé dans le projet.

Par ailleurs, les exercices de pondération menés auprès des parties prenantes (CHAPITRE 5), bien que basés sur un échantillon restreint (13 à 14 participants par groupe d'IVB), n'ont pas révélé de lien clair entre le profil des participants et leurs préférences. Cependant, des convergences ont été observées entre certains acteurs issus du milieu municipal, notamment pour des objectifs liés aux opportunités d'implantation.

La séquence d'activités développée dans le cadre du présent projet de recherche, incluant l'atelier de co-création et d'évaluation des objectifs, l'élaboration des échelles de valeurs des attributs, ainsi que la pondération des objectifs, constitue une démarche reproductible pour l'élaboration d'un OAP ailleurs. Cette approche participative a d'ailleurs été réutilisée avec succès pour intégrer de nouveaux types d'IVB dans l'OAP, tels que les arbres urbains (Rioux et al., 2025), les systèmes d'agriculture urbaine (Roy, P.) et les barils récupérateurs d'eau de pluie (Naserisafavi, N.). Elle

représente ainsi une méthode efficace pour structurer la planification spatiale de divers types d'IVB dans un cadre OAP basé sur les SIG et l'ADMC. Cela montre qu'un OAP transférable doit intégrer à la fois des éléments standardisés et des paramètres adaptables aux réalités locales. Cela renforce la pertinence d'approches orientées sur les objectifs plutôt que guidées uniquement par les données disponibles (Ferretti & Montibeller, 2016).

7.4 Comment intégrer dans la pratique un OAP pour les IVB au Québec?

L'OAP SSANTO produit des cartes d'adéquation spatiale en intégrant une diversité d'objectifs afin d'orienter le choix d'implantation des IVB de manière à maximiser leur facilité d'implantation et leurs bénéfices potentiels. Sa structure flexible en fait un outil particulièrement intéressant pour tout problème multicritère spatialisé. La performance de chacun des sites est calculée directement dans l'outil, ce qui allège grandement la charge de travail des praticiens. L'un des principaux atouts de SSANTO réside dans sa capacité à offrir un portrait précis des enjeux liés aux IVB, ce qui peut améliorer la communication entre les parties prenantes. En visualisant les données sous forme de cartes, il devient plus facile de structurer les discussions et d'identifier des compromis, facilitant ainsi les négociations autour des décisions d'aménagement.

Un OAP comme SSANTO vise avant tout à faciliter et à soutenir les discussions entre parties prenantes issues de divers domaines avec des perspectives variées. SSANTO suscite un intérêt croissant parmi les professionnels québécois qui y voient un fort potentiel pour la planification des IVB. Son intégration dans les processus municipaux existants soulève toutefois plusieurs questions, notamment sur la manière d'arrimer ce genre d'outil aux bases de données internes et aux cadres décisionnels en place (Madénian & Van Neste, 2024). Il s'avère donc essentiel d'assurer une complémentarité dans l'insertion d'un tel outil dans la pratique et les processus déjà en place.

À Montréal, par exemple, la réduction des îlots de chaleur est l'un des objectifs prioritaires de la planification des IVB (Madénian & Van Neste, 2024). Ce constat a également été confirmé lors des consultations menées auprès d'acteurs québécois (CHAPITRE 5). Lorsque des occasions d'aménagement se présentent, l'accent est souvent mis sur la déminéralisation des surfaces, dans une optique de réduction du ruissellement et d'amélioration de la résilience climatique. L'un des avantages d'un OAP réside dans la prise en compte des objectifs prioritaires pour la planification des IVB, mais également dans la possibilité de cibler des sites qui contribuent simultanément à la

réduction des îlots de chaleur et du ruissellement, tout en générant de multiples bénéfices secondaires. L'intégration de SSANTO dans ce contexte pourrait justement faciliter l'identification des sites les plus pertinents pour ces interventions et d'évaluer leur impact potentiel (Petrucci, Yaagoubi, et al., 2025). Une étude sur la réduction des surverses et l'emplacement des IVB a d'ailleurs montré que la planification stratégique de l'OAP SSANTO permet d'être compétitive au niveau des performances hydrologiques tout en fournissant les bénéfices secondaires (Bel Yaagoubi, 2025).

Le Tableau 7.1 compile un premier retour de deux municipalités québécoises et de parties prenantes au sujet des avantages qu'elles perçoivent par rapport à un OAP comme SSANTO et leurs réticences.

Tableau 7.1 Retour préliminaire sur les avantages perçus d'un OAP comme SSANTO dans les pratiques au sein des municipalités du Québec

Avantages perçus d'un OAP	**Justifications**
Sensibiliser les élus politiques	Un projet de recherche mené en parallèle avec la Ville de Montréal (Madénian & Van Neste, 2024) a permis d'identifier que la vision des professionnels vis-à-vis de son utilisation est notamment de sensibiliser et de convaincre les élus sur l'importance des IVB en fournissant des résultats visuels basés sur des objectifs facilitant et supportant la prise de décision. Ce constat a également été observé lors d'ateliers de mise à l'essai de SSANTO dans deux municipalités québécoises en novembre 2024 (Ville de Trois-Rivières) et janvier 2025 (Ville de Montréal) où le potentiel de cet outil dans les processus de gouvernance des projets d'IVB a été discuté. L'un des principaux avantages perçus de SSANTO, mentionné par les employés des villes, est son utilisation pour convaincre les élus, notamment pour valider leurs décisions (communications personnelles, 20 novembre 2024 et 21 janvier 2025). Bien que certaines municipalités disposent déjà des ressources, des compétences et des connaissances internes nécessaires à la planification des IVB, un OAP servirait, selon eux, avant tout à appuyer ces démarches en fournissant les informations sous une forme visuelle et combinée. Cette approche pourrait encourager les élus à considérer différentes options et à identifier des solutions potentiellement plus avantageuses.
Soutenir le développement de plans de verdissement	Les municipalités voient également un grand potentiel dans SSANTO pour simuler des plans de développement ou des plans directeurs de verdissement. Une utilisation de l'OAP « par projet » permettrait d'ajuster les objectifs en fonction des besoins spécifiques de chaque initiative et d'analyser si le site visé est approprié ou non pour le projet envisagé (communication personnelle, 20 novembre 2024).
Centraliser les informations pertinentes aux projets d'implantation d'IVB	L'un des atouts majeurs de cet outil est son rôle en amont des analyses d'adéquation spatiale des IVB. Actuellement, les responsables doivent solliciter chaque service pour rassembler les données nécessaires à leurs projets. Avec un OAP comme SSANTO, toutes ces informations peuvent être centralisées dans un seul projet, optimisant ainsi la gestion des données et l'efficience du processus de planification (communication personnelle, 20 novembre 2024).. Étant donné que le travail en silos est défavorable à la planification des IVB (Kambites & Owen, 2006), une collaboration et une coordination entre les services municipaux et les autres parties prenantes sont nécessaires pour bénéficier des avantages qui peuvent en être tirés, ce qui a d'ailleurs été identifié comme une clé pour des implantations d'IVB réussies (Dagenais et al., 2011). La collaboration inter-services est cruciale afin de partager les apprentissages et connaissances entre les professionnels et de valoriser les expertises (Van Neste et al., 2021). Certains mécanismes peuvent favoriser la pérennité des collaborations, par exemple en bâtissant des communautés pratiques et en assurant une diffusion des connaissances compréhensibles par tous, c'est-à-dire en uniformisant le langage technique, bureaucratique, pratique, réglementaire entre les acteurs de la ville, les parties prenantes externes et les citoyens (Van Neste et al., 2021), ce que peut permettre de faire un OAP.
Réticences	Justifications
Crainte de créer des injustices sociales	Certains objectifs soulèvent des enjeux sensibles liés aux valeurs sociales, comme le risque d'éco-embourgeoisement. Ne pas prendre en compte ces aspects dans un outil tel que SSANTO pourrait constituer un piège, mais leur intégration reste complexe. Par exemple, il est important de veiller à ne pas négliger les secteurs socio-économiquement défavorisés. Cette dimension peut susciter une certaine réticence quant à l'adoption de SSANTO dans la pratique municipale. Il est donc essentiel de bien rappeler le rôle que joue un tel outil dans le processus décisionnel, soit de supporter la réflexion collective, en facilitant la communication entre les parties prenantes et en rendant les informations plus accessibles et compréhensibles.
Inquiétude liée à la rigidité de certains objectifs	Lors des ateliers et consultations présentés au CHAPITRE 4, les parties prenantes et experts ont exprimé la crainte de provoquer un effet contraire, en restreignant l'implantation d'IVB sur des sites pourtant favorables. Par exemple, l'application de critères trop stricts, comme éviter une exposition trop élevée aux sels de déglaçage, a été jugée trop restrictive dans un contexte fortement urbanisé comme celui de Montréal

Comme le soulignent Kuller et al. (2022), les OAP sont de plus en plus reconnus pour leur capacité à améliorer la prise de décision. Cependant, leur application reste encore largement confinée aux milieux académiques et, dans une moindre mesure, aux consultants privés travaillant sur des projets gouvernementaux. Cette limitation réduit leur efficacité dans un contexte de gouvernance urbaine, où leur adoption par les municipalités et les acteurs publics reste un défi. Pour que SSANTO devienne un levier efficace, il sera crucial de renforcer son ancrage institutionnel et de démontrer concrètement sa valeur ajoutée dans les processus décisionnels municipaux. L'intégration réussie de SSANTO dans la gouvernance urbaine repose sur un développement itératif et une collaboration continue avec les acteurs du milieu pratique. L'innovation ouverte, qui implique des échanges réguliers entre les développeurs et les utilisateurs finaux, est essentielle pour assurer la pertinence et la pérennité de l'outil. Sans cette approche collaborative, il existe un risque de développer un outil qui, bien que techniquement performant, ne s'aligne pas avec les réalités opérationnelles des municipalités et devienne sous-utilisé. Les phases de tests et les mises à l'échelle de l'OAP SSANTO doivent donc être accompagnées d'une analyse des leçons tirées et des ajustements nécessaires pour optimiser l'adoption de l'outil.

7.5 Contribution aux plans climats

Les résultats de ce projet de recherche peuvent contribuer directement aux efforts d'adaptation aux CC, notamment en soutenant le développement et l'application des plans climat municipaux ou provinciaux.

À l'horizon 2030, le Québec souhaite mettre en œuvre diverses mesures pour lutter contre les CC. Les grandes orientations de cette transition ont été définies dans le *Plan pour une économie verte 2030* (Gouvernement du Québec, 2025a). Dans ce contexte, le gouvernement privilégie une approche proactive, axée sur la prévention et l'adaptation, notamment par le développement d'outils adaptés aux réalités locales. Parmi les solutions proposées, les IVB sont identifiées comme des leviers efficaces pour atténuer les impacts des CC. Le plan souligne également le rôle central que devront jouer les municipalités en matière d'aménagement du territoire. D'ici 2027, toutes les MRC du Québec devront avoir un plan de lutte contre les CC (Gouvernement du Québec, 2025a). Sous cette stratégie a également découlé le programme OASIS visant spécifiquement à soutenir

financièrement les projets de verdissement au Québec, et spécifiquement les IVB, dans une optique d'adaptation climatique (Gouvernement du Québec, 2025b).

Des orientations gouvernementales en aménagement du territoire (OGAT) ont également été nouvellement établies pour encadrer les municipalités dans la planification de leur territoire (Gouvernement du Québec, 2024), avec des objectifs alignés avec le développement de l'OAP SSANTO.

En ce qui concerne la gestion intégrée, durable et équitable de l'eau, la *Stratégie québécoise de l'eau 2018-2030* (Gouvernement du Québec, 2019), qui découle de la *Politique nationale de l'eau*, présente les orientations à suivre pour une gouvernance responsable de cette ressource essentielle.

Depuis 2021, les municipalités québécoises ayant une prise d'eau potable de surface ou souterraine destinée à desservir plus de 500 personnes et au moins une résidence doivent réaliser une analyse de vulnérabilité. Cette démarche généralisée à l'ensemble du Québec vise à relever les menaces et problèmes ayant un impact sur les sources de prélèvement d'eau potable. Pour ce faire, les municipalités sont supportées par le *Guide de réalisation des analyses de vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec* (MELCC, 2018). Un arrimage avec l'approche utilisée dans l'outil SSANTO s'avère pertinent, puisque pour réaliser leur analyse de vulnérabilité des prises d'eau potable de manière récurrente, les municipalités utilisent des données spatiales permettant de réaliser l'inventaire d'activités anthropiques qui sont sources de contamination pour une prise d'eau. Le guide suggère de brosser un portrait du secteur de la prise d'eau potable étudiée en ce qui a trait à «la géologie, la géochimie, l'hydrogéologie, les dépôts de surface, le couvert végétal, l'occupation du territoire, l'utilisation du sol, la population, le potentiel de développement du territoire et l'historique des événements exceptionnels (déversements accidentels, catastrophes naturelles, etc.)» (MELCC, 2018).

À l'échelle municipale, le *Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ)* a élaboré un guide d'accompagnement visant à soutenir les municipalités dans la mise en œuvre d'une gestion durable des eaux pluviales. Ce guide identifie les principales motivations des municipalités dans ce domaine : l'amélioration de la qualité de l'eau, la gestion des inondations, la réduction de la consommation d'eau potable, l'allègement de la pression sur les réseaux de traitement et la valorisation des écosystèmes naturels.

Dans le but de mettre en évidence les synergies entre ces priorités gouvernementales et municipales et la présente recherche, qui propose l'intégration des IVB de gestion des eaux pluviales et l'utilisation d'un outil SIG-ADMC pour leur implantation, le Tableau 7.2 établit les correspondances entre les objectifs et actions des stratégies existantes et les contributions potentielles du projet de recherche.

Tableau 7.2 Synergies entre le développement de l'OAP SSANTO et les stratégies gouvernementales

Document	**Actions et objectifs prévus**	**Lien avec le développement de l'OAP SSANTO**
Plan pour une économie verte 2030 (Gouvernement du Québec, 2025a)	♦ **Objectif :** Meilleure planification et conservation de corridors écologiques.	Utilité de l'OAP pour mieux planifier les IVB dans une optique de conservation et d'amélioration des corridors écologiques.
	• **Action :** Mise en place d'un répertoire informatique pour centraliser les outils et normes sur le verdissement. • **Action :** Proposition de solutions comme les IVB. • **Action : S**outien au développement de plans d'adaptation pour les enjeux de santé publique et de protection des sources d'eau potable. • **Action :** Soutien au développement d'outils de planification.	Facilite et soutient l'intégration de l'OAP dans les pratiques au Québec.
	• **Action :** Cartographie des îlots de chaleur. ♦ **Objectif :** Focus sur les solutions d'adaptation pour les vagues de chaleur et les pluies abondantes.	Mise à jour de données géospatiales pertinentes à l'OAP SSANTO et accès pour les municipalités à des données plus adaptées.
Programme OASIS (Gouvernement du Québec, 2025b)	Les critères d'admissibilité au programme comprennent : • **Action :** Choix du type et de l'emplacement des IVB prévues, accompagné d'une justification de leur contribution à la résilience. • **Action :** Production des cartes via un SIG. ♦ **Objectif :** Possibilité de considérer des objectifs comme le réaménagement de rues, la réfection d'infrastructures ou la requalification de secteurs urbains, pour orienter la priorisation des IVB. ♦ **Objectif :** Les objectifs de gestion des inondations et des îlots de chaleur doivent être visés par l'implantation des IVB.	L'OAP SSANTO peut directement permettre de soutenir les organismes municipaux dans la création de cartes pour justifier la planification d'IVB pour des objectifs ciblés comme la gestion des îlots de chaleur, l'amélioration de la santé publique et la gestion des inondations.
Orientations gouvernementales en aménagement du territoire en vigueur (OGAT) (Gouvernement du Québec, 2024)	♦ **Objectif :** Amélioration de la résilience face aux changements climatiques (orientation 1), par une meilleure adaptation des milieux de vie (objectif 1.1). ♦ **Objectif :** Conservation des écosystèmes et gestion intégrée des ressources en eau (orientation 2), par la conservation de milieux naturels (objectif 2.1), contribution à la résilience (objectif 2.2) et protection des ressources en eau (objectif 2.3).	Alignement avec l'objectif d'un OAP comme SSANTO : mieux planifier les IVB pour répondre à divers objectifs visant à améliorer la résilience des villes face aux CC.

Tableau 7.3 Synergies entre le développement de l'OAP SSANTO et les stratégies gouvernementales (suite)

Document	Actions et objectifs prévus	Lien avec le développement de l'OAP SSANTO
Stratégie québécoise de l'eau 2018-2030 (Gouvernement du Québec, 2019)	• **Action :** Soutien aux municipalités dans la conservation et la restauration des milieux aquatiques (orientation 2); • **Action :** Incitation à adopter des mesures préventives pour réduire les risques liés à l'eau et des mesures favorables à une gestion durable des eaux pluviales (orientation 3).	Certaines orientations présentées rejoignent les différents objectifs visés par l'implantation des IVB. Au Québec, les priorités incluent la protection des sources d'eau potable par la réduction des surverses, l'encouragement à la gestion durable des eaux pluviales par l'infiltration et l'amélioration de la qualité des eaux de ruissellement pour la conservation des milieux aquatiques (MDDELCC, 2018).
Analyses de vulnérabilité des sources d'eau potable (MELCC, 2018)	• **Action :** Concordance des données géospatiales à collecter : • Secteurs commerciaux et activités attenantes • Site d'enfouissement/ terrain contaminé • Présence d'un aéroport • Réseau d'égout municipal • **Action :** Caractériser les sols, l'hydrogéologie, les dépôts de surface, le couvert végétal, l'occupation et l'utilisation du sol, la population et le potentiel de développement	Les données spatiales que les municipalités doivent collecter pour réaliser leur analyse de vulnérabilité des prises d'eau potable peuvent être réutilisées dans le cadre de l'OAP SSANTO, ce qui permet une utilisation efficace des ressources.
Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (Regroupement des organismes de bassin versants du Québec, 2018)	♦ **Objectifs :** Liste des motivations des municipalités: ♦ Aménager les aires de stationnement; ♦ Infiltrer et retenir les eaux de ruissellement sur les terrains; ♦ Gérer le ruissellement sur les chantiers de construction; ♦ Améliorer la qualité des eaux de ruissellement. ♦ Implanter des bandes riveraines et milieux humides; ♦ Faire le drainage des chemins, des rues et des trottoirs; ♦ Conserver les espaces naturels.	Plusieurs objectifs qui motivent les municipalités québécoises à gérer les eaux pluviales correspondent à ceux intégrés dans l'OAP SSANTO, ce qui leur permet de planifier leurs IVB en cohérence avec leurs propres priorités et motivations.
	• **Action :** Liste de ressources à l'intention des municipalités sur la gestion des eaux pluviales, incluant les coûts, la planification, le cadre légal et les outils d'aide à la décision disponibles.	Possibilité de référer vers l'OAP SSANTO afin d'encourager les municipalités du Québec à utiliser un outil SIG-ADMC.

7.6 Limites et perspectives

Ce travail de recherche s'est déroulé en synergie avec d'autres projets menés dans le cadre du projet PIIVO (voir Section 1.5), contribuant ainsi à l'amélioration continue de l'OAP SSANTO. Ces

collaborations ont permis d'intégrer plus efficacement différents types d'IVB, notamment les arbres urbains (Rioux et al., 2025), les infrastructures nourricières (Roy, P.), les parcs et espaces verts (Bennekrela, N.) et les barils récupérateurs d'eau de pluie (Naserisafavi, N.). De plus, l'outil a été enrichi par une meilleure prise en compte des objectifs liés à la biodiversité (Lemieux-Chalifour, F.) et aux surverses (Petrucci, 2025), ainsi que par des améliorations informatiques continues par des équipes du projet intégrateur de Polytechnique Montréal (édition 2021-2022) et l'équipe de *Solydd Solutions*. Toutefois, des pistes de sujets de recherches pourraient permettre d'optimiser davantage l'OAP et de renforcer son intégration dans les processus de planification des IVB. Cette section présente les limites générales de la recherche, ainsi que les perspectives de recherche associées.

- **Limitation technique et informatique :** Le développement d'un OAP requiert des compétences informatiques. En l'absence de cette expertise en interne, il est nécessaire de collaborer avec des experts externes, ce qui, dans le cadre de ce projet, a été à la fois indispensable et source de défis. Le débogage et les ajustements a été un processus itératif, et il était parfois difficile de traduire avec précision les besoins de la recherche en modifications fonctionnelles. Ce processus a demandé un temps important et une communication rigoureuse pour garantir que l'outil fonctionne correctement et atteigne les objectifs. Cette contrainte technique constitue ainsi une limite prévisible (Kuller, Farrelly, et al., 2018), mais significative dans le développement des OAP.
- **Choix des parties prenantes :** La littérature demeure limitée sur l'influence des caractéristiques des parties prenantes sur leurs préférences dans un processus décisionnel. Dans cette recherche, aucun lien clair n'a été observé entre les traits professionnels ou académiques (type d'organisation, rôle, champ d'étude) et les préférences concernant les objectifs de planification spatiale des IVB (CHAPITRE 5). De la même manière, (Kuller et al., 2023) n'ont trouvé aucune association significative avec l'âge ou le genre, hormis une légère corrélation avec l'expérience et Haag, Zürcher, et al. (2019) n'ont pas identifié de lien clair entre caractéristiques démographiques ou professionnelles et la capacité à générer ou hiérarchiser des objectifs. Ils suggèrent que les différences observées seraient plutôt liées à des traits individuels, tout en soulignant que la question reste ouverte. Cette question mérite donc un approfondissement, par exemple en élargissant l'échantillon pour mieux

saisir la diversité des profils et en intégrant des variables contextuelles ou personnelles supplémentaires (par exemple, proximité résidentielle à un site, la fréquence d'utilisation, le sentiment d'attachement au quartier, les expériences passées liées aux IVB, l'usage spécifique des espaces, les variations selon la culture, etc.). À titre d'exemple, (Fischer et al., 2018) ont montré que les propriétaires de chiens percevaient les espaces verts différemment, en accordant une valeur accrue à la sécurité et aux occasions de socialisation. Une approche mixte combinant méthodes quantitatives et qualitatives pourrait également aider à mieux comprendre les motivations individuelles derrière les objectifs priorisés par les parties prenantes.

La participation des parties prenantes demeure un défi majeur pour ce type d'activités. Par exemple, pour les premiers ateliers de co-création des objectifs (CHAPITRE 4), seulement 37 ont participé sur 66 personnes sollicitées, et pour les troisièmes ateliers de pondération des objectifs (CHAPITRE 5) dans l'étude de cas principale, 20 participants sur 54 ont participé. Certains profils de parties prenantes auraient également pu enrichir le processus, comme les promoteurs immobiliers, qui jouent un rôle clé dans le développement urbain, ou encore les citoyens, souvent absents de ce type d'exercice (Bousquet et al., 2023). Toutefois, comme indiqué à la section 5.6.3 , leur inclusion n'est pas nécessaire à toutes les étapes, certains exercices nécessitant une expertise spécifique.

- **Application de l'OAP avec les petites municipalités :** L'accès aux données géospatiales demeure un défi majeur pour l'utilisation des OAP (Kuller, Farrelly, et al., 2018). Les deux études de cas utilisées dans le projet (Ville de Trois-Rivières et Ville de Montréal) disposaient d'équipes de géomatique, de bases de données complètes et d'une expertise interne en verdissement, ce qui n'est pas représentatif des municipalités de plus petite taille, souvent limitées en ressources. L'OAP peut ainsi exiger un niveau d'expertise, de données et de temps difficilement accessible à ces dernières, posant un risque de faible adoption. Pour répondre à cette limite, l'OAP devrait être testé dans les petites municipalités afin d'en évaluer la transférabilité et d'identifier les adaptations nécessaires (par exemple, simplification, utilisation d'un indicateur pour substituer certains attributs, etc.). Une version réduite du cadre hiérarchique présenté au CHAPITRE 4 pourrait être développée. Une comparaison entre le niveau de performance de l'OAP par rapport aux attentes des

utilisateurs et à la capacité de l'outil à générer des cartes d'adéquation spatiale pertinentes pourrait être faite entre des villes à gros moyens où on utilise le cadre complet et les villes à petits moyens. Une comparaison sur la capacité de l'OAP à générer des cartes d'adéquation spatiale pertinentes entre les grandes villes disposant de ressources importantes, où le cadre complet peut être utilisé, et les plus petites municipalités, dont les moyens sont plus limités, permettrait d'évaluer s'il peut répondre aux attentes des utilisateurs de différents contextes urbains.

- **Couplage avec un outil évaluant les performances hydrologiques et du design des IVB :** L'une des limites de l'OAP SSANTO est l'absence d'analyse sur le choix des types d'IVB stratégique en fonction des performances hydrologiques et du design. Un site peu stratégique pour l'implantation d'une IVB peut être compensé par le design choisi. Par exemple, dans le cas des arbres urbains, SSANTO ne propose pas d'espèces adaptées aux sites moins optimaux. Le couplage de l'OAP SSANTO à un outil permettant la comparaison, l'optimisation et l'évaluation de différentes stratégies d'implantation, permettrait de compléter et solidifier les analyses spatiales de SSANTO. Un outil comme UrbanBEATS (Bach et al., 2015) permet de guider le choix du type d'IVB et l'échelle optimale selon trois grands objectifs hydrologiques, soit la réduction des volumes de ruissellement, la réduction de la charge en polluants annuelle et la fiabilité volumétrique de la collecte et de la réutilisation de l'eau de pluie. UrbanBEATS n'intègre pas de processus ADMC. L'importation de cartes d'adéquation spatiale de SSANTO dans l'outil UrbanBEATS pourrait offrir une avenue prometteuse pour optimiser à la fois la localisation des IVB et leur performance hydrologique, tout en donnant des informations sur le choix des types d'IVB. Il serait intéressant de pouvoir évaluer les cartes d'adéquation spatiales proposées par l'OAP SSANTO pour guider l'utilisateur dans le choix d'une stratégie. Petrucci, Yaagoubi, et al. (2025) ont développé une démarche pour l'évaluation de l'impact de l'implantation d'IVB selon l'OAP SSANTO sur la résilience urbaine. Pour complémenter cette démarche, l'OAP SSANTO pourrait inclure une option d'affichage classant les sites afin de mettre en évidence les types d'IVB les plus performants pour orienter et faciliter la prise de décision des futurs utilisateurs. Par exemple, en ne

considérant que les zones dont la note d'adéquation spatiale est supérieure à 80 (Kuller, Deletic, et al., 2019).

- **Évaluation de l'OAP SSANTO :**
    - **Analyse de la sensibilité de l'OAP à l'incertitude provenant des données géospatiales :** La collecte et la qualité des données géospatiales demeurent un défi majeur pour l'utilisation des OAP, leur accessibilité et leur précision variant selon les villes. Or, la fiabilité des résultats dépend directement de la résolution, de la précision et de la mise à jour de ces données (Kuller, Bach, et al., 2018; Kuller, Bach, et al., 2019). Dans le projet de recherche, l'analyse des incertitudes et de la sensibilité a été réalisée sur les paramètres influencés par les préférences des utilisateurs (poids des objectifs, échelles de valeurs des attributs et degré d'additivité de l'information, voir CHAPITRE 6), puisqu'elles représentent celles sur lesquelles les utilisateurs et concepteurs ont un levier d'action. Cependant, les incertitudes liées aux données géospatiales, bien que déterminantes, n'ont pas été explorées. Une analyse de sensibilité portant directement sur les données géospatiales permettrait de mieux quantifier leur influence sur les résultats de l'OAP et, ultimement, d'adapter les recommandations concernant la précision requise de chaque type de données. Comparativement à la recherche sur la qualité des données spatiales qui semble bien établie, celle sur l'incertitude des données géospatiales reste plus récente et limitée (Li et al., 2018). L'incertitude peut provenir entre autres de l'échelle, de la résolution (par exemple, division en grille pour les données matricielles continues) ou de la qualité (par exemple, qui reflètent ou non le plus fidèlement la réalité, avec un niveau d'erreur faible) (Li et al., 2018). Dans SSANTO, certaines proviennent d'images satellitaires à résolution fixe, puis l'outil applique ensuite sa propre grille de travail. Pour les données vectorielles, l'incertitude peut venir de la précision géométrique, soit de l'incertitude sur la position d'un point. Ces incertitudes peuvent être évaluées à l'aide d'approches probabilistes ou de matrices d'erreurs (Li et al., 2018).
    - **Processus complet d'évaluation de l'OAP:** Dans le cadre de ce travail, l'ensemble du processus d'évaluation de l'outil n'a pas été entièrement réalisé, ce qui peut

constituer un frein à l'appropriation par les OAP. Toutefois, une étape importante a été intégrée : l'analyse de sensibilité et d'incertitudes. Cette dernière permet d'évaluer la robustesse des résultats, d'identifier les paramètres les plus influents et de renforcer la crédibilité de l'outil. Les modèles sont des approximations de la réalité (Li et al., 2018) et ne peuvent donc jamais être considérés comme entièrement «vrais». Dans le cas des outils basés sur les SIG, l'évaluation de l'adéquation spatiale d'une IVB sur le terrain est souvent difficile, car celle-ci est difficilement mesurable. Kuller et al. (en préparation) proposent un cadre d'évaluation reposant sur des critères de performance. Selon ce cadre, l'analyse de sensibilité contribue à renforcer la fiabilité et l'exactitude des résultats (Kuller et al, en préparation). Cependant, une évaluation complète devrait combiner plusieurs approches, notamment la confrontation des sorties du modèle avec des données empiriques et l'expérience des parties prenantes. À titre d'exemple, Cohen et al. (2008) ont évalué la performance de leur modèle spatial selon plusieurs dimensions : l'acceptabilité (mesurée par la propension des experts à ajuster leurs décisions après utilisation de l'outil), l'efficacité (capacité de l'outil à accomplir la tâche attendue) et la validité (niveau de concordance entre les recommandations de l'outil et celles d'un panel d'experts). Bui et al. (2017) ont évalué leur modèle spatial de susceptibilité aux feux de forêt en milieu tropical en utilisant des données d'entraînement et d'évaluation, en calculant des statistiques sur les sites correctement ou incorrectement prédits. Karashima et al. (2015) ont quant à eux évalué l'utilité d'un modèle spatial pour la gestion des catastrophes naturelles via des ateliers avec des parties prenantes, recueillant leurs avis sur l'outil et ses résultats. Pour SSANTO, cette démarche a été amorcée via des ateliers de mise à l'essai dans deux villes québécoises (novembre 2024 et janvier 2025), mais l'application complète du cadre proposé par Kuller et al. (en préparation) reste nécessaire, notamment pour vérifier dans quelle mesure les sites priorisés reflètent les attentes des parties prenantes et les conditions réelles du terrain à court et long terme.

- **Potentiel de l'intelligence artificielle dans la planification des IVB :** L'essor de l'intelligence artificielle (IA) offre un potentiel considérable pour le domaine de l'aménagement du territoire. Bien que peu intégrée à ce jour dans la pratique professionnelle en urbanisme, un domaine souvent confronté à des problèmes complexes et mal définis, l'IA est perçue par plusieurs comme une avenue prometteuse notamment grâce à l'augmentation des données disponibles et à la puissance de calcul (Sanchez et al., 2023). Elle permettrait notamment de générer des alternatives de décision qui tiennent compte du contexte, apprennent des configurations existantes et s'adaptent aux préférences des utilisateurs (Fang et al., 2022). Des applications concrètes ont déjà vu le jour en lien avec les OAP, notamment dans la planification du transport. Par exemple, Fang et al. (2022) ont développé un modèle d'apprentissage profond capable de générer automatiquement des configurations de rues adaptées à leur environnement local et aux orientations de planification. Lock et al. (2020) ont utilisé des techniques d'apprentissage automatique pour prédire l'évolution future de la valeur foncière en fonction de l'emplacement potentiel de grandes infrastructures de transport. L'IA pourrait enrichir un outil comme SSANTO en utilisant l'apprentissage basé sur des données de projets passés pour recueillir les facteurs d'implantation efficaces d'IVB selon les contextes urbains ou encore pour anticiper des impacts cumulatifs de différentes implantations d'IVB dans le temps (par exemple, réduction des îlots de chaleur, gain en biodiversité) avec des scénarios de croissance démographique et de changements climatiques à partir de données passées. L'IA pourrait également permettre d'intégrer un système de recommandation personnalisé basé sur des profils d'utilisateurs similaires.

CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet de recherche a permis d'adapter et de développer un outil d'aide à la planification (OAP) pour soutenir le choix stratégique de l'emplacement des IVB en milieu urbain. Cet objectif a été atteint en (1) développant un cadre d'adéquation spatiale fondé sur des objectifs mesurables et conçu grâce à l'implication des parties prenantes, (2) en déterminant les préférences de ces dernières à l'égard des objectifs guidant l'implantation des IVB, puis (3) en validant la sensibilité de l'OAP aux paramètres liés à ces préférences, soit les poids attribués aux objectifs, les échelles de valeurs des attributs et l'additivité de la fonction d'agrégation. Il a permis de répondre à des questions de recherche complémentaires permettant de mettre en lumière la complexité et la pertinence des OAP pour la planification des IVB:

> (1) Quels sont les objectifs de planification spatiale stratégique valorisés par les parties prenantes, et comment peuvent-ils être structurés dans un OAP?
>
> (2) Quelles sont les préférences de ces parties prenantes à l'égard de ces objectifs, et dans quelle mesure ces préférences sont consensuelles?
>
> (3) Quelle est la robustesse de l'OAP SSANTO et quels paramètres influencent le plus les résultats générés par l'outil?

Le **premier volet** du projet de recherche a permis le développement d'un cadre d'analyse spatiale multicritère de planification stratégique des IVB structuré en une hiérarchie d'objectifs pour le contexte des municipalités québécoises à partir d'un OAP existant. Les résultats issus de cette première phase de recherche fournissent non seulement des paramètres d'entrée essentiels pour l'OAP SSANTO (objectifs, attributs, données spatiales et échelles de valeurs), mais aussi des informations précieuses aux praticiens québécois pour améliorer la prise de décision en matière d'implantation des IVB. Les principales conclusions qui en ont émergé sont :

- L'implication active de 37 parties prenantes issues de divers milieux dès la phase de co-création a permis de valider la pertinence des objectifs, d'en ajuster certains et de confirmer la solidité du travail préliminaire réalisé à partir de la littérature et des outils existants.

- La structuration d'objectifs en un cadre hiérarchique, distinguant objectifs fondamentaux et moyens et précisant leur direction de préférence, a amélioré la clarté et la transparence du cadre.
- Les objectifs liés aux *besoins* du territoire ont été davantage retenus que ceux liés aux *opportunités*, reflétant une prudence envers les contraintes associées à l'environnement bâti existant.
- Parmi les objectifs les plus suggérés pour inclusion dans un OAP, la réduction des îlots de chaleur et des inondations urbaines sont ressorties comme des priorités communes, suivie de la biodiversité, de la réduction des surfaces imperméables, de l'équité sociale et de l'accessibilité. Ces enjeux sont largement reconnus à l'échelle mondiale pour leur impact sur la population urbaine et sont au cœur des bénéfices souvent associés aux IVB et aux enjeux liés aux changements climatiques.
- L'importance donnée à l'intégration des IVB lors des travaux publics planifiés souligne la nécessité de concilier planification stratégique et contraintes opérationnelles des municipalités.
- Le développement des échelles de valeurs, un processus long et exigeant sur le plan cognitif (21 heures sur 12 sessions avec 17 experts, 35 experts*heure, pour 56 attributs, pour trois types d'IVB), a mis en évidence la prédominance de relations non linéaires dans les jugements, remettant en question la simplification souvent adoptée avec des échelles linéaires. Les échelles de valeurs pour les attributs liés aux *opportunités* se sont révélées plus contextuelles, reflétant les spécificités des réglementations et des environnements bâtis propres à chaque ville.
- L'adaptation de l'OAP au contexte québécois s'est avérée essentielle : plus de la moitié des attributs ont été modifiés ou ajoutés pour refléter les spécificités locales.

Le **deuxième volet** du projet de recherche a permis de déterminer les préférences de parties prenantes par rapport aux objectifs à prioriser pour la planification de trois groupes d'IVB, les petits systèmes (biorétention, système d'infiltration et noue), les gros systèmes (marais artificiel, étang et lac) et les arbres urbains. Mieux comprendre si les parties prenantes issues de différents milieux s'accordent sur les objectifs à prioriser ou non permet non seulement d'éclairer les efforts de planification, mais aussi de questionner la pertinence du choix des types de parties prenantes

consultées. La priorisation des objectifs peut aider les décideurs à orienter leurs projets sur des objectifs qui sont réellement souhaités par les parties prenantes, pour augmenter l'acceptabilité sociale des projets. Les principales conclusions qui en ont émergées sont :

- Les pondérations attribuées révèlent une priorité claire pour l'adaptation aux changements climatiques, notamment la réduction des îlots de chaleur et la protection de l'eau, confirmant la cohérence entre les différentes phases du projet.
- Les objectifs liés à la santé, à la biodiversité et aux services culturels ont été, de manière générale, jugés moins prioritaires.
- Les préférences varient selon le type d'IVB : par exemple, l'intégration lors des travaux publics planifiés est jugée essentielle pour les arbres urbains, mais moins pour d'autres systèmes.
- Les arbres urbains suscitent une convergence d'opinions, alors que les systèmes plus techniques présentent des divergences plus marquées.
- Aucun objectif n'a été unanimement rejeté, indiquant une diversité d'opinions plutôt qu'un désaccord fondamental.
- Un consensus fort émerge pour la réduction des îlots de chaleur et la diminution des surfaces imperméables, tandis que la maximisation de l'infiltration de l'eau reste sujette à débat pour l'ensemble des types d'IVB.
- Les objectifs liés aux *besoins* ont suscité un plus fort consensus que les objectifs liés aux *opportunités,* indiquant une vision commune des enjeux urbains parmi les parties prenantes, mais une plus grande diversité d'opinions sur la manière d'exploiter les opportunités locales.
- L'analyse du profil des parties prenantes (urbanistes municipaux, ingénieurs civils, experts en climat, ONG, etc.) n'a pas permis d'établir de corrélation claire entre leurs antécédents professionnels et leurs préférences.

Le **troisième volet** du projet de recherche a permis d'analyser la sensibilité de l'OAP aux paramètres d'entrée reflétant les préférences (poids des objectifs, échelles de valeurs et type de fonction d'agrégation). En combinant analyses d'incertitude et de sensibilité globale, la recherche permet d'identifier les paramètres qui affectent le plus fortement la distribution spatiale de

l'adéquation, offrant des repères concrets pour les chercheurs et praticiens. Les données utilisées proviennent directement des parties prenantes et experts, garantissant une représentation réaliste de la variabilité des préférences dans un contexte appliqué. Les principales conclusions qui en ont émergées sont :

- Sur la base de 90 000 simulations Monte Carlo, l'analyse révèle une variabilité spatiale marquée des résultats. Certaines zones passent de totalement inadéquates à très adéquates selon les combinaisons de paramètres. D'autres zones demeurent robustes et stables à travers tous les scénarios de variation. Cette distinction entre zones sensibles et zones robustes constitue un outil précieux pour orienter la priorisation spatiale des interventions.
- Le paramètre de non-additivité (γ) est le principal facteur de sensibilité, influençant fortement les cartes d'adéquation et remettant en question l'hypothèse d'additivité des préférences dans les modèles ADMC.
- Les poids des objectifs ont également un impact important sur la sensibilité des cartes d'adéquation spatiale de l'OAP, plus particulièrement pour maximiser la protection des eaux souterraines, minimiser l'exposition aux inondations urbaines et maximiser la couverture végétale.
- La forme des échelles de valeurs a un impact limité, suggérant que leur construction détaillée pourrait être simplifiée.
- L'analyse spatiale détaillée de la sensibilité a révélé des effets locaux significatifs : Certains poids des objectifs exercent une forte influence locale malgré un impact global modéré sur la variation des résultats.
- Les interactions entre paramètres sont faibles, indiquant que la variabilité découle surtout des effets individuels.
- L'OAP SSANTO reste fiable malgré les incertitudes; le modèle ne montre pas de comportement chaotique, et les pixels identifiés comme prioritaires conservent une stabilité.

8.1 Recommandations

Dans un contexte d'urgence climatique, il s'avère essentiel de réussir à surmonter les freins de l'implantation des IVB afin de bénéficier de l'éventail de bienfaits qu'elles peuvent offrir. Le

domaine des IVB est en pleine croissance, marqué par un fort intérêt des acteurs et le moment est particulièrement propice au développement d'un OAP de ce type au Québec pour soutenir la planification spatiale stratégique. Le développement d'un OAP pour la planification spatiale des IVB s'inscrit dans une optique plus large d'augmentation de la résilience urbaine aux changements climatiques et anthropiques et vise à contribuer à une gestion intégrée des eaux urbaines au Québec.

Sur la base des conclusions de ce travail de recherche, des recommandations peuvent être émises pour soutenir le meilleur développement des OAP et l'intégration de l'OAP SSANTO dans la planification des IVB.

- **Améliorer la base de données géospatiales accessible au Québec:** Les résultats ont montré que les parties prenantes et les experts peuvent suggérer des idées d'objectifs et d'attributs différentes de la littérature et des données communément accessibles. Afin de tirer profit de ces suggestions et d'optimiser l'efficacité des OAP pour l'implantation des IVB, incluant SSANTO, il serait pertinent de cibler le développement de couches de données géospatiales spécifiques. Par exemple, l'espace disponible pour l'implantation des IVB et la localisation de tout type d'IVB, permettant d'avoir accès à une couche de données du déficit en IVB, sont des données géospatiales qui s'avèraient pertinentes à développer. Bien que certaines municipalités, comme la Ville de Montréal (Québec), disposent de bases de données partielles sur les IVB existantes (par exemple, inventaire des infrastructures vertes drainantes sur rues), ces données restent souvent incomplètes. L'imperméabilité des sols demeure une information peu répandue dans plusieurs villes également, pourtant cruciale lorsqu'on cherche à implanter des IVB.
- **Diversifier la représentativité des villes parmi les parties prenantes lors de la phase de choix et de structuration des objectifs :** Il est recommandé d'intégrer dès la phase de choix et de structuration des objectifs une diversité de profils de parties prenantes, idéalement provenant de différentes villes, pour mieux capter la réalité locale et de faire émerger des enjeux spécifiques qui ne s'appliquent pas nécessairement à tous les contextes. Par exemple, les contraintes particulières comme la proximité aux aéroports ou le type de source d'approvisionnement en eau potable (eau souterraine vs eau de surface) varient selon les villes.

Le choix des villes représentées pourrait ainsi influencer, voire biaiser, les objectifs inclus dans le cadre hiérarchique.

- **Sélectionner soigneusement les profils de parties prenantes pour l'exercice de pondération des objectifs:** Bien que le lien entre le profil des parties prenantes et leurs préférences ne soit pas toujours évident (CHAPITRE 5), l'expertise des participants dans les projets d'implantation d'IVB s'est révélée pertinente. Pour comparer efficacement les objectifs relatifs aux meilleures opportunités du territoire, il est recommandé d'impliquer des parties prenantes ayant une connaissance pratique du fonctionnement de ces projets en milieu urbain.
- **Adapter les échelles de valeurs des attributs, plus particulièrement celles mesurant des objectifs profitant des meilleures opportunités du territoire, au contexte de la ville dans lequel l'OAP est appliqué:** L'OAP nécessite une certaine part de personnalisation selon le contexte urbain. Il demeure important de s'assurer que les échelles de valeurs des attributs sont cohérentes avec les données disponibles localement et adaptées au contexte urbain spécifique. Par exemple, la facilité d'implantation selon le type de propriétaire des sites peut varier d'une ville à l'autre.
- **Adapter les pondérations des objectifs en fonction du type d'IVB ciblé :** Les résultats ont montré que les préférences vis-à-vis des objectifs à prioriser varient selon les IVB : petits systèmes (biorétention, système d'infiltration et noue), gros systèmes (marais artificiel, étang et lac) et arbres urbains. Il apparaît donc essentiel de développer les OAP en tenant compte de ces distinctions et d'adapter les objectifs à chaque type d'IVB, plutôt que de regrouper ou diluer les préférences dans une approche générique.
- **Prioriser des objectifs d'adaptation climatique dans les projets d'implantation des IVB :** Tant dans le travail de développement des hiérarchies d'objectifs (CHAPITRE 4) que dans celui portant sur la pondération des objectifs (CHAPITRE 5), les objectifs liés à la réduction des îlots de chaleur et à la gestion des inondations se sont démarqués parmi les priorités des parties prenantes. L'objectif de réduction des inondations, en particulier, a montré une influence majeure sur les résultats des cartes d'adéquation spatiale de l'OAP SSANTO, comme l'indique l'analyse de sensibilité présentée au CHAPITRE 6.
- **Renforcer la prise en compte des bénéfices sociaux et sanitaires :** Les résultats relatifs à la pondération des objectifs des IVB ont montré que, lorsqu'ils sont considérés en lien avec

d'autres objectifs, ceux liés aux bénéfices sanitaires et sociaux tendent à être jugés moins prioritaires, malgré leur importance reconnue dans le concept de résilience urbaine. Il est donc recommandé de s'assurer que les motivations derrière l'expression des préférences des parties prenantes soient bien comprises, afin d'éclairer la priorisation effectuée et d'adapter les solutions en conséquence. Par exemple, cela permettrait de déterminer si une meilleure sensibilisation aux bénéfices des IVB sur la santé et le bien-être devrait être mise en place, si la sélection des parties prenantes devrait être élargie pour inclure davantage d'acteurs issus du domaine de la santé et du social ou si ces objectifs ont simplement une importance relative moins prioritaire.

- **Porter une attention aux objectifs profitant des meilleures opportunités du territoire :** Miser sur des discussions supplémentaires ou des mécanismes de consensus autour des objectifs liés aux opportunités d'implantation, qui suscitent plus de divergences entre les parties prenantes.
- **Déterminer les préférences des parties prenantes par rapport au type de fonction d'agrégation utilisé dans l'OAP pour produire les scores d'adéquation finaux:** La pondération des objectifs et le degré d'additivité doivent être déterminés avec soin lors des processus participatifs, puisqu'ils influencent le plus les résultats produits par l'OAP. À l'inverse, les efforts peuvent être réduits pour les paramètres moins influents, comme la forme des échelles de valeurs des attributs, optimisant ainsi les ressources lors des ateliers avec les parties prenantes et les experts.
- **Étudier l'impact des méthodes de pondération simples vs robustes:** Comparer la méthode de pondération swing à des approches plus simples et directes permettrait d'évaluer sa réelle valeur ajoutée et d'identifier si le processus de détermination des préférences peut être rendu plus efficace pour les parties prenantes. Comme la sensibilité des résultats varie d'élevée pour certains objectifs à modérée pour la majorité (CHAPITRE 6), il est pertinent de se questionner sur l'effort cognitif demandé par une méthode comme swing, surtout lorsqu'il faut en plus déterminer avec les parties prenantes le degré d'additivité de la fonction d'agrégation. Réduire la charge sur les participants pourrait donc être nécessaire, ce qui justifie de nouvelles études pour explorer cette question.

- **Appropriation d'un OAP dans les pratiques :** L'appropriation des OAP dans les pratiques repose sur la mise à disposition de ressources d'accompagnement visant à faciliter l'interprétation des résultats et à favoriser une utilisation éclairée et autonome des outils.. Les OAP peuvent être mobilisés comme leviers pour soutenir la concertation intersectorielle et favoriser le dialogue avec les élus autour de la planification et de la priorisation des interventions. Il est également recommandé de former les professionnels municipaux à l'utilisation des outils SIG-ADMC afin de renforcer leur maîtrise et de les préparer à une intégration progressive de ces technologies dans les processus décisionnels.

En conclusion, l'amélioration des OAP pour la planification des IVB au Québec repose sur l'amélioration de la qualité des données géospatiales, une représentation équilibrée des parties prenantes et l'adaptation des modèles aux spécificités urbaines et aux types d'IVB ciblés. Une attention particulière doit être accordée aux objectifs d'adaptation climatique, qui demeurent prioritaires, ainsi qu'à une meilleure intégration des bénéfices sociaux et sanitaires. Enfin, le choix des fonctions d'agrégation et des méthodes de pondération devrait viser à concilier robustesse et simplicité, tandis que la pérennisation des OAP passerait par la formation, l'accompagnement des utilisateurs et leur utilisation comme leviers politiques.

RÉFÉRENCES

Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Sabatino, S. D., & Pulvirenti, B. (2017). Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, *162*, 71-86. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.014

Abily, M., Bertrand, N., Delestre, O., Gourbesville, P., & Duluc, C.-M. (2016a). Spatial Global Sensitivity Analysis of High Resolution classified topographic data use in 2D urban flood modelling. *Environmental Modelling & Software*, *77*, 183-195. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.12.002

Abily, M., Bertrand, N., Delestre, O., Gourbesville, P., & Duluc, C.-M. (2016b). Spatial Global Sensitivity Analysis of High Resolution classified topographic data use in 2D urbanflood modelling. *Environmental Modelling & Software*, *77*, 183-195. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.12.002

Absalan, F., Hatam, F., Blokker, M., Besner, M.-C., Prévost, M., & Bichai, F. (2024). Impact of heat islands vs. city greening: Real-time monitoring and modeling of drinking water temperature in the city of Montreal in Canada *Water Research*, *256*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121490

Agriculture Victoria. (2021). *Enso - El Niño Oscillation Australe*. https://agriculture.vic.gov.au/climate-and-weather

Aidinidou, M. T., Kaparis, K., & Georgiou, A. C. (2022). Analysis, Prioritization and Strategic Planning of Flood Mitigation Projects based on sustainability dimensions and a spatial/value AHP-GIS system. *SSRN*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4074885

Aidinidou, M. T., Kaparis, K., & Georgiou, A. C. (2023). Analysis, prioritization and strategic planning of flood mitigation projects based on sustainability dimensions and a spatial/value AHP-GIS system. *Expert Systems with Applications*, *211*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118566

Alencar, M. H., Priori Jr., L., & Alencar, L. H. (2017). Structuring objectives based on value-focused thinking methodology: Creating alternatives for sustainability in the built environment. *Journal of Cleaner Production*, *156*, 62-73. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.221

Alikhani, S., Nummi, P., & Ojala, A. (2021). Urban Wetlands: A Review on Ecological and Cultural Values. *Water*, *13*(3301). https://doi.org/ https://doi.org/10.3390/w13223301

Allain, S., Plumecocq, G., & Leenhardt, D. (2017). How Do Multi-criteria Assessments Address Landscape-level Problems? A Review of Studies and Practices. *Ecological Economics*, *136*, 282–295. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.02.011

Almaaitah, T., Appleby, M., Rosenblat, H., Drake, J., & Joksimovic, D. (2021). The potential of Blue-Green infrastructure as a climate change adaptation strategy: a systematic literature review. *Blue-Green Systems*, *3*(1). https://doi.org/10.2166/bgs.2021.016

Altieri, L., Cocchi, D., & Roli, G. (2021). Spatial entropy for biodiversity and environmental data: The R-package SpatEntropy. *Environmental Modelling & Software*, *144*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105149

Altieri, L., Cocchi, D., & Roli, G. (2023). Efficient Computation of Spatial Entropy Measures. *Entropy*, *25*(12). https://doi.org/ https://doi.org/10.3390/e25121634

Anctil, F., Rousselle, J., & Lauzon, N. (2012). *Hydrologie: Cheminements de l'eau* (2e ed.). Presses internationales Polytechnique.

Anteneh, Z. L., Alemu, M. M., Bawoke, G. T., Kehali, A. T., Fenta, M. C., & Desta, M. T. (2022). Appraising groundwater potential zones using geospatial and multi-criteria decision analysis (MCDA) techniques in Andasa-Tul watershed, Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, *81*(14). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-021-10083-0

Apud, A., Faggian, R., Sposito, V., & Martino, D. (2020). Suitability Analysis and Planning of Green Infrastructure in Montevideo, Uruguay. *Sustainability*, *12*(22). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12229683

Aquilué, N., Messier, C., Martins, K. T., Dumais-Lalonde, V., & Mina, M. (2021). A simple-to-use management approach to boost adaptive capacity of forests to global uncertainty. *Forest Ecology and Management*, *481*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118692

Aubert, A. H., Esculier, F., & Lienert, J. (2020). Recommendations for online elicitation of swing weights from citizens in environmental decision-making. *Operations Research Perspectives 7*. https://doi.org/10.1016/j.orp.2020.100156

Aubert, A. H., & Lienert, J. (2019). Gamified online survey to elicit citizens' preferences and enhance learning for environmental decisions. *Environmental Modelling and Software 111*. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.013

Aubert, A. H., & Masson, A. (2021). Software to elicit weights for Multi-Criteria Decision Analysis (Version 1.0). Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.

Aubert, A. H., Scheidegge, A., & Schmid, S. (2023). Gamified online surveys: Assessing experience with self-determination theory. *Plos One*, *18*(10). https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292096

Aubert, A. H., Schmid, S., Beutler, P., & Lienert, J. (2022). Innovative online survey about sustainable wastewater management: What young Swiss citizens know and value. *Environmental Science & Policy*, *137*, 323-335. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.08.018

Aubert, A. H., Schmid, S., & Lienert, J. (2024). Can online interfaces enhance learning for public decision-making? Eliciting citizens' preferences for multicriteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, *314*(2), 760-775. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.10.031

Autixier, L., Mailhot, A., Bolduc, S., Madoux-Humery, A.-S., Galarneau, M., Prévost, M., & Dorner, S. (2014). Evaluating rain gardens as a method to reduce the impact of sewer

overflows in sources of drinking water. *Science of the Total Environment 499*, 238-247. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.030

Awad, M., Kiesse, T. S., Assaghir, Z., & Ventura, A. (2019). Convergence of sensitivity analysis methods for evaluating combined influences of model inputs. *Reliability Engineering and System Safety*, *189*, 109-122. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.050

Axelsson, C., Giove, S., & Soriani, S. (2021). Urban Pluvial Flood Management Part 1: Implementing an AHP-TOPSIS Multi-Criteria Decision Analysis Method for Stakeholder Integration in Urban Climate and Stormwater Adaptation. *Water*, *13*(17). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13172422

Bach, P. M., Kuller, M., McCarthy, D. T., & Deletic, A. (2020). A spatial planning-support system for generating decentralised urban stormwater management schemes. *Science of the Total Environment 726*, 138282. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138282

Bach, P. M., Mccarthy, D. T., & Deletic, A. (2015). Can we model the implementation of water sensitive urban design in evolving cities? *Water Sci Technol*, *71*(1), 149–156. https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.2014.464

Bach, P. M., McCarthy, D. T., Urich, C., Sitzenfrei, R., Kleidorfer, M., Rauch, W., & Deletic, A. (2013). A planning algorithm for quantifying decentralised water management opportunities in urban environments. *Water Science & Technology*, *68.8*, 1857-1865. https://doi.org/10.2166/wst.2013.437

Bäckström, M., & Viklander, M. (2000). Integrated stormwater management in cold climates. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, *35:8*, 1237-1249. https://doi.org/10.1080/10934520009377033

Bagstad, K. J., Semmens, D. J., Waage, S., & Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, *5*, e27-e29. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004

Baker, S., & Chapin Iii, F. (2018). Going beyond "it depends:" the role of context in shaping participation in natural resource management. *Ecology and Society*, *23*(1). https://doi.org/https://doi.org/10.5751/ES-09868-230120

Baroni, G., Scheiffele, L. M., Schrön, M., Ingwersen, J., & Oswald, S. E. (2018). Uncertainty, sensitivity and improvements in soil moisture estimation with cosmic-ray neutron sensing. *Journal of Hydrology*, *564*, 873-887. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.053

Beatley, T. (2000). Preserving Biodiversity. *Journal of the American Planning Association*, *66*(1), 5-20. https://doi.org/ 10.1080/01944360008976080

Bel Yaagoubi, S. (2025). *Évaluation de l'efficacité des infrastructures vertes, et de leur implantation stratégique, dans la lutte contre le ruissellement urbain et les surverses* [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].

Bellamy, C. C., Jagt, A. P. N. v. d., Barbour, S., Smith, M., & Moseley, D. (2017). A spatial framework for targeting urban planning for pollinators and people with local stakeholders:

A route to healthy, blossoming communities? *Environmental Research*, *158*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.023

Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, *15*, 365-377. https://doi.org/doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x

Belton, V., & Stewart, T. (2010). Problem structuring and multiple criteria decision analysis. In J. R. F. a. S. G. M Ehrgott (Ed.), *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis* (pp. 209-239). Springer.

Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers.

Beral, H., Dagenais, D., Brisson, J., & Kõiv-Vainik, M. (2023). Impact of de-icing salt runoff in spring on bioretention efficiency. *Blue-Green Systems*, *5*(2), 170-185. https://doi.org/https://doi.org/10.2166/bgs.2023.036

Bertsch, V., & Fichtner, W. (2016). A participatory multi-criteria approach for power generation and transmission planning. *Annals of Operational Research*, *245*, 177-207. https://doi.org/10.1007/s10479-015-1791-y

Bichai, F., Grindle, A. K., & Murthy, S. L. (2018). Addressing barriers in the water-recycling innovation system to reach water security in arid countries. *Journal of Cleaner Production*, *171*, S97-S109. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.062

Biju, B. P., Nagalli, A., & Moura, E. N. d. (2021). Geographic Information Systems supported by multi-criteria decision analysis to indicate potentially suitable areas for construction and demolition waste disposal. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, *56:3*, 470-479. https://doi.org/10.5327/Z21769478947

Billaud, O., Soubeyrand, M., Luque, S., & Lenormand, M. (2020). Comprehensive decision-strategy space exploration for efficient territorial planning strategies. *Computers, Environment and Urban Systems*, *83*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101516

Bissonnette, J.-F., Dupras, J., Messier, C., Lechowicz, M., Dagenais, D., Paquette, A., Jaeger, J. A. G., & Gonzalez, A. (2018). Moving forward in implementing green infrastructures: Stakeholder perceptions of opportunities and obstacles in a major North American metropolitan area. *Cities*, *81*, 61-70. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.03.014

Blecken, G.-T., Marsalek, J., & Viklander, M. (2011). Laboratory Study of Stormwater Biofiltration in Low Temperatures: Total and Dissolved Metal Removals and Fates. *Water, Air, & Soil Pollution*, *219*, 303–317. https://doi.org/ https://doi.org/10.1007/s11270-010-0708-2

Bonciarelli, L., Orlandi, F., Muscas, D., & Fornaciari, M. (2025). Sustainable Stormwater Management and Bioretention: An Overview of Reviews of the Last 10 Years. *Land*, *14*(736). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land14040736

Bond, S. D., Carlson, K. A., & Keeney, R. L. (2008). Generating Objectives: Can DecisionMakers Articulate What They Want? *Management science*, *54*(1), 56-70. https://doi.org/10.1287/mnsc.1070.0754

Boroushaki, S. (2017). Entropy-Based Weights for MultiCriteria Spatial Decision-Making. Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers. *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*, *79*(1), 168–187. https://doi.org/10.1353/pcg.2017.0009

Boucher, I. (2010). *La gestion durable des eaux de pluie*. https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/urbanisme/guide_gestion_eaux_pluie_complet.pdf

Bounoua, L., Zhang, P., Mostovoy, G., Thome, K., Masek, J., Imhoff, M., Shepherd, M., Quattrochi, D., Santanello, J., Silva, J., Wolfe, R., & Toure, A. M. (2015). Impact of urbanization on US surface climate. *Environmental Reasearch Letters*, *10*(084010). https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084010

Bousquet, M. (2024a). *MCDA for NBS: A transdisciplinary approach combining multicriteria decision analysis and nature-based solution planning* [PhD thesis, Université Laval]. Québec, Canada.

Bousquet, M. (2024b). *MCDA for NBS: A transdisciplinary approach combining multicriteria decision analysis and nature-based solution planning* [Thèse de doctorat, Université Laval]. Québec, Canada.

Bousquet, M., Kuller, M., Lacroix, S., & Vanrolleghem, P. A. (2023). A critical review of MCDA practices in planning of urban green spaces and NBS. *Blue-Green Systems*, *00*(0). https://doi.org/10.2166/bgs.2023.132

Boyer, D., Desrochers, M., Cosgrove, E., & Walter, E. (2013). *La récupération de l'eau de pluie*. https://www.ecohabitation.com/guides/2557/recuperation-de-leau-de-pluie/

Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects - The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, *24*, 228–238. https://doi.org/doi:10.1016/0377-2217(86)90044-5

Bryan, B. A., Grandgirard, A., & Ward, J. R. (2010). Quantifying and Exploring Strategic Regional Priorities for Managing Natural Capital and Ecosystem Services Given Multiple Stakeholder Perspectives. *Ecosystem Services*, *13*, 539–555. https://doi.org/10.1007/s10021-010-9339-0

Bui, D. T., Bui, Q.-T., Nguyen, Q.-P., Pradhan, B., Nampak, H., & Trinh, P. T. (2017). A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. *Agricultural and Forest Meteorology*, *233*, 32-44. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.002

Bureau de normalisation du Quebec. (2012). Norme BNQ 3019-190 Lutte aux ilots de chaleur urbains – Aménagement des aires de stationnement. In.

Burgis, C. R., Hayes, G. M., Henderson, D. A., Zhang, W., & Smith, J. A. (2020). Green stormwater infrastructure redirects deicing salt from surface water to groundwater. *Science*

of the Total Environment, *729*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138736

Burhenne, S., Jacob, D., & Henze, G. P. (2011). *Sampling based on Sobol' sequences for Monte Carlo techniques applied to building simulations* Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Syndey.

Bush, J., & Doyon, A. (2019). Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute? *Cities*, *95*. https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102483

Campbell-Arvai, V., & Lindquist, M. (2021). From the ground up: Using structured community engagement to identify objectives for urban green infrastructure planning. *Urban Forestry & Urban Greening*, *59*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127013

Campolongo, F., Saltelli, A., & Cariboni, J. (2011). From screening to quantitative sensitivity analysis. A unified approach. *Computer Physics Communications*, *182*, 978-988. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2010.12.039

Campos, J. A., da Silva, D. D., Fernandes Filho, E. I., Pires, G. F., Amorim, R. S. S., de Menezes Filho, F. C. M., de Melo Ribeiro, C. B., Uliana, E. M., & Aires, U. R. V. (2023). Environmental vulnerability assessment of the Doce River basin, southeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(9), 1119. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11782-w

Caplan, J. S., Salisbury, A. B., McKenzie, E. R., & Eisenman, S. W. (2023). Deicing Salt Imperils Plants in Roadside Bioretention Basins. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4388269

Cartwright, J. H., Shammi, S. A., & Rodgers, J. C. (2022). Use of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) for Mapping Erosion Potential in Gulf of Mexico Watersheds. *Water*, *14*(12). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w14121923

Casal-Campos, A., Fu, G., Butler, D., & Moore, A. (2016). An Integrated Environmental Assessment of Green and Gray Infrastructure Strategies for Robust Decision Making. *nviron. Sci. Technol.*, *49*(14), 8307–8314. https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es506144f

Cegan, J. C., Filion, A. M., Keisler, J. M., & Linkov, I. (2017). Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review. *Environ Syst Decis*, *37*, 123-133. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10669-017-9642-9

Chalifour-Lemieux, F. (2023). *Développement de critères de biodiversité dans l'outil d'aide à la décision multicritère SSANTO* [[Unpublished master's thesis]]. Polytechnique Montreal.

Chatzinikolaou, P., Viaggi, D., & Raggi, M. (2018). Review of Multicriteria Methodologies and Tools for the Evaluation of the Provision of Ecosystem Services. In J. Berbel, Bournaris, T., Manos, B., Matsatsinis, N., Viaggi, D. (Ed.), *Multicriteria Analysis in Agriculture. Multiple Criteria Decision Making.* (pp. 43–68). Springer, Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-76929-5_2

Chen, Y., J.Yu, & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, *25*, 1582-1591. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001

Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, *25*(12). https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001

Chen, Y., Yu, J., Shahbaz, K., & Xevi, E. (13-17 July 2009). *A GIS-Based Sensitivity Analysis of Multi-Criteria Weights* 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia

Chesapeake Stormwater Network. (2013). VA Stormwater Design Specification No 9: Bioretention (Version 2.0). In.

Chlela, C., & Brodeur, L. (2008). *Étude de l'impact des embruns salins sur les caractéristiques chimiques du sol situé à proximité d'une autoroute-Étude présentée au Ministère des Transports du Québec, direction de l'Est de la Montérégie, service des projets, dans le cadre du prolongement de l'autoroute 35*

Choobeh, S., Abghari, H., & Erfanian, M. (2024). Spatial and temporal variability of precipitation based on marginal and apportionment entropy disorder indices in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, *155*, 2589-2603. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00704-023-04748-y

Cohen, A., Cohen, Y., Broday, D., & Timar, D. (2008). Performance and acceptance evaluation of a knowledge-based SDSS for medfly area-wide control. *J. Appl. Entomol*, *132*. https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2008.01340.x

Colla, S. R., Willis, E., & Packer, L. (2009). Can green roofs pr oofs provide habitat for urban bees (Hymenopter vide habitat for urban bees (Hymenoptera: Apidae)? *Cities and the Environment*, *2*(1).

Coutts, C., & Hahn, M. (2015). Green Infrastructure, Ecosystem Services, and Human Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health 12*(8). https://doi.org/10.3390/ijerph120809768

Crosetto, M., & Tarantola, S. (2001). Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS based model implementation. *International Journal of Geographical Information Science*, *15*(5), 415-437. https://doi.org/ https://doi.org/10.1080/13658810110053125

CSA Group. (2018). *Design of bioretention systems: W200-18*.

Cukier, R. I., Levine, H. B., & Shuler, K. E. (1978). Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems. *Journal of Computational Physics*, *26*(1), 1-42. https://doi.org/10.1016/0021-9991(78)90097-9

Da Veiga, A., & Martins, N. (2015). Information Security Culture and Information Protection Culture: A Validated Assessment Instrument. *Computer Law & Security Review*, *31*, 243-256. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clsr.2015.01.005

Dagenais, D., Brisson, J., & Fletcher, T. D. (2018). The role of plants in bioretention systems; does the science underpin current guidance? *Ecological Engineering*, *120*, 532-545. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.007

Dagenais, D., Paquette, S., Fuamba, M., Servier, E. J., Spector, A., Besson, L., & Thomas-Maret, I. (2013). Participatory Design of a Decision Aid Tool Integrating Social Aspects for the Implementation of at Source Vegetated Best Management Practices (SVBMPs) at the Neighbourhood Level. Novatech 8th International Conference 2013, Lyon, France.

Dagenais, D., Paquette, S., Fuamba, M., & Thomas, I. (2011, 11-16 September). Keys to Successful Large Scale Implementation of Vegetated Best Management Practices in the Urban Environment 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.

Dagenais, D., Paquette, S., Thomas, I., & Fuamba, M. (2014). *Implantation en milieu urbain de systèmes végétalisés de contrôle à la source des eaux pluviales dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques : balisage des pratiques québécoises, canadiennes et internationales et développement d'un cadre d'implantation pour les municipalités du Sud du Québec* (Rapport final projet # 551004-XXI).

Dagenais, D., Thomas, I., & Paquette, S. (2017). Siting green stormwater infrastructure in a neighbourhood to maximise secondary benefits: lessons learned from a pilot project. *Landscape Research*, *42*(2), 195-210.

Dai, F. C., Lee, C. F., & Zhang, X. H. (2001). GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. *Engineering Geology*, *61*(4), 257-271. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00028-X

Dancey, C., & Reidy, J. (2004). *Statistics without maths for psyhoclogy: using SPSS for windows*. Prentice-Hall.

Daniel, C. (1958). On varying one factor at a time. *Biometrics*, *14*, 430-431.

Daniel, T. C., Muhar, A., Arnberger, A., Aznar, O., Boyd, J. W., Chan, K. M. A., Costanza, R., Elmqvist, T., Flint, C. G., Gobster, P. H., Grêt-Regamey, A., Lave, R., Muhar, S., Marianne Penkerm, R. G. R., Schauppenlehner, T., Sikor, T., Soloviy, I., Spierenburg, M., Taczanowska, K.,…Dunk, A. v. d. (2012). Contributions of cultural services to the ecosystem services agenda. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, *109*(23), 8812–8819 | https://doi.org/doi/10.1073/pnas.1114773109

de Brito, M. M., Almoradie, A., & Evers, M. (2019a). Spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis in a MCDA-based flood vulnerability model. *International Journal of Geographical Information Science*, *33*(9), 1788-1806. https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1599125

de Brito, M. M., Almoradie, A., & Evers, M. (2019b). Spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis in a MCDA-based flood vulnerability model. *International Journal of Geographical Information Science* *33*(9). https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1599125

de Brito, M. M., & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, *16*(4), 1019–1033. https://doi.org/https://doi.org/10.5194/nhess-16-1019-2016

Deeprose, R. K. (2006, 2015). *Hydrologie*. https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/hydrologie?gclid=CjwKCAjwoP6LBh

BlEiwAvCcthKv2vX653gB-dMSr8Wn1hmVIXpmLgHCErPPSCYfu4Mj7AtRyl9t8TBoCkDoQAvD_BwE

Delgado, M. G., & Sendra, J. B. (2004). Sensitivity Analysis in Multicriteria Spatial Decision-Making: A Review. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, *10*(6), 1173-1187. https://doi.org/10.1080/10807030490887221

Derkzen, M. L., Teeffelen, A. J. A. v., & Verburg, P. H. (2017). Green infrastructure for urban climate adaptation: How do residents' views on climate impacts and green infrastructure shape adaptation preferences? *Landscape and Urban Planning*, *157*, 106-130. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.027

Dhakal, K. P., & Chevalier, L. R. (2017). Managing Urban Stormwater for Urban Sustainability: Barriers and Policy Solutions for Green Infrastructure Application. *Journal of Environmental Management 203*, 171-181. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.065.

Doorga, J. R. S., Rughooputh, S. D. D. V., & Boojhawon, R. (2019). Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable Energy*, *133*, 1201-1219. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.105

Downes, N. K., & Storch, H. (2014). Current Constraints and Future Directions for Risk Adapted Land-Use Planning Practices in the HighDensity Asian Setting of Ho Chi Minh City. *Planning Practice and Research*, *29:3*, 220-237. https://doi.org/10.1080/02697459.2014.929835

Drapeau, L.-M., Beaudoin, M., Vandycke, L., & Brunstein, M. (2021). *Mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains : mise à jour 2021*. Gouvernement du Québec, Institut National de Santé Publique du Québec. Retrieved from http://www.inspq.qc.ca

Durbach, I. N., & Stewart, T. J. (2009). Using expected values to simplify decision making under uncertainty. *Omega*, *37*(2), 312-330. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2007.02.001

Eisenführ, F., Weber, M., & Langer, T. (2010). *Rational Decision Making*. Springer. https://doi.org/10.1007 /978-3-642-0285 1-9

Ellis, J. B., & Viavattene, C. (2014). Sustainable Urban Drainage System Modeling for Managing Urban Surface Water Flood Risk. *Clean – Soil, Air, Water 42*(2), 153-159. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/clen.201300225

Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Combined Sewer Overflows (CSO)*. https://www.epa.gov/npdes/combined-sewer-overflows-csos

EPA. (2021, July 29, 2021). *What is Green Infrastructure?* https://www.epa.gov/green-infrastructure/what-green-infrastructure

Everitt, B. S., & Skrondal, A. (1998). *The Cambridge Dictionnray of Statistics*. Cambridge University Press.

Ezell, B., Lynch, C. J., & Hester, P. T. (2021). Methods for Weighting Decisions to Assist Modelers and Decision Analysists: A Review of Ratio Assignment and Approximate Techniques. *Appl. Sci*, *11, 10397*. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app112110397

Fang, Z., Jin, Y., & Yang, T. (2022). Incorporating Planning Intelligence into Deep Learning: A Planning Support Tool for Street Network Design. *Journal of Urban Technology*, *29*(2), 99-114. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10630732.2021.2001713

FAO. (2021). *Services Ecosystémiques & Biodiversité*. https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/fr/

Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). (1998). *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044574.pdf

Feizizadeh, B., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014a). A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Computers & Geosciences*, *64*, 81-95. https://doi.org/ http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.11.009

Feizizadeh, B., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014b). A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Computers & Geosciences*, *64*, 81-95. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.11.009

Feizizadeh, B., & Kienberger, S. (2017). Spatially explicit sensitivity and uncertainty analysis for multicriteria-based vulnerability assessment. *Journal of Environmental Planning and Management*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/09640568.2016.1269643

Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J., & Sánchez, J. P. R. (2022). Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review. *Science of the Total Environment*, *806*. https://doi.org/ https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150447

Ferretti, V. (2019). Why Is It Worth It to Expand Your Set of Objectives? Impacts from Behavioral Decision Analysis in Action. In: Morais, D., Carreras, A., de Almeida, A., Vetschera, R. (eds) Group Decision and Negotiation: Behavior, Models, and Support. GDN 2019. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 351. Springer, Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-21711-2_8

Ferretti, V., Bottero, M., & Mondini, G. (2014). Decision making and cultural heritage: An application of the Multi-Attribute Value Theory for the reuse of historical buildings. *Journal of Cultural Heritage*, *15*, 644-655. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2013.12.007

Ferretti, V., & Geneletti, D. (2020). Does the spatial representation affect criteria weights in environmental decision-making? Insights from a behavioral experiment. *Land Use Policy*, *97*. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104613

Ferretti, V., & Montibeller, G. (2016). Key challenges and meta-choices in designing and applying multi-criteria spatial decision support systems. *Decision Support Systems*, *84*, 41-52. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2016.01.005

Field, R., Sullivan, D., & Tafuri, A. N. (2003). *Management of Combined Sewer Overflows* (B. R. CRC Press, Ed.). Lewis Publishers.

Filazzola, A., Shrestha, N., & MacIvor, J. S. (2019). The contribution of constructed green infrastructure to urban biodiversity: A synthesis and meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, *56*, 2131–2143. https://doi.org/ 10.1111/1365-2664.13475

Fildes, S. G., Bruce, D., Clark, I. F., Raimondo, T., Keane, R., & Batelaan, O. (2022a). Integrating spatially explicit sensitivity and uncertainty analysis in a multi-criteria decision analysis-based groundwater potential zone model *Journal of Hydrology 610*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127837

Fildes, S. G., Bruce, D., Clark, I. F., Raimondo, T., Keane, R., & Batelaan, O. (2022b). Integrating spatially explicit sensitivity and uncertainty analysis in a multi-criteria decision analysis-based groundwater potential zone model *Journal of Hydrology*, *610*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127837

Finewood, M. H., Matsler, A. M., & Zivkovich, J. (2019). Green Infrastructure and the Hidden Politics of Urban Stormwater Governance in a Postindustrial City. *Annals of the American Association of Geographers 109*(3), 909-925. https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1507813

Fischer, L. K., Honold, J., Cvejić, R., Delshammar, T., Hilbert, S., Lafortezza, R., Nastran, M., Nielsen, A. B., Pintar, M., Jagt, A. P. N. v. d., & Kowarik, I. (2018). Beyond green: Broad support for biodiversity in multicultural European cities. *Global Environmental Change*, *49*, 35-45. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.02.001

Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art. *Advances in Water Resources*, *51*, 261-279. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, *12*(7), 525-542. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314

Françozo, R. V., & Belderrain, M. C. N. (2022). A problem structuring method framework for value-focused thinking. *EURO Journal on Decision Processes*, *10*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejdp.2022.100014

Frantzeskaki, N., Vandergert, P., Connop, S., Schipper, K., Zwierzchowska, I., Collier, M., & Lodder, M. (2020). Examining the policy needs for implementing nature-based solutions in cities: Findings from city-wide transdisciplinary experiences in Glasgow (UK), Genk (Belgium) and Poznań (Poland). *Land Use Policy*, *96*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104688

Fredette, C. (2023). *Guide d'introduction aux infrastructures végétalisées: Informations générales et bonnes pratiques, 1ère édition*. Québec Vert. https://quebecvert.com/wp-content/uploads/2023/10/quebecvert_guide-quebecois-dintroduction-aux-infrastructures-vegetalisees_aout-2023.pdf

Gachon, P. (2020). *Leçons à tirer des inondations récentes : l'importance de l'intersectorialité*. https://inm.qc.ca/edq2020-cle11/

Geertman, S., & Stillwell, J. (2003). *Planning Support Systems in Practice*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24795-1

Geertman, S., & Stillwell, J. (2013). Introduction to 'Planning Support Systems for Sustainable Urban Development'. In f. t. s.geertman j. stillwell (Ed.), *Planning Support Systems for Sustainable Urban Development (pp.1-18)*. springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37533-0_1

Gheorghe, I., & Ion, B. (2011). The Effects of Air Pollutants on Vegetation and the Role of Vegetation in Reducing Atmospheric Pollution. In *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources*. https://doi.org/10.5772/17660

Ghofrani, Z., Sposito, V., & Faggian, R. (2017). A Comprehensive Review of Blue-Green Infrastructure Concepts *International Journal of Environment and Sustainability*, *6*(1), 15-36.

Ghose, D., Pradhan, S., & Shabbiruddin. (2022). Development of model for assessment of renewable energy sources: a case study on Gujarat, India. *International Journal of Ambient Energy 43*(1). https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1691650

Giguère, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains* Gouvernement du Québec - Institut National de Santé Publique du Québec Retrieved from https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988_MesuresIlotsChaleur.pdf

Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, *86*, 235-245. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019

Gómez-Delgado, M., & Tarantola, S. (2006a). GLOBAL sensitivity analysis, GIS and multi-criteria evaluation for a sustainable planning of a hazardous waste disposal site in Spain. *International Journal of Geographical Information Science 20*(4). https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13658810600607709

Gómez-Delgado, M., & Tarantola, S. (2006b). GLOBAL sensitivity analysis, GIS and multi-criteria evaluation for a sustainable planning of a hazardous waste disposal site in Spain. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(4), 449-466. https://doi.org/10.1080/13658810600607709

Gonzalez, A., & Enríquez-de-Salamanca, A. (2018). Spatial Multi-Criteria Analysis in Environmental Assessment: A Review and Reflection on Benefits and Limitations. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, *20*(3), 1-24. https://doi.org/10.1142/S146433321840001X

Goodspeed, R., Liu, R., Gounaridis, D., Lizundia, C., & Newell, J. (2022). A regional spatial planning model for multifunctional green infrastructure. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *49*(3). https://doi.org/https://doi.org/10.1177/23998083211033610

Gougeon, G., Bouattour, O., Formankova, E., St-Laurent, J., Doucet, S., Dorner, S., Lacroix, S., Kuller, M., Dagenais, D., & Bichai, F. (2023). Impact of bioretention cells in cities with a cold climate: modeling snow management based on a case study. *Blue-Green Systems*, *5*(1), 1-17. https://doi.org/https://doi.org/10.2166/bgs.2023.032

Gouvernement du Québec. (2002). *Politique nationale de l'eau. L'eau. La vie. L'avenir. Politique national de l'eau*. Retrieved from https://www.grobec.org/pdf/pde/politique_integral.pdf

Gouvernement du Québec. (2012). *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques*. http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf

Gouvernement du Québec. (2019). *Stratégie québécoise d'économie d'eau potable* Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation Retrieved from www.mamh.gouv.qc.ca

Gouvernement du Québec. (2020). *Stratégie québécoise d'économie d'eau potable: Horizon 2019-2025* (Rapport annuel de l'usage de l'eau potable 2018). https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/infrastructures/strategie_quebecoise_eau_potable/rapport_usage_eau_potable_2018.pdf

Gouvernement du Québec. (2023). *Plan pour une économie verte 2030*. Retrieved from https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-economie-verte

Gouvernement du Québec. (2024). *Orientations gouvernementales en aménagement du territoire en vigueur (OGAT)*. Ministère des affaires municipales et habitation. Retrieved from https://www.quebec.ca/habitation-territoire/amenagement-developpement-territoires/amenagement-territoire/orientations-gouvernementales

Gouvernement du Québec. (2025a). *Plan pour une économie verte 2030*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Retrieved from https://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/plan-economie-verte

Gouvernement du Québec. (2025b). *Programme OASIS*. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Retrieved from https://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/oasis/index.htm

Government of Western Australia. (2020). *Dryland salinity in Western Australia*. https://www.agric.wa.gov.au/soil-salinity/dryland-salinity-western-australia-0

Gregory, R., Failing, L., Harstone, M., Long, G., McDnaiels, T., & Ohlson, D. (2012). *Structured Decision Making: A Practical Guide to Environmental Management Choices* (Chichester: Wiley-Blackwell, Ed.)

Gregory, R., & Wellman, K. (2001). Bringing stakeholder values into environmental policy choices: a community-based estuary case study. *Ecological Economics*, *39*, 37-52. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00214-2

Grimble, R., & Wellard, K. (1997). Stakeholder Methodologies in Natural Resource Management: a Review of Principles, Contexts, Experiences and Opportunities. *Agricultural Systems*, *55*(2), 173-193.

Guan, X., Wang, J., & Xiao, F. (2021). Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. *Journal of Cleaner Production*, *303*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127022

Haag, F., Aubert, A. H., & Lienert, J. (2022a). ValueDecisions, a web app to support decisions with conflicting objectives, multiple stakeholders, and uncertainty. *Environmental Modelling and Software*, *150*. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105361

Haag, F., Aubert, A. H., & Lienert, J. (2022b). ValueDecisions, a web app to support decisions with conflicting objectives, multiple stakeholders, and uncertainty *Environmental Modelling and Software 150*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105361

Haag, F., Lienert, J., Schuwirth, N., & Reichert, P. (2019). Identifying non-additive multi-attribute value functions based on uncertain indifference statements. *Omega*, *85*, 49-67. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.05.011

Haag, F., Reichert, P., Maurer, M., & Lienert, J. (2019). Integrating uncertainty of preferences and predictions in decision models: An application to regional wastewater planning. *Journal of Environmental Management*, *252*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109652

Haag, F., Reichert, P., Maurer, M., Lienert, J., & A. N., R. (2019). Integrating uncertainty of preferences and predictions in decision models: An application to regional wastewater planning *Journal of Environmental Management*, *252*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109652

Haag, F., Zürcher, S., & Lienert, J. (2019). Enhancing the elicitation of diverse decision objectives for public planning. *European Journal of Operational Research*, *279*, 912-928. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.002

Haghizadeh, A., Siahkamari, S., Haghiabi, A. H., & Rahmati, O. (2017). Forecasting flood-prone areas using Shannon's entropy model. *J. Earth Syst. Sci*, *126*(39). https://doi.org/ 10.1007/s12040-017-0819-x

Hämäläinen, R. P. (2015). Behavioural issues in environmental modelling – The missing perspective. *Environmental Modelling & Software*, *73*, 244-253. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.019

Hämäläinen, R. P., & Alaja, S. (2008). The threat of weighting biases in environmental decision analysis. *Ecological Economics*, *68*, 556-569. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.05.025

Hanna, E., Bruno, D., & Comín, F. A. (2024). The ecosystem services supplied by urban green infrastructure depend on their naturalness, functionality and imperviousness. *Urban Ecosystems*, *27*, 187-202. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11252-023-01442-9

Hansen, R., Mattes, A., Meier, M., & Kurths, A. (2023). Reorienting urban green infrastructure planning towards biodiversity –Perspectives and ongoing debates from Germany. *Urban Forestry & Urban Greening*, *90*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128155

Hansen, R., Olafsson, A. S., Jagt, A. P. N. v. d., Rall, E., & Pauleit, S. (2019). Planning multifunctional green infrastructure for compact cities: What is the state of practice? *Ecological Indicators*, *96*, 99-110. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.042

Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From Multifunctionality to Multiple Ecosystem Services? A Conceptual Framework for Multifunctionality in Green Infrastructure Planning for Urban Areas. *Ambio*, *43*, 516-529. https://doi.org/10.1007/s13280-014-0510-2

Harrison, S. R., & Qureshi, M. E. (2000). Choice of stakeholder groups and members in multicriteria decision models *Natural Resources Forum*, *24*, 11-19. https://doi.org/SO 16S-0203(99)00040-9

Hassall, C., & Anderson, S. (2015). Stormwater ponds can contain comparable biodiversity to unmanaged wetlands in urban areas. *Hydrobiologia*, *745*, 137–149. https://doi.org/10.1007/s10750-014-2100-5

Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, *248*(1-3), 118-124. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046

Herman, J. D., Kollat, J. B., Reed, P. M., & Wagener, T. (2013). Technical Note: Method of Morris effectively reduces the computational demands of global sensitivity analysis for distributed watershed models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *17*(7). https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-17-2893-2013

Hewitt, C. N., Ashworth, K., & MacKenzie, A. R. (2020). Using green infrastructure to improve urban air quality (GI4AQ). *Ambio*, *49*, 62–73. https://doi.org/10.1007/s13280-019-01164-3

Hong, A., Sallis, J. F., King, A. C., Conway, T. L., Saelens, B., Cain, K. L., Fox, E. H., Frank, L. D., & A. N., R. (2018). Linking Green Space to Neighborhood Social Capital in Older Adults: The Role of Perceived Safety. *Social Science and Medicine*, *207*, 38-45. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2018.04.051

Hoover, F.-A., Meerow, S., Grabowski, Z. J., & McPhearson, T. (2021). Environmental justice implications of siting criteria in urban green infrastructure planning. *Journal of Environmental Policy & Planning*. https://doi.org/ https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1945916

Hošková-Mayerová, Š., Talhofer, V., Otrísal, P., & Rybanský, M. (2020). Influence of Weights of Geographical Factors on the Results of Multicriteria Analysis in Solving Spatial Analyses. *International Journal of Geo-Information*, *9*(8). https://doi.org/ https://doi.org/10.3390/ijgi9080489

Hui, S. C. M. (2011). *Green roof urban farming for buildings in high-density urban cities* Hainan China World Green Roof Conference 2011 Hainan (Haikuo, Boao and Sanya), China

Huo, X., Gupta, H., Niu, G. Y., Gong, W., & Duan, Q. (2019). Parameter Sensitivity Analysis for Computationally Intensive Spatially Distributed Dynamical Environmental Systems Models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *11*, 2896–2909. https://doi.org/10.1029/2018MS001573

Huxley, M. (2009). Urban Planning. In R. K. a. N. Thrift (Ed.), *International Encyclopedia of Human Geography*.

Hwang, C.-L., & YoonYoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications: a State of the Art Survey* (Vol. 186). Springer-Verlag.

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications: A state-of-the-art survey*. Berlin New York: Springer-Verlag.

Hydro-Québec. (2020). *Servitudes et droits d'Hydro-Québec près des lignes de distribution*. https://www.hydroquebec.com/securite/servitudes-droits-propriete/lignes-distribution.html

International Civil Aviation Organization. (2012). *Airport Services Manual- Part 3: Wildlife Control and Reduction*. http://www.birdstrike.org/wp-content/uploads/2014/10/ICAO-AirportServicesManual-Part3-FourthEdition-2012.pdf

IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp.35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Jalliffier-Verne, I., Heniche, M., Madoux-Humery, A.-S., Galarneau, M., Servais, P., Prévost, M., & Dorner, S. (2016). Cumulative effects of fecal contamination from combined sewer overflows: Management for source water protection. *174*, 62-70. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.002

Jansen, M. (1999). Analysis of Variance Designs for Model Output. *Computer Physics Communications*, *117*(1-2), 35-43. https://doi.org/10.1016/S0010-4655(98)00154-4

Jansen, M. J. W., Rossing, W. A. H., & Daamen, R. A. (1994). Monte Carlo estimation of uncertainty contributions from several independent multivariate sources [In J. Grasman and G. van Straten (Eds)]. *Predictability and Nonlinear Modelling in Natural Sciences and Economics*, 334-343.

Janssen, H. (2013). Monte-Carlo based uncertainty analysis: Sampling efficiency and sampling convergence. *Reliability Engineering and System Safety*, *109*, 123-132. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2012.08.003

Jayasooriya, V., Muthukumaran, S., Ng, A., & Perera, B. J. C. (2019). Multi Criteria Decision Making in Selecting Stormwater Management Green Infrastructure for Industrial Areas Part 1: Stakeholder Preference Elicitation. *Water Resources Management*, *33*, 627-639. https://doi.org/10.1007/s11269-018-2123-1

Jelokhani-Niaraki, M. (2021a). Collaborative spatial multicriteria evaluation: a review and directions for future research. *International Journal of Geographical Information Science 35*(1). https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1776870

Jelokhani-Niaraki, M. (2021b). Collaborative spatial multicriteria evaluation: a review and directions for future research. *International Journal of Geographical Information Science*, *35*(1), 9-42. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1776870

Jin, Z., Sieker, F., Bandermann, S., & Sieker, H. (2006). Development of a GIS-based expert system for on-site storm-water management. *Water Pract. Technol.*, *1*(01).

Joerin, F., Thériault, M., & Musy, A. (2001). Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, *15*(2), 153-174. https://doi.org/Doi 10.1080/13658810051030487

Joshi, P., Leitão, J. P., Maurer, M., & Bach, P. M. (2021). Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. *Water Research*, *191*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116780

Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, *113*, 363-375.

Kambites, C., & Owen, S. (2006). Renewed prospects for green infrastructure planning in the UK. *Planning, Practice & Research*, *21:4*, 483-496. https://doi.org/10.1080/02697450601173413

Kang, J.-Y., Michels, A., Crooks, A., Aldstadt, J., & Wang, S. (2022). An integrated framework of global sensitivity analysis and calibration for spatially explicit agentbased models. *Transactions in GIS*, *26*(1), 100-128. https://doi.org/10.1111/tgis.12837

Kang, J.-Y., Michels, A., Crooks, A., Aldstadt, J., & Wang, S. (2022). An integrated framework of global sensitivity analysis and calibration for spatially explicit agentbased models. *Transactions in GIS*, *26*, 100–128. https://doi.org/10.1111/tgis.12837

Kang, J.-Y., Michels, A., Crooks, A., Aldstadt, J., & Wang, S. (2022). An integrated framework of global sensitivity analysis and calibration for spatially explicit agentbased models. *Transactions in GIS*, *26*(1), 100-128. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/tgis.12837

Kauark-Fontes, B., Marchetti, L., & Salbitano, F. (2023). Integration of nature-based solutions (NBS) in local policy and planning toward transformative change. Evidence from Barcelona, Lisbon, and Turin. *Ecology and Society*, *28*(2), Article 25. https://doi.org/https://doi.org/10.5751/ES-14182-280225

Kazak, J. K., Chruscinski, J., & Szewranski, S. (2018). The Development of a Novel Decision Support System for the Location of Green Infrastructure for Stormwater Management. *Sustainability*, *10 (12)*. https://doi.org/10.3390/su10124388

Keenan, P. B. (2006). Spatial Decision Support Systems: A coming of age. *Control and Cybernetics*, *35*(1), 9.

Keeney, R. L. (1996). *Value-focused thinking a path to creative decision making*. MA: Harvard University Press. https://books.google.ca/books?hl=fr&lr&id=WtNASm7O3fQC&oi=fnd&pg=PA3&ots=oRrBIWMjSY&sig=XA4qRsQaYkPBNYqO4VZRjR9p9wE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs*.

Keywood, M., Emmerson, K., & Hibberd, M. (2016). *Climat : Pluie*. Australia state of the environment 2016, Australian Government Department of the Environment and Energy, Canberra, https://soe.environment.gov.au/theme/climate/topic/2016/rainfall

Khastagir, A., & Jayasuriya, N. (2010). Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology*, *381*, 181-188. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.040

Kiker, G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Seager, T. P., & Linkov, I. (2005). Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *1*(2), 95-108.

Kim, J., & Kaplan, R. (2004). Physical and psychological factors in sens of community-New Urbanist Kentlands and Nearby Orchard Village. *Environment and behavior*, *36*(3), 313-340. https://doi.org/10.1177/0013916503260236

Kinkeldey, C., MacEachren, A. M., & Schiewe, J. (2014). How to Assess Visual Communication of Uncertainty? A Systematic Review of Geospatial Uncertainty Visualisation User Studies. *The Cartographic Journal*, *51*(4), 372-386. https://doi.org/10.1179/1743277414Y.0000000099

Kirkwood, C. W. (1997). *Strategic decision making—Multiobjective decision analysis with spreadsheets*. Duxbury Press.

Kok, J.-L. d., Engelen, G., & Maes, J. (2015). Reusability of model components for environmental simulation – Case studies for integrated coastal zone management. *Environmental Modelling & Software*, *68*, 42-54. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.001

Kopp, J., Frajer, J., Lehnert, M., Kohout, M., & Ježek, J. (2021). Integrating Concepts of Blue-green Infrastructure to Support Multidisciplinary Planning of Sustainable Cities *Problems of Sustainable development*, *16*(2), 137-146. https://doi.org/10.35784/pe.2021.2.14

Kratky, H., Li, Z., Li, X., & Yu, T. (2018). *Laboratory Study on the Performance of Bioretention for Stormwater Management in Cold Climates* International Low Impact Development Conference 2018, Nashville, TN, USA.

Kremer, P., Hamstead, Z. A., & McPhearson, T. (2016). The value of urban ecosystem services in New York City: A spatially explicit multicriteria analysis of landscape scale valuation scenarios. *Environmental Science & Policy*, *62*, 57-68. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.012

Kuller, M. (2018). *SSANTO: Planning Support for Water Sensitive Urban Design* [Thesis, Monash University]. Australia.

Kuller, M., Bach, P. M., Ramirez-Lovering, D., & Deletic, A. (2017). Framing water sensitive urban design as part of the urban form: A critical review of tools for best planning practice. *Environmental Modelling & Software*, *96*, 265-282. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.003

Kuller, M., Bach, P. M., Ramirez-Lovering, D., & Deletic, A. (2018). What drives the location choice for water sensitive infrastructure in Melbourne, Australia? *Landscape and Urban Planning*, *175*, 92-101. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.018

Kuller, M., Bach, P. M., Roberts, S., Browne, D., & Deletic, A. (2019). A planning-support tool for spatial suitability assessment of green urban stormwater infrastructure. *Science of the Total Environment*, *686*, 856-868. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.051

Kuller, M., Beutler, P., & Lienert, J. (2023). Preference change in stakeholder group-decision processes in the public sector: Extent,causes and implications. *European Journal of*

Operational Research, *308*, 1268-1285. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.12.001

Kuller, M., Deletic, A., & Bach, P. M. (2019). *Does diversity of water sensitive urban design match the diversity of the urban context?* NOVATECH 2019,

Kuller, M., Farrelly, M., Deletic, A., & Bach, P. M. (2018). Building effective Planning Support Systems for green urban water infrastructure—Practitioners' perceptions. *Environmental Science and Policy*, *89*, 153-162. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.06.011

Kuller, M., Farrelly, M., Marthanty, D. R., Deletic, A., & Bach, P. M. (2022). Planning support systems for strategic implementation of nature-based solutions in the global south: Current role and future potential in Indonesia *Cities*, *126*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103693

Kuller, M., Reid, D. J., & Prodanovic, V. (2021). Are we planning blue-green infrastructure opportunistically or strategically? Insights from Sydney, Australia. *Blue-Green Systems 3*(1), 267-280. https://doi.org/10.2166/bgs.2021.023

Lacroix, S., Kuller, M., Aubert, A., Dagenais, D., & Bichai, F. (2025). Uncovering stakeholder preferences for urban blue-green infrastructure siting: Insights from online swing weights elicitation. *Cities*, Ongoing publication.

Lacroix, S., Kuller, M., Gougeon, G., Petrucci, J., Lemieux-Chalifour, F., Rioux, A., Dagenais, D., & Bichai, F. (2024). Can we stop reinventing the wheel in blue-green infrastructure planning? Using value-focused thinking to enable transferability of a multicriteria planning support system. *Landscape and Urban Planning*, *252*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105188

Lahdelma, R., & Salminen, P. (2012). The shape of the utility or value function in stochastic multicriteria acceptability analysis. *OR Spectrum*, *34*, 785–802. https://doi.org/10.1007/s00291-011-0244-5

Langhans, S. D., & Lienert, J. (2016a). Four common simplifications of multi-criteria decision analysis do not hold for river rehabilitation. *Plos One*, *11*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0150695.

Langhans, S. D., & Lienert, J. (2016b). Four Common Simplifications of MultiCriteria Decision Analysis do not hold for River Rehabilitation. *PLoS ONE 11*(3). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150695

Langhans, S. D., Reichert, P., & Schuwirth, N. (2014). The method matters: A guide for indicator aggregation in ecological assessments. *Ecological Indicators*, *45*, 494-507. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.014

Latifia, M., Rakhshandehroo, G., Reza Nikooa, M., & Sadegh, M. (2019). A game theoretical low impact development optimization model for urban storm water management. *Journal of Cleaner Production*, *241*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118323

LeBrasseur, R. (2022). Mapping Green Infrastructure Based on Multifunctional Ecosystem Services : A Sustainable Planning Framework for Utah's Wasatch Front. *Sustainability*, *14*(2), 825. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su14020825

Leea, J. G., Selvakumar, A., Alvi, K., Riverson, J., Zhen, J. X., Shoemaker, L., & Lai, F.-h. (2012). A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling & Software*, *37*, 6-18. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.04.011

Lemieux, C., Bichai, F., & Boisjoly, G. (2023). Synergy between green stormwater infrastructure and active mobility: A comprehensive literature review. *Sustainable Cities and Society*, *99*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104900

Lerer, S. M., Arnbjerg-Nielsen, K., & Mikkelsen, P. S. (2015). A Mapping of Tools for Informing Water Sensitive Urban Design Planning Decisions—Questions, Aspects and Context Sensitivity. *Water 7*(3), 993-1012. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w7030993

Leveque, B., Burnet, J.-B., Dorner, S., & Bichai, F. (2021). Impact of climate change on the vulnerability of drinking water intakes in a northern region. *Sustainable Cities and Society*, *66*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102656

Li, L., Ban, H., Wechsler, S. P., & Xu, B. (2018). Spatial Data Uncertainty. *Comprehensive Geographic Information Systems*, *1*, 313-340. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09610-X

Lienert, J. (2019). *L6_L6_tool_Lienert_ValueFct_BisectMethod.docx*. Eawag aquatic research.

Lienert, J., Andersson, J. C. M., Hofmann, D., Pinto, F. S., & Kuller, M. (2022). The role of multi-criteria decision analysis in a transdisciplinary process: co-developing a flood forecasting system in western Africa. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *26*, 2899–2922. https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-26-2899-2022

Lienert, J., & Aubert, A. (2020). *Lecture 6 Value functions and preferences* [Power Point].

Lienert, J., Duygan, M., & Zheng, J. (2016). Preference stability over time with multiple elicitation methods to support wastewater infrastructure decision-making. *European Journal of Operational Research*, *253*, 746-760. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.010

Ligmann-Zielinska, A., & Jankowski, P. (2014a). Spatially-Explicit Integrated Uncertainty and Sensitivity Analysis of Criteria Weights in Multicriteria

Land Suitability Evaluation. *Environmental Modelling & Software*, *57*, 235-247. https://doi.org/10.1016/j

Ligmann-Zielinska, A., & Jankowski, P. (2014b). Spatially-Explicit Integrated Uncertainty and Sensitivity Analysis of Criteria Weights in Multicriteria Land Suitability Evaluation. *Environmental Modelling & Software*, *57*, 235-247. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.03.007

Ligmann-Zielinska, A., & Sun, L. (2010). Applying time-dependent variance-based global sensitivity analysis to represent the dynamics of an agent-based model of land use change. *International Journal of Geographical Information Science*, *24*(12), 1829-1850. https://doi.org/10.1080/13658816.2010.490533

Ligtermoet, E., Ramalho, C. E., Foellmer, J., & Pauli, N. (2022). Greening urban road verges highlights diverse views of multiple stakeholders on ecosystem service provision, challenges and preferred form. *Urban Forestry & Urban Greening*, *74*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127625

Lilburne, L., & Tarantola, S. (2009a). Sensitivity analysis of spatial models. *International Journal of Geographical Information Science*, *23*(2), 151-168. https://doi.org/10.1080/13658810802094995

Lilburne, L., & Tarantola, S. (2009b). Sensitivity analysis of spatial models. *International Journal of Geographical Information Science*, *23*(2), 151-168. https://doi.org/10.1080/13658810802094995

Liquete, C., Udias, A., Conte, G., Grizzetti, B., & Masi, F. (2016). Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits. *Ecosystem Services*, *22*, 392-401. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.011

Lock, O., Bain, M., & Pettit, C. (2020). Towards the collaborative development of machine learning techniques in planning support systems– a Sydney example. *Urban Analytics and City Science*, *0*(0), 1–19. https://doi.org/10.1177/2399808320939974

Lodwick, W. A., Monson, W., & Svoboda, L. (1990). Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: suitability analysis. *International journal of geographical information systems*, *4*(4), 413-428. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02693799008941556

Lu, C., Tanaka, K., & Shen, Q. (2024). Residents' Preferences on Green Infrastructure in Wuhan, China. *Sustainability*, *16*(23). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su162310303

Lucke, T., & Nichols, P. W. B. (2015). The pollution removal and stormwater reduction performance of street-side bioretention basins after ten years in operation. *Science of the Total Environment*, *536*, 784-792. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.142

Lupp, G., Zingraff-Hamed, Aude, Josh J, Huang, Oen, Amy, Pauleit, Stephan. (2021). Living labs—a concept for co-designing nature-based solutions. *Sustainability*, *13*, 188. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13010188

Luyet, V., Schlaepfer, R., Parlange, M. B., & Buttler, A. (2012). A framework to implement Stakeholder participation in environmental projects. *Journal of Environmental Management*, *111*, 213-219. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.026

Macharis, C., Springael, J., Brucker, K. D., & Verbeke, A. (2004). PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. *European Journal of Operational Research*, *153*, 307–317. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00153-X

Madénian, H., & Van Neste, S. L. (2024). *Gouvernance et planification des infrastructures vertes à Montréal: Pratiques, outils et processus existants* [Report produced as part of the PIIVO project, a social innovation project funded by the Ministry of the Economy, Innovation and Energy - Socio-ecological transition component (2022-2025)].

Madoux-Humery, A.-S., Dorner, S., Sauvé, S., Aboulfadl, K., Galarneau, M., Servais, P., & Prévost, M. (2013). Temporal variability of combined sewer overflow contaminants: Evaluation of wastewater micropollutants as tracers of fecal contamination. *Water reasearch*, 4370-4382. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.04.030

Madureira, H., & Andresen, T. (2014). Planning for multifunctional urban green infrastructures: Promises and challenges. *URBAN DESIGN International volume*, *19*, 38-49. https://doi.org/https://doi.org/10.1057/udi.2013.11

Mailhot, A., Beauregard, I., Talbot, G., Caya, D., & Biner, S. (2012). Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *International Journal of climatology*, *32*, 1151-1163. https://doi.org/10.1002/joc.2343

Malczewski, J. (2000). On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. *Transactions in GIS*, *4*(1), 5-22. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(7), 703-726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Malczewski, J., & Jankowski, P. (2020). Emerging trends and research frontier in spatial multicriteria analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, *34*(7), 1257-1282. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1712403

Mansor, M., Said, I., & Mohamad, I. (2012a). Experiential Contacts with Green Infrastructure's Diversity and Well-being of Urban Community. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *49*, 257-267.

Mansor, M., Said, I., & Mohamad, I. (2012b). Experiential Contacts with Green Infrastructure's Diversity and Well-being of Urban Community *Social and Behavioral Sciences*, *49*, 257 – 267. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.07.024

Marrel, A., Iooss, B., Jullien, M., Laurent, B., & Volkova, E. (2011). Global sensitivity analysis for models withspatially dependent outputs. *Environmetrics*, *22*, 383-397. https://doi.org/10.1002/env.1071

Martin, C., Ruperd, Y., & Legret, M. (2007). Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. *European Journal of Operational Research*, *181*, 338-349. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.019

Marttunen, M., Belton, V., & Lienert, J. (2018). Are objectives hierarchy related biases observed in practice? A meta-analysis of environmental and energy applications of Multi-Criteria Decision Analysis. *EuropeanJournal of Operational Research*, *265*, 178-194. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2017.02.038

Marttunen, M., Haaga, F., Belton, V., Mustajoki, J., & Lienert, J. (2019). Methods to inform the development of concise objectives hierarchies in multi-criteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, *277*, 604-620. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.039

Marttunen, M., Lienert, J., & Belton, V. (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research*, *263*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041

Marzouk, M., & Azab, S. (2024). Modeling climate change adaptation for sustainable coastal zones using GIS and AHP. *Environ Monit Assess*, *196*(2). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10661-023-12287-2

Matsler, A. M., Meerow, S., Mell, I. C., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2021). A 'green' chameleon: Exploring the many disciplinary definitions, goals, and forms of "green infrastructure" *Landscape and Urban Planning*, *214*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104145

Matthews, T., Lo, A., & Byrne, J. A. (2015). Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers and drivers for uptake by spatial planners. *Landscape and Urban Planning*, *138*, 155-163.

McEvoy, S., Ven, F. H. M. v. d., Santander, A. G., & H.Slinger, J. (2019). The influence of context on the use and added value of Planning Support Systems in workshops: An exploratory case study of climate adaptation planning in Guayaquil, Ecuador. *Computers, Environment and Urban Systems*, *77*. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101353

Mckay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, *21*(2), 239-245. https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1268522

McPhearson, T., Andersson, E., Elmqvist, T., & Frantzeskaki, N. (2015). Resilience of and through urban ecosystem services. *Ecosystem Services*, *12*, 152-156. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.012

MDDEFP. (2011). *Guide de gestion des eaux pluviales: Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*. Retrieved from http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm

MDDELCC. (2017). *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales*. Retrieved from http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/manuel-calcul-conception/index.htm

MDDELCC. (2018). *Plan d'action 2018-2023 de la Stratégie québécoise de l'eau 2018-2030*. http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/strategie-quebecoise

Meerow, S. (2019). A green infrastructure spatial planning model for evaluating ecosystem service tradeoffs and synergies across three coastal megacities. *Environ. Res. Lett*, *14*. https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab502c

Meerow, S. (2020). The politics of multifunctional green infrastructure planning in New York City. *Cities*, *100*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102621

Meerow, S., & Newell, J. P. (2017). Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, *159*, 62-75. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.005

Melbourne water. (2005). Chapter 3: Summary of water sensitive urban design elements. In *WSUD engineering procedures: Stormwater: Stormwater*. CSIRO PUBLISHING.

Melbourne Water Corporation. *Melbourne's Stormwater and Sewerage Systems*. http://www.stormwater.melbournewater.com.au/

MELCC. (2018). *Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec*. http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/prelevements/

MELCC. (2021a). *Gestion des eaux pluviales*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/publications-references.htm

MELCC. (2021b). *Neiges usées*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/neiges_usees/index.htm

MELCC. (2021c). *Suivi d'exploitation des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées (OMAEU)*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/Programme_Suivi_OMAE.pdf

Membele, G. M., Naidu, M., & Mutanga, O. (2024). Application of analytic network process (ANP), local and indigenous knowledge in mapping food vulnerability in an informal settlement. *Natural Hazards 120*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-023-06313-2

Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. (2020). *Servitude*. https://foncier.mern.gouv.qc.ca/Portail/citoyens/achat-vente-d-une-maison/servitude/

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2020). *Eaux souterraines*. http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/

Ministère des Transports. (2021). *Politique de mobilité durable – 2030*. https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/Pages/politique-mobilite-durable.aspx

Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2018). Stratégie québécoise de l'eau 2018-2030. https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/strategie-quebecoise/strategie2018-2030.pdf

Montginoul, M. (2006). Les eaux alternatives à l'eau du réseau d'eau potable pour les ménages : un état des lieux. *Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; IRSTEA ; CEMAGREF*, 49-62. https://doi.org/hal-00601203

Montibeller, G., & Winterfeldt, D. v. (2015). Cognitive and Motivational Biases in Decision and Risk Analysis. *Risk Analysis*, *35*(7). https://doi.org/10.1111/risa.12360

Moore, S. L., Stovin, V. R., Wall, M., & Ashley, R. M. (2012). A GIS-based methodology for selecting stormwater disconnection opportunities. *Water Sci Technol*, *66*(2), 275–283. https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.2012.172

Moreau, P., Viaud, V., Parnaudeau, V., Salmon-Monviola, J., & Durand, P. (2013). An approach for global sensitivity analysis of a complex environmental model to spatial inputs and

parameters: A case study of an agro-hydrological model. *Environmental Modelling & Software*, *47*, 74-87. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.04.006

Morris, M. D. (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, *33*, 161-174. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804

Müller, A., Österlund, H., Marsalek, J., & Viklander, M. (2020). The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of the Total Environment*, *709*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125

Mustajoki, J., Hämäläinen, R. P., & Salo, A. (2005). Decision support by interval SMART/SWING-incorporating imprecision in the SMART and SWING methods. *Decision Sciences*, *36*(2), 317-339. https://doi.org/10.1111/j.1540-5414.2005.00075.x

Muthanna, T. M. V., M., Gjesdahl, N.; Thorolfsson, S. T. . (2007). Heavy Metal Removal in Cold Climate Bioretention. *Water, Air and Soil Pollution 183 (1-4)*, 391-402.

Nastran, M., Pintar, M., Železnikar, Š., & Cvejić, R. (2022). Stakeholders' Perceptions on the Role of Urban Green Infrastructure in Providing Ecosystem Services for Human Well-Being. *Land*, *11*(2), 299. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land11020299

Nathalie Bédard, C. L. e. H. G. (2012). *Villes vertes Eau bleue: Guide d'introducation à la gestion écologique des eaux de pluie*.

Németh, B., Molnár, A., Bozóki, S., Wijaya, K., Inotai, A., Campbell, J. D., & Kaló, Z. (2019). Comparison of weighting methods used in multicriteria decision analysis frameworks in healthcare with focus on low- and middle-income countries. *Journal of Comparative Effectiveness Research*, *8 (4)*, 195-204. https://doi.org/10.2217/cer-2018-0102

New Jersey Department of Environmental Protection. (2018). *Evaluating green infrastructure: A combined sewer overflow control alternative for long term control plans*. https://www.nj.gov/dep/dwq/pdf/CSO_Guidance_Evaluating_Green_Infrastructure_A_CSO_Control_Alternative_for_LTCPs.pdf

Niemczynowicz, J. (1999). Urban hydrology and water management – present and future challenges. *Urban Water Journal*, *1*, 1-14. https://doi.org/10.1016/S1462-0758(99)00009-6

Northeast Ohio Regional Sewer District. (2012). *Green Infrastructure Plan*. https://www.neorsd.org/I_Library.php?a=download_file&LIBRARY_RECORD_ID=5526

Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, *134*, 127-138. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018

Odu, G. O. (2019). Weighting Methods for Multi-Criteria Decision Making Technique. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, *23*(8), 1449-1457. https://doi.org/ https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v23i8.7

Orta-Ortiz, M. S., & Geneletti, D. (2023). Prioritizing urban nature-based solutions to support scaling-out strategies: A case study in Las Palmas de Gran Canaria. *Environmental Impact Assessment Review*, *102*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107158

Ouranos. (2010). *S'avoir s'adapter aux changements climatiques*. Retrieved from https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RapportDesjarlais2010_FR.pdf

Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec.* . (Édition 2015). Montréal, Québec : Ouranos. 415 p. Retrieved from https://ouranos.ca/wp-content/uploads/SyntheseRapportfinal.pdf

Ouranos. (2018). *Les inondations dans un contexte de changements climatiques* Retrieved from https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/FicheAvisInondation2018-Fr.pdf

Ouranos. (2019). *La crue printanière de 2019 est-elle un avant-goût du futur ?* https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/FAQ-Inondations-2019.pdf

Paquin, S. (2009). *Le zonage municipal: un outil contribuant à créer un environnement bâti favorable aux saines habitudes alimentaires*. http://www.inspq.qc.ca.

Parks, R. F., Wigand, R. T., & Lowry, P. B. (2022). Balancing information privacy and operational utility in healthcare: proposing a privacy impact assessment (PIA) framework. *European Journal of Information Systems*. https://doi.org/10.1080/0960085X.2022.2103044

Payne, J. W., Bettman, J. R., & Schkade, D. A. (1999). Measuring Constructed Preferences: towars a Building Code. *Journal of Risk and Uncertainty*, *19*(1-3), 243-270.

Peñacoba-Antona, L., Gómez-Delgado, M., & Esteve-Núñez, A. (2021a). Multi-Criteria Evaluation and Sensitivity Analysis for the Optimal Location of Constructed Wetlands (METland) at Oceanic and Mediterranean Areas. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, *18, 5415.* https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph18105415

Peñacoba-Antona, L., Gómez-Delgado, M., & Esteve-Núñez, A. (2021b). Multi-Criteria Evaluation and Sensitivity Analysis for the Optimal Location of Constructed Wetlands (METland) at Oceanic and Mediterranean Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph18105415

Perosa, F., Seitz, L. F., Zingraff-Hamed, A., & Disse, M. (2022). Flood risk management along German rivers – A review of multi-criteria analysis methods and decision-support systems. *Environmental Science & Policy*, *135*, 191-206. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.05.004

Perpiña, C., Martínez-Llario, J. C., & Pérez-Navarro, Á. (2013). Multicriteria assessment in GIS environments for siting biomass plants. *Land Use Policy*, *31*, 326-335. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.07.014

Petrucci, J. (2025). *Intégration des impacts des infrastructures vertes et bleues sur la santé publique dans la prise de décision pour la planification urbaine et la gestion des eaux pluviales* [Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal].

Petrucci, J., Jalbert, J., Dorner, S., McQuaid, N., & Bichai, F. (2025). Strategic prioritization of sewersheds to mitigate combined sewer overflows under climate change. *Environemental Challenges*, *18*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101088

Petrucci, J., Yaagoubi, S. B., Dorner, S., Jalbert, J., & Bichai, F. (2025). Assessing the impact of green infrastructures implementation strategies on urban resilience. *[submitted]*.

Phillips, A., Schio, N. d., Canters, F., & Khan, A. Z. (2023). "A living street and not just green": Exploring public preferences and concerns regarding nature-based solution implementation in urban streetscapes. *Urban Forestry & Urban Greening*, *86*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128034

Plata-Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2012a). Proposal for the Introduction of the Spatial Perspective in the Application of Global Sensitivity Analysis. *Journal of Geographic Information System*, *4*, 503-513. https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46055

Plata-Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2012b). Proposal for the Introduction of the Spatial Perspective in the Application of Global Sensitivity Analysis *Journal of Geographic Information System*, *4*, 503-513. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2012.46055

Pöyhönen, M., & Hämäläinen, R. P. (2001). On the convergence of multiattribute weighting methods. *European Journal of Operational Research*, *129*(3), 569-585. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00467-1

Przestrzelska, K., Wartalska, K., Rosińska, W., Jurasz, J., & Kaźmierczak, B. (2024). Climate Resilient Cities: A Review of Blue-Green Solutions Worldwide. *Water Resources Management*, *38*, 5885-5910. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11269-024-03950-5

Puy, A., Becker, W., Piano, S. L., & Saltelli, A. (2022). A comprehensive comparison of total-order estimators for global sensitivity analysis. *International Journal for Uncertainty Quantification*, *12*(2), 1-18. https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.01147

Puy, A., Piano, S. L., Saltelli, A., & Levin, S. A. (2022). sensobol: an R package to compute variance-based sensitivity indices. *Journal of Statistical Software*, *102*(5). https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.10103

Qureshia, M. E., Harrison, S. R., & Wegener, M. K. (1999). Validation of multicriteria analysis models. *Agricultural Systems*, *62*(2), 105-116. https://doi.org/10.1016/S0308-521X(99)00059-1

R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. In https://www.R-project.org

Rafiquee, A., & Shabbiruddin. (2024). Optimal selection and challenges of municipal waste management system using an integrated approach: a case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 46*(1), 1996-2023. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2298285

Rahman, M. A., Rusteberg, B., Gogu, R. C., Ferreira, J. P. L., & Sauter, M. (2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection forimplementation of managed aquifer

recharge. *Journal of Environmental Management*, *99*, 61-75. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.003

Rane, N. L., Achari, A., Hashemizadeh, A., Phalak, S., Pande, C. B., Giduturi, M., Khan, M. Y. A., Tolche, A. D., Tamam, N., Abbas, M., & Yadav, K. K. (2023). Identification of sustainable urban settlement sites using interrelationship based multi-influencing factor technique and GIS. *Geocarto International 38*(1). https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2272670

Rayfield, B., Dupras, J., Francoeur, X., Dumitru, M., Dagenais, D., Vachon, J., Paquette, A., Lechowicz, M., Messier, C., & Gonzalez, A. (2015). *Les infrastructures vertes: Un outil d'adaptation aux changements climatiques pour le Grand Montréal*. davidsuzuki.org/fr/publications

Rayfield, B., Laroque, G., Daniel, C., & Gonzalez, A. (2019). *Une priorisation pour la conservation des milieux naturels des basses-terres du Saint-Laurent en fonction de leur importance pour la connectivité écologique*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/cadre-ecologique/priorisation-connectivite-basses-terres-saint-laurent.pdf

Razavi, S., & Gupta, H. V. (2019). A multi-method Generalized Global Sensitivity Matrix approach to accounting for the dynamical nature of earth and environmental systems models. *Environmental Modelling & Software*, *114*, 1-11. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.002

Refsgaard, J. C., Sluijs, J. P. v. d., Højberg, A. L., & Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, *22*(11), 1543-1556. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.02.004

Regroupement des organismes de bassin versants du Québec. (2018). *Autodiagnostic municipal en gestion durable des eaux pluviales, Guide d'accompagnement*. https://robvq.qc.ca/wp-content/uploads/2020/11/ROBVQ_Guide_accompagnement_GDEP.pdf

Reichert, P., Niederberger, K., Rey, P., Helg, U., & Haertel-Borer, S. (2019). The need for unconventional value aggregation techniques: experiences from eliciting stakeholder preferences in environmental management. *EURO Journal on Decision Processes*, *7*(3-4), 197-219. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40070-019-00101-9

Renardy, M., Joslyn, L. R., Millar, J. A., & Kirschner, D. E. (2021). To Sobol or not to Sobol? The effects of sampling schemes in systems biology applications. *Mathematical Biosciences*, *337*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mbs.2021.108593

Riabacke, M., Danielson, M., & Ekenberg, L. (2012a). State-of-the-Art Prescriptive Criteria Weight Elicitation. *Advances in Decision Sciences*. https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2012/276584

Riabacke, M., Danielson, M., & Ekenberg, L. (2012b). State-of-the-Art Prescriptive Criteria Weight Elicitation. *Advances in Decision Sciences*, 24. https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2012/276584

Rioux, A., Lacroix, S., Kuller, M., Bichai, F., & Dagenais, D. (2025). Strategic Urban Tree Planning in a Canadian metropolitan city: A Comparative Exploration of City-Planned and MCDA-Driven Approaches. *Trees, Forests and People*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5221185

Roach, T. N. F. (2020). Use and Abuse of Entropy in Biology: A Case for Caliber. *Entropy 22*(12). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/e22121335

ROBVQ. (2017). *Autodiagnostic municipal en gestion durable des eaux pluviales, 2e édition*. Retrieved from www.robvq.qc.ca/acteurs_locaux_eau_boulot

Romano, G., Sasso, P. D., Liuzzi, G. T., & Gentile, F. (2015). Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land Use Policy*, *48*, 131-143. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.013

Romanoa, G., Sasso, P. D., Liuzzi, G. T., & Gentile, F. (2015). Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land Use Policy*, *48*, 131-143. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.013

Rousseau, A. N., Mailhot, A., Slivitzky, M., Villeneuve, J.-P., Rodriguez, M. J., & Bourque, A. (2004). Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Qubec Niveau des connaissances et axes de recherche privilgier dans une perspective de changements climatiques *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, *29*(2), 121-134. https://doi.org/10.4296/cwrj121

Roy, A., Wenger, S. J., Fletcher, T. D., & Walsh, C. J. (2008). Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States. *Environmental Management*, *42*, 344-359. https://doi.org/10.1007/s00267-008-9119-1

Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, *31*, 49–73. https://doi.org/doi:10.1007/Bf00134132

Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Plavsic, J., Doong, D.-J., Bahlmann, T., Alves, A., Tseng, L.-H., Randelovic, A., Todorovic, A., Kocic, Z., Beljinac, V., Wu, M.-H., Lo, W.-C., Perez-Lapena, B., & Franca, M. J. (2021). Incorporating stakeholders' preferences into a multi-criteria framework for planning large-scale Nature-Based Solutions. *Ambio 50*, 1514-1531. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13280-020-01419-4

Russo, A., Escobedo, F. J., Cirella, G. T., & Zerbe, S. (2017). Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *242*, 53-66. https://doi.org/ http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.026

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, *15*(3), 234-281. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5

Saaty, T. L. (2005). *Theory and applications of the analytic network process decision making with benefits, opportunities, costs, and risks*. Pittsburgh, PA: RWS Publications.

Sabbaghian, R. J., & Nejadhashemi, A. P. (2020). Developing a Risk-Based Consensus-Based Decision-Support System Model for Selection of the Desirable Urban Water Strategy: Kashafroud Watershed Study. *Water*, *12*(5). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12051305

Saint-Geours, N., Lavergne, C., Bailly, J.-S., & Grelot, F. (2012). Change of Support in Spatial Variance-Based Sensitivity Analysis. *Math Geosci 44*, 945-958. https://doi.org/10.1007/s11004-012-9406-5

Şalap-Ayça, S. (2022). Self-organizing maps as a dimension reduction approach for spatial global sensitivity analysis visualization. *Transactions in GIS*, *26*, 1718–1734. https://doi.org/10.1111/tgis.12963

Şalap-Ayça, S., Jankowski, P., Clarke, K. C., & Nara, A. (2021a). Is less more? Experimenting with visual stacking of coincident maps for spatial global sensitivity analysis in urban land-use change modeling. *Environmental Modelling and Software*, *145*. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105181

Şalap-Ayça, S., Jankowski, P., Clarke, K. C., & Nara, A. (2021b). Is less more? Experimenting with visual stacking of coincident maps for spatial global sensitivity analysis in urban land-use change modeling. *Environmental Modelling & Software*, *145*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105181

Saltelli, A. (2002). Sensitivity Analysis for Importance Assessment. *Risk Analysis*, *22*(3).

Saltelli, A. (2004). Global Sensitivity Analysis: An Introduction

Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N., Li, S., & Wu, Q. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental Modelling & Software*, *114*, 29-39. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.01.012

Saltelli, A., & Annoni, P. (2010). How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*, *25*, 1508-1517. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.012

Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010a). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, *181*, 259-270. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018

Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010b). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications 181*, 259-270.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., & Campolongo, F. (2008). *Global Sensitivity Analysis* (E. T. Primer, Ed.).

Saltelli, A., Tarantola, S., & Chan, K. P.-S. (1999). A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output. *Technometrics*, *41*(1), 39-56. https://doi.org/10.1080/00401706.1999.10485594

Sanchez, T. W., Shumway, H., Gordner, T., & Lim, T. (2023). The prospects of artificial intelligence in urban planning. *International Journal of Urban Sciences*, *27*(2), 179-194. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/12265934.2022.2102538

Sarrazin, F., Pianosi, F., & Wagener, T. (2016). Global Sensitivity Analysis of environmental models: Convergence and validation. *Environmental Modelling & Software*, *79*, 135-152. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.005

Schindler, M., Dionisio, R., & Kingham, S. (2020). Challenges of Spatial Decision-Support Tools in Urban Planning: Lessons from New Zealand's Cities. *Journal of Urban Planning and Development*, *146*(2). https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000575

Scholten, L., Schuwirth, N., Reichert, P., & Lienert, J. (2015). Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis- An application to water supply infrastructure planning. *European Journal of Operational Research*, *242*(1), 243-260. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.044

Schuwirth, N., Reichert, P., & Lienert, J. (2012). Methodological aspects of multi-criteria decision analysis for policy support: A case study on pharmaceutical removal from hospital wastewater. *European Journal of Operational Research*, *220*, 472-483. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.01.055

Sehrawat, S., & Shekhar, S. (2024). Potential sites for blue-green infrastructure in Gurugram, India; a multicriteria analysis. *GeoJournal 89*(36). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10708-024-11021-w

Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., & Lars-GöranGustafsson. (2008). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology*, *350*(1-2), 100-113. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.028

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*(3), 379-423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

Sheikholeslami, R., Razavi, S., Gupta, H. V., Becker, W., & Haghnegahdar, A. (2019). Global sensitivity analysis for high-dimensional problems: How to objectively group factors and measure robustness and convergence while reducing computational cost. *Environmental Modelling & Software*, *111*, 282-299. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.002

Shojaeizadeh, A., Geza, M., & Hogue, T. S. (2021). GIP-SWMM: A new Green Infrastructure Placement Tool coupled with SWMM. *Journal of Environmental Management*, *277*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111409

Sironen, S., & Mononen, L. (2018). Spatially Referenced Decision Analysis of Long-Term Forest Management Scenarios in Southwestern Finland. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, *20*(03). https://doi.org/https://doi.org/10.1142/S1464333218500096

Skrydstrup, J., Madsen, H. M., Löwe, R., Gregersen, I. B., Pedersen, A. N., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2020). Incorporating objectives of stakeholders in strategic planning of urban water

management. *Urban Water Journal*, *17:2*, 87-99. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1748204

Sobhaninia, S., Meerow, S., Dugger, A., Hopson, T., He, C., & Wilhelmi, O. (2025). Where should the green go? A systematic literature review of methods for siting green infrastructure to mitigate rising heat and stormwater risks in cities worldwide. *Urban Forestry & Urban Greening*, *107*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128790

Sobol, I. M. (1967). On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, *7*(4), 86-112. https://doi.org/10.1016/0041-5553(67)90144-9

Sobol, I. M. (1993). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modeling and Computational Experiment*, *1*, 407–414.

Soliman, K., Sallam, O. M., & Schüth, C. (2022). Delineating MAR Sites Using GIS-MCDA for Nuweiba Alluvial Fan Aquifer, Sinai, Egypt. *Water*, *14*(3). https://doi.org/10.3390/w14030475

Star, S. L., & Griesemer, J. R. (1989). Institutional ecology,translations' and boundary objects: Amateurs and professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39. *Social studies of science*, *19*(3), 387-420.

Stefanopoulos, K., Yang, H., Gemitzi, A., & Tsagarakis, K. P. (2014). Application of the Multi-Attribute Value Theory for engaging stakeholders in groundwater protection in the Vosvozis catchment in Greece. *Science of the Total Environment*, *470-471*, 26-33. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.008

Street, R. B., Pringle, P., Lourenço, T. C., & Nicolletti, M. (2019). Transferability of decision-support tools. *Climatic Change*, *153*, 523-538. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10584-018-2263-6

Sturiale, L., Scuderi, A., & Timpanaro, G. (2022). A Multicriteria Decision-Making Approach of "Tree" Meaning in the New Urban Context. *Sustainability*, *14*(5). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su14052902

Sturiale, L., Scuderi, A., & Timpanaro, G. (2023). Citizens' perception of the role of urban nature-based solutions and green infrastructures towards climate change in Italy. *Frontiers in Environmental Science*, *11*. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1105446

Sun, X., Jakeman, A. J., Croke, B. F. W., StephenG.Roberts, & Jakeman, J. D. (2024). Assessing convergence in global sensitivity analysis: a review of methods for assessing and monitoring convergence. *Socio-Environmental Systems Modelling*, *6*(18678). https://doi.org/10.18174/sesmo.18678

Tang, Z., Zhang, H., Yi, S., & Xiao, Y. (2018). Assessment of flood susceptible areas using spatially explicit, probabilistic multi-criteria decision analysis. *Journal of Hydrology*, *558*, 144-158. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.033

Tarantola, S., & Becker, W. (2016). Simlab 4.0 for Global Sensitivity Analysis. In D. H. Roger Ghanem, Houman Owhadi (Ed.), *Handbook of Uncertainty Quantification* (pp. 1-21). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11259-6_61-1

Tarantola, S., Gatelli, D., & Mara, T. A. (2006). Random balance designs for the estimation of first order global sensitivity indices. *Reliability Engineering and System Safety, Elsevier*, *91*(6), 717-727. https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.06.003ff. ffhal-01065897

Tenerelli, P., & Carver, S. (2012). Multi-criteria, multi-objective and uncertainty analysis for agro-energy spatial modelling. *Applied Geography*, *32*, 724-736. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.013

The Prince George's County Maryland. (2007). *Bioretention Manual*. https://www.aacounty.org/departments/public-works/highways/forms-and-publications/RG_Bioretention_PG%20CO.pdf

Toronto and Region Conservation. (2009). *Review of the Science and Practice of Stormwater Infiltration in Cold Climates.* .

TRCA/CVCA. (2010). *Low Impact development stormwater management planning and design guide*. https://cvc.ca/wp-content/uploads/2014/04/LID-SWM-Guide-v1.0_2010_1_no-appendices.pdf

Triantaphyllou, E., & Baig, K. (2005). The impact of aggregating benefit and cost criteria in four MCDA methods. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *52*(2), 213-226. https://doi.org/10.1109/TEM.2005.845221

Trovato, M. R., & Cappello, C. (2022). Climate Adaptation Heuristic Planning Support System (HPSS): Green-Blue Strategies to Support the Ecological Transition of Historic Centres. *Land 11*(6), 773. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land11060773

Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *81*, 167-178. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001

U.S. Department of agriculture. *Ecosystem Services*. https://www.climatehubs.usda.gov/ecosystem-services

U.S. Environmental Protection Agency. (2014). *Greening CSO Plans: Planning and Modeling Green Infrastructure for Combined Sewer Overflow (CSO) Control*. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/greening_cso_plans.pdf

Université Laval. (2018). *Atlas de la vulnérabilité de la population québécoise aux aléas climatiques*. https://atlas-vulnerabilite.ulaval.ca/

van der Jagt, A. P. N., Smith, M., Ambrose-Oji, B., Konijnendijk, C. C., Giannico, V., Haase, D., Lafortezza, R., Nastran, M., Pintar, M., Železnikar, Š., & Cvejić, R. (2019). Co-creating urban green infrastructure connecting people and nature: A guiding framework and approach. *Journal of Environmental Management 233*, 757-767. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.083

Van Dongen, R. P., & Timmermans, H. J. P. (2019). Preference for different urban greenscape designs: A choice experiment using virtual environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, *44*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126435

Van Neste, S. L., Rochefort, M., Dagenais, D., Paquette, S., Cloutier, G., Lapointe, D., Duchesne, S., Madénian, H., Guillemard, A., Provençal, J., Fournier, C., Chéné, F., Bonneau, A., Demard, E., HoudeTremblay, E., & Poulin, E. (2021). *L'adaptation aux changements climatiques dans le réaménagement d'un secteur urbain à Montréal : documentation du processus et expérimentations en ateliers*. In (pp. 585): Montréal (Québec): Labo Climat Montréal.

Van Oorschot, J., Sprecher, B., van 't Zelfde, M., van Bodegom, P. M., & van Oudenhoven, A. P. E. (2021). Assessing urban ecosystem services in support of spatial planning in the Hague, the Netherlands. *Landscape and Urban Planning*, *214*. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104195

Vanrolleghem, P. A., Mannina, G., Cosenza, A., & Neumann, M. B. (2015). Global sensitivity analysis for urban water quality modelling: Terminology, convergence and comparison of different methods. *Journal of Hydrology*, *522*, 339-352. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.056

Vasiliev, D., & Hazlett, R. W. (2025). Envisaging nature-based solutions as designed ecosystems in the changing world. *Land Use Policy*, *150*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107438

Venter, Z. S., Barton, D. N., Martinez-Izquierdo, L., Langemeyer, J., Baro, F., & McPhearson, T. (2021). Interactive spatial planning of urban green infrastructure – Retrofitting green roofs where ecosystem services are most needed in Oslo. *Ecosystem Services*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101314

Viavattene, C., Scholes, L., Revitt, D. M., & Ellis, J. B. (2008). *A GIS based decision support system for the implementation of Stormwater Best Management PracticesGreenPlan-IT* 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh,Scotland, UK.

Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *57*, 740-752. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119

Ville de Montréal. (consulté le 16 avril 2025). *Cuvettes de rétention d'eau de ruissellement* ([Jeu de données, dans Données Québec, 2023, mis à jour le 17 février 2025]. https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vmtl-cuvettes-retention-eau-ruissellement

Ville de Trois-Rivières. (2021). *Taxes et évaluation*. https://www.v3r.net/services-au-citoyen/taxes-et-evaluation/taxes/

Voinov, A., & Bousquet, F. (2010). Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software*, *25* 1268-1281. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007

Voskamp, I. M., Luca, C. d., Polo-Ballinas, M. B., Hulsman, H., & Brolsma, R. (2021). Nature-Based Solutions Tools for Planning Urban Climate Adaptation: State of the Art. *Sustainability*, *13*(11). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13116381

Voskamp, I. M., & Ven, F. H. M. V. d. (2015). Planning support system for climate adaptation: Composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme

weather events. *Building and Environment*, *83*, 159-167. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.018

Walsh, C. J., Booth, D. B., Burns, M. J., Fletcher, T. D., Hale, R. L., Hoang, L. N., Livingston, G., Rippy, M. A., Roy, A. H., Scoggins, M., & Wallace, A. (2016). Principles for urban stormwater management to protect stream ecosystems. *Freshwater Science*, *35*(1), 398–411. https://doi.org/10.1086/685284

Wang, C., & Zhao, H. (2018). Spatial Heterogeneity Analysis: Introducing a New Form of Spatial Entropy. *Entropy*, *20*(6). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/e20060398

Wang, Y., & Zou, Z. (2010). Spatial Decision Support System for Urban Planning: Case Study of Harbin City in China. *Journal of Urban Planning and Development*, *136*(2), 147-153. https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94882010136:2147

White, I., & Alarcon, L. (2009). Planning Policy, Sustainable Drainage and Surface Water Management: A Case Study of Greater Manchester. *Built Environment*, *35*(4), 516–530. https://doi.org/10.2148/benv.35.4.516

Wilker, J., Rusche, K., & Rymsa-Fitschen, C. (2016). Improving participation in green infrastructure planning. *Plan. Pract. Res.*, *31*(3), 229-249. https://doi.org/ https://doi.org/10.1080/02697459.2016.1158065

Wu, J., Kauhanen, P., Hunt, J., & McKee, L. (2008). *Green Infrastructure Planning for the City of Sunnyvale with GreenPlan-IT*. sfei.org

Wu, T., Song, H., Wang, J., & Friedler, E. (2020). Framework, Procedure, and Tools for Comprehensive Evaluation of Sustainable Stormwater Management: A Review. *Water 12*(5), 1231. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12051231

Xu, E., & Zhang, H. (2013). Spatially-explicit sensitivity analysis for land suitability evaluation. *Applied Geography*, *45*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.08.005

Yager, R. R. (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *18*(1), 183 - 190. https://doi.org/10.1109/21.87068

Yang, W., & Zhang, J. (2021). Assessing the performance of gray and green strategies for sustainable urban drainage system development: A multi-criteria decision-making analysis. *Journal of Cleaner Production*, *293*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126191

Yavari, S., Köiv-Vainik, M., Boivin, P., Brisson, J., & Dagenais, D. (2021). *Revue de littérature sur les infrastructures vertes sur rue préparé pour ville de Montréal*.

Zhang, X.-Y., Trame, M. N., Lesko, L. J., & Schmidt, S. (2015). Sobol Sensitivity Analysis: A Tool to Guide the Development and Evaluation of Systems Pharmacology Models. *CPT Pharmacometrics Syst. Pharmacol.*, *4*, 69–79. https://doi.org/10.1002/psp4.6

Zhang, X. Y., Trame, M. N., Lesko, L. J., & Schmidt, S. (2015). Sobol Sensitivity Analysis: A Tool to Guide the Development and Evaluation of Systems Pharmacology Models. *CPT Pharmacometrics Syst. Pharmacol.*, *4*, 69–79. https://doi.org/10.1002/psp4.6

Zhao, W., Wu, Y., Chen, Y., & Ou, Y. (2022). Reliability Sensitivity Analysis by the Axis Orthogonal Importance Sampling Method Based on the Box-Muller Transformation. *Applied Sciences*, *12*(19). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app12199860

Zheng, J., Egger, C., & Lienert, J. (2016). A scenario-based MCDA framework for wastewater infrastructure planning under uncertainty. *Journal of Environmental Management*, *183*, 895-908. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.027

Zheng, J., & Lienert, J. (2018). Stakeholder interviews with two MAVT preference elicitation philosophies in a Swiss water infrastructure decision: Aggregation using SWING-weighting and disaggregation using UTA GMS. *European Journal of Operational Research*, *267*, 273-287. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.018

Zhou, C., & Wu, Y. (2020). A Planning Support Tool for Layout Integral Optimization of Urban Blue–Green Infrastructure. *Sustainability*, *12*(4). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12041613

ANNEXE A COMPLÉMENT À LA REVUE DE LITTÉRATURE

A.1 La pensée axée sur la valeur

Puisque les objectifs définis dans un processus de décision influencent directement les choix, une mauvaise identification de ceux-ci peut mener à des décisions non-optimales ou incomplètes. Adopter une démarche structurée permet d'éviter d'omettre des objectifs importants et de garantir la considération de l'ensemble des dimensions pertinentes. Toutefois, il est difficile pour les décideurs d'identifier et de formuler spontanément les objectifs qu'ils jugent essentiels. Les participants à un processus décisionnel omettraient systématiquement certains objectifs qu'ils considèrent ensuite comme fondamentaux une fois explicités (Haag, Zürcher, et al., 2019). La difficulté à dresser un ensemble complet d'objectifs peut s'expliquer par différents facteurs : (i) la tâche est cognitivement exigeante, (ii) l'identification et la structuration des objectifs nécessite du temps, (iii) la logique institutionnelle peut limiter la diversité d'objectifs et biaiser le processus de réflexion (iv) les décideurs ont tendance à adopter une approche axée sur les solutions plutôt que sur les valeurs, ce qui les pousse à se concentrer sur les solutions existantes plutôt que sur les objectifs fondamentaux qui devraient guider la prise de décision (Haag, Zürcher, et al., 2019). Ainsi, une démarche rigoureuse et encadrée est essentielle pour identifier et structurer adéquatement les objectifs et garantir des décisions alignées avec des valeurs clairement établies.

Les décisions sont généralement centrées sur le choix entre différentes solutions (Keeney, 1996). Cette approche est appelée *la pensée axée sur les solutions* (en anglais *alternative focused thinking*-AFT). Cependant, l'AFT limite la pensée, car elle est (i) réactive plutôt que proactive, (ii) elle adopte une approche rétroactive en prenant en compte les valeurs (c. -à-d. ce que les parties prenantes valorisent) uniquement après avoir déterminé les solutions, et (iii) elle repose sur le principe que les solutions ne sont que des moyens pour atteindre les valeurs. *La pensée axée sur les valeurs* (en anglais, *value focused thinking*-VFT) permet de générer de meilleures solutions pour un problème décisionnel (Keeney, 1996). Cette approche suggère de formuler un problème décisionnel en se basant sur les objectifs fondamentaux des parties prenantes (Keeney, 1996). Dans cette deuxième approche, les valeurs représentent les objectifs et les critères d'évaluation des solutions. La VFT se distingue de l'AFT par le fait que les valeurs sont rendues explicites dès le début du processus de prise décisionnelle et que les solutions sont générées à partir de ces valeurs.

Elle peut conduire à de meilleures décisions, car elle apporte une réflexion approfondie en amont de la décision et permet d'identifier des solutions plus adaptées à une situation. La VFT fournit une base conceptuelle solide pour aligner la décision avec les valeurs des parties prenantes d'une manière transparente.

A.2 Analyse des parties prenantes

Tableau A.2.1 Exemples de parties prenantes (PP) pertinentes relevées dans des cas d'étude en contexte de décisions environnementales

Type d'étude				Planification et évaluation spatiale				
Référence				Meerow (2019)	Billaud et al. (2020)	Goodspeed et al. (2022)	Sturiale et al. (2022)	LeBrasseur (2022)
Objectif de l'étude				Identifier les zones stratégiques pour les IVB.	Trouver des zones propices au développement urbain en préservant les espaces verts et leurs SE associés.	Identifier les zones propices aux IVB grâce à une analyse spatiale multicritère.	Planifier l'écologie urbaine via un outil d'aide à la décision des PP.	Classer divers paysages producteurs de SE et synthétiser les résultats dans un cadre de planification spatiale des IVB.
Lieu				New York et Los Angeles, États-Unis et Manila, Philippines	Thau, Occitanie	Detroit, Michigan, États-Unis	Catane, Italie	Salt Lake City, Utah, États-Unis
Méthode d'inclusion des PP				Consultations	Atelier participatif	Consultation	Questionnaire et groupes de discussion	Consultations
Nombre de PP				53	17 à 30	Inconnu	250	40
Type de PP	**Service public**	**Administration**	**Municipal**			**x**		**x**
			Régional			**x**		**x**
			Fédéral			**x**		**x**
		Environnement		**x**	**x** • Directions locales ou régionales de l'environnement			
		Parcs				**x**		
		Routes						
		Eau						
		Génie						
	Industrie et privé	**Génie**					**x** • Entreprises tertiaires	
		Trafic						
		Planification urbaine						
		Économique						
		Eau						
		Environnement						
		IVB						
	Organisme non gouvernemental				**x** • Agence de l'eau • Propriété forestière • Sciences de l'environnement • Conservatoire régionaux d'espaces naturels et de botanique national • Chasse et pêche • Protection de l'environnement ou naturalistes	**x** • Forêts • Développement urbain	**x**	**x**
	Chercheur et expert			**x**	**x** • Spécialistes en écologie et/ou en sciences de l'environnement		**x** • Groupes de scientifiques	**x** • Qualité de l'eau • Production agricole • Habitats des mammifères • Division de l'eau, département ressources naturelles • Pêche et faune
	Groupe communautaire						**X** • Association citoyenne • Retraités • Association culturelle • Salles de jeux • Syndicats	**x**

Tableau A.2.1 Exemples de parties prenantes (PP) pertinentes relevées dans des cas d'étude en contexte de décisions environnementales (suite)

Type d'étude				Classification et choix du type de système			Perception de PP sur la gestion de l'eau, les espaces verts et les services écosystémiques (SE)	
Référence				Jayasooriya et al. (2019)	Latifia et al. (2019)	Sabbaghian & Nejadhashemi (2020)	Wagner et al. (2019)	Nastran et al. (2022)
Objectif de l'étude				Obtenir les préférences des PP (poids) dans la prise de décision du choix de l'IVB de gestion des eaux pluviales la plus adaptée à une zone industrielle.	Optimiser les pratiques de développement à faible impact (LID) pour la gestion des eaux pluviales urbaines via un nouveau cadre.	Choisir la stratégie de l'eau la plus souhaitable par un modèle de système d'aide à la décision de groupe basé sur le consensus.	Identifier les perceptions des espaces par les différentes PP dans les processus de planification au sein de zones urbaines, via une analyse des SE.	Évaluer la perception des liens entre les SE et IVB urbaine, et leur impact sur le bien-être humain.
Lieu				Melbourne, Australie	Tehran, Iran	Kashafroud, Iran	Mannheim, Heidelberg et Weinheim, Allemagne	Ljubljana, Slovénie
Méthode d'inclusion des PP				Questionnaires Delphi	Entrevues	Entrevues individuelles, réunions d'ateliers collaboratifs et de questionnaires	Enquêtes sur les ménages et entrevues	Événements, ateliers, consultations, groupes de discussion
Nombre de PP				10 à 15	4	6	28 PP et 391 résidents	21
Type de PP	**Service public**	**Administration**	**Municipal**	**x**	**x**		**x** • Politiciens • Conseil municipal	**x**
			Régional		**x**	**x** • Autorité régionale gestion de l'eau	**x** • Conseil régional	
			Fédéral			**x** • Organisation agricole de l'état • Compagnie régionale des eaux de l'état • Agence nationale de protection de l'environnement		
		Environnement			**x** • Département protection environnement			
		Parcs						
		Routes						
		Eau		**x** • Planificateur d'approvisionnement stratégique				
		Génie		**x** • Ingénieur en ressources en eau				
	Industrie et privé	**Génie**		**x** • Chef de projet				
		Trafic						
		Planification urbaine						
		Économique						**x** • Secteur des affaires
		Eau		**x** • Planificateur d'approvisionnement stratégique, Analyste principal des ressources en eau	**x** • Compagnie des eaux et eaux usées	**x** • Compagnie des eaux et eaux usées urbaines • Entreprise d'État de la commune industrielle • Utilisateurs		
		Environnement						
		IVB						
		Organisme non gouvernemental						**x**
		Chercheur et expert		**x**				**x** • Organisations de recherche
		Groupe communautaire					**x** • Résidents	**x** • Jeunes et étudiants

Tableau A.2.1 Exemples de parties prenantes (PP) pertinentes relevées dans des cas d'étude en contexte de décisions environnementales (suite)

Type d'étude				Perception de PP sur la gestion de l'eau, les espaces verts et les SE.	Exemples de parties prenantes pertinentes relevées dans des cas d'étude en contexte de décisions environnementales		
Référence				Kennedy (2011)	Bellamy et al., (2017)	van der Jagt et al. (2019)	Skrydstrup et al. (2020)
Objectif de l'étude				Recueillir les réflexions de parties prenantes pour la mise en œuvre de systèmes de drainage urbain durable	Identifier des possibilités d'activités d'engagement des citoyens afin d'encourager l'intérêt pour le jardinage sauvage dans le cadre d'un "engagement en faveur des pollinisateurs".	Développer une approche pour encourager la participation des PP dans la mise en place d'IV	Étudier les parties prenantes et leurs objectifs pour la gestion des eaux urbaines par le biais d'ateliers et d'une analyse documentaire de journaux professionnels et de conférences.
Lieu				Sheffield, Angleterre	Edinburgh, Écosse	Ljubljana, Slovénie	Odense, Danemark
Méthode d'inclusion des PP				Entretiens face-à-face	Inconnu	Discussions de groupe et ateliers	Ateliers
Nombre de PP				9	Inconnu	Inconnu	18
Type de PP	**Service public**	**Administration**	**Municipal**				
			Régional				
			Fédéral				
		Environnement				**x** • Service municipal chargé de la protection de l'environnement	**x** • Protection de l'environnement • Changements climatiques
		Urbanisme			**x** • Urbanistes municipaux	**x** • Département de l'urbanisme	**x** • Architectes et urbanistes
		Parcs		**x** • Autorité locale des parcs-équipe de développement			
		Routes		**x**			
		Eau		**x**			**x** • Qualité de l'eau • Eau souterraine
		Génie					
	Industrie et privé	**Génie**				**x** • Construction	
		Trafic					**x**
		Planification urbaine		**x** • Développeur de logements • Partenaires pour le renouvellement des infrastructures			**x**
		Économique					**x** • Analyses économiques pour l'aide à la décision
		Eau		**x** • Société d'assainissement			
		Environnement				**x** • Secteur de la gestion des forêts urbaines	**x** • Consultants: solutions basées sur la nature, adaptation aux changements climatiques, services écosystémiques
		IVB					**x** • Conception et construction
	Organisme non gouvernemental			**x**	**x** • Espaces verts • Pollinisateurs • Planification des IV urbaines • Engagement du public	**x** • Travail des jeunes • Jardinage urbain	
	Chercheur et expert				**x** • Organismes de recherche	**x**	
	Groupe communautaire			**x** • Communauté locale		**x** • Jeunes et étudiants • Communauté locale	

A.3 Résumé des types d'analyses d'incertitude et de sensibilité

Tableau A.3.1 Résumé de l'analyse d'incertitude et de sensibilité et les types

	Analyse d'incertitude (AI)	**Analyse de sensibilité (AS)**	
Description	***Approche prospective :*** Quantifier la variabilité des sorties du modèle en fonction des incertitudes des paramètres d'entrée en propageant l'incertitude à travers le modèle (Feizizadeh et al., 2014a; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Malczewski & Jankowski, 2020; Scholten et al., 2015)	***Approche rétrospective:*** Étudier comment les incertitudes des sorties du modèle peuvent être attribuées, de manière qualitative et quantitative, à différentes sources d'incertitudes des paramètres d'entrée et donc déterminer dans quelle mesure chaque incertitude des paramètres d'entrée contribue aux incertitudes des résultats (Feizizadeh et al., 2014a; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Malczewski & Jankowski, 2020; Saltelli, 2002; Saltelli et al., 2019; Scholten et al., 2015)	
		Analyse locale (ASL)	**Analyse globale (ASG)**
		● Comment les sorties varient avec des changements mineurs d'un seul paramètre d'entrée, tandis que tous les autres restent fixes? (de Brito et al., 2019b; Saltelli et al., 2019) ● Utilise une linéarisation du modèle à un point prédéfini dans l'espace des paramètres (Scholten et al., 2015) ● Destinée aux modèles déterministes (Saltelli et al., 2019)	● Comment les variations des sorties sont attribuées à de multiples sources d'incertitude et aux relations entre les paramètres dans l'ensemble de l'espace des entrées? (de Brito et al., 2019b) ● Tous les paramètres d'entrée sont variés simultanément, dans une analyse multidimensionnelle (Lilburne & Tarantola, 2009b) ● Fondée sur la définition d'une fonction de densité de probabilité (PDF) pour chaque paramètre d'entrée du modèle, à partir de laquelle un échantillon est extrait (Plata-Rocha et al., 2012b)
Exemples de méthodes	Exécuter le modèle de manière répétée en utilisant différentes valeurs d'entrée dans une plage plausible (Saltelli et al., 2019): ● Simulations Monte Carlo (SMC) ou approche ad hoc générant une distribution des résultats possibles du modèle ● Obtenir une distribution des sorties. ● Extraire des statistiques descriptives sur le modèle (écart-type, moyenne, minimum, maximum, etc.).	Approche un-à-la-fois (*One-At-A-Time, OAT*) (Daniel, 1958)	● *Moris elementary effects approach* (Morris, 1991) ● *Moment-independent methods* (Da Veiga & Martins, 2015) ● Décomposition de la variance (Saltelli et al., 2010b), basée sur Sobol' (Sobol, 1967) ● *Variogram-based approaches* (Razavi & Gupta, 2019) ● Extended FAST technique (Crosetto & Tarantola, 2001)
Résultats possibles	Fournir des statistiques descriptives et des intervalles de confiance pour les résultats (écart type, moyenne, minimum, maximum, etc.).	● Identifier le paramètre contribuant à la variabilité des sorties du modèle. ● Identifier une valeur seuil du paramètre où les sorties du modèle ne sont pas affectées.	● Priorisation des paramètres: Identifier les entrées les plus responsables de la variabilité et ayant le plus d'influence (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Saltelli et al., 2019) ● Fixation des paramètres: Identifier les entrées contribuant très peu à la variabilité et qui peuvent potentiellement être fixées (Saltelli et al., 2019) ● Qualité du modèle : Identifier une forte dépendance entre le résultat et une entrée (ex. : découvrir une caractéristique inattendue du modèle ou révéler une erreur conceptuelle ou de codage) (Saltelli et al., 2019)

Tableau A.3.1 Résumé de l'analyse d'incertitude et de sensibilité et les types (suite)

	Analyse d'incertitude (AI)	Analyse de sensibilité (AS)	
		Analyse locale (ASL)	**Analyse globale (ASG)**
Bénéfices	+ Permet de visualiser la distribution spatiale de la surface d'incertitude et les régions critiques (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b) + Fournie de l'information sur la stabilité des résultats, offrant la possibilité de mesurer le niveau de confiance dans la prise de décision et chez le décideur (Feizizadeh et al., 2014a)	+ Moins exigeant sur le plan computationnel (autour d'un point spécifique) (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). + Intuitif à interpréter : en modifiant un seul paramètre, le changement observé dans les résultats du modèle provient uniquement de ce paramètre (Saltelli et al., 2019). + Simplicité : ne nécessite pas de connaissances approfondies sur l'AS (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). + Bien adapté aux modèles dont le comportement est supposé relativement linéaire. + Convient aux modèles où l'intérêt porte sur le comportement local, comme l'identification d'un seuil critique (Lilburne & Tarantola, 2009b). + Favorise l'exploration : idéal pour une exploration visuelle des analyses spatiales, car l'utilisateur peut interagir avec les paramètres et observer les résultats en temps réel. L'ASL est souvent réalisée en mode interactif (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b).	+ Partitionne la variabilité des sorties du modèle et répartit les fractions entre les entrées afin d'obtenir des mesures quantitatives de l'influence des entrées sur l'incertitude des sorties (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). + Permet une étude exhaustive de toute la gamme de possibilités des entrées (Gómez-Delgado & Tarantola, 2006b; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b) et est donc moins sensible au choix de scénarios initiaux. + Explore les incertitudes de manière multidimensionnelle, permettant de capturer les interactions potentielles entre les entrées et les comportements non-linéaires et non additifs (Gómez-Delgado & Tarantola, 2006b; Saltelli et al., 2019). Pour l'AS spatiale, capturer ces interactions est crucial, car les entrées dans des problèmes spatialement hétérogènes peuvent être auto-corrélées. + Aide à identifier les entrées critiques qui influencent de manière disproportionnée l'incertitude du modèle, ce qui guide le développement du modèle et la priorisation des entrées (Saltelli et al., 2008). + Facilite la production de résultats graphiques et probabilistes, car les simulations Monte Carlo génèrent facilement des graphiques montrant la probabilité de divers résultats (Saltelli et al., 2010b).

Tableau A.3.1 Résumé de l'analyse d'incertitude et de sensibilité et les types (suite)

	Analyse d'incertitude (AI)	Analyse de sensibilité (AS)	
		Analyse locale (ASL)	**Analyse globale (ASG)**
Limites	- A une utilité limitée si l'on cherche à déterminer l'impact des paramètres individuels sur l'incertitude des sorties du modèle. - Ne fournit pas d'information sur l'ampleur de l'influence des paramètres individuels (Saltelli, 2002)	- Les modifications sont effectuées en des points spécifiques choisis dans une zone restreinte de l'espace des entrées (approche déterministe) et le choix de ces points influence les résultats (Lilburne & Tarantola, 2009b). - Ce type d'AS a tendance à être ad hoc et peut produire des résultats qui ne sont pas nécessairement fiables ou valables (Lilburne & Tarantola, 2009b). - Ne permet pas d'explorer efficacement un espace multidimensionnel (Saltelli et al., 2019). - Ne prend pas en compte les interactions potentielles entre les entrées du modèle ni les informations quantitatives sur la contribution combinée d'une entrée avec une autre entrée à la variabilité totale de la sortie (particulièrement désavantageux pour les problèmes spatiaux hétérogènes car les entrées peuvent être auto-corrélées) (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). - Mesure valide de la sensibilité uniquement pour les modèles linéaires (Saltelli et al., 2019).	- Coût informatique élevé. - Plus difficile à interpréter, nécessite une base en statistiques pour sa mise en œuvre et pour interpréter les résultats (Saltelli et al., 2019). - Hypothèses subjectives sur les distributions de probabilité des entrées et biais en faveur de la normalité des distributions.

A.4 Décomposition de la variance

L'**indice S** indique dans quelle mesure un paramètre d'entrée pourrait réduire en moyenne la variance des résultats si ce facteur était fixé, ce qui en fait une mesure de l'effet principal d'un paramètre d'entrée (Saltelli et al., 2008). Les paramètres d'entrée recevant les valeurs d'indice S les plus élevées ont le plus grand impact sur la variabilité des sorties. Il n'y a pas de seuil établi pour les valeurs de l'indice S, mais l'importance d'un paramètre peut être jugée en fonction de la magnitude relative après analyse (Feizizadeh & Kienberger, 2017; Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b). En contexte spatial, la contribution d'un paramètre donné à la variance des résultats est calculée pour un pixel donné, avec l'équation suivante :

$$S_i = \frac{Var_i}{Var(Y)} = \frac{Var_{Xi}[E_{x-i}(Y|X_i)]}{\sum_i Var_i + \sum_i \sum_{j>i} Var_{ij} + \cdots + Var_{12\ldots k}} \qquad \text{Si } \in [0;\ 1] \qquad (2.6)$$

Où x_i est le i[ème] paramètre d'entrée (jusqu'à k paramètres), Y est le résultat du modèle (un nombre scalaire), Var_i est la variance de l'espérance (moyenne) conditionnelle de Y pour une valeur fixée de x_i d'un paramètre donné, $Var(Y)$ est la variance totale des résultats Y (Feizizadeh et al., 2014b). La somme des indices S_i devrait toujours être inférieure à 1 si le modèle est additif (Puy, Becker, et al., 2022; Saint-Geours et al., 2012).

L'**indice ST** regroupe toutes les interactions impliquant un paramètre donné en un seul terme. Par exemple, il donne des indications sur la contribution totale d'un premier paramètre d'entrée à la variance du modèle qui résulte des interactions avec tous les autres paramètres du modèle (Şalap-Ayça et al., 2021a). L'indice de sensibilité des effets totaux peut être utilisé pour identifier les paramètres non importants qui pourraient être fixés et réduire la complexité d'un modèle (Feizizadeh & Kienberger, 2017). Il n'existe pas non plus de seuil défini pour l'indice ST pour juger de son importance, mais un seuil de 0,05 est souvent suggéré (X.-Y. Zhang et al., 2015). Un exemple du calcul de l'indice ST pour trois paramètres d'entrée est donné par les équations suivantes (Puy, Becker, et al., 2022):

$$S_{T1} = S_1 + S_{1,2} + S_{1,3} + S_{1,2,3} \qquad (2.7)$$

Le coût informatique des méthodes de décomposition de la variance peut devenir limitant avec des modèles nécessitant plusieurs calculs (Saltelli et al., 2008). Toutefois, les indices de sensibilité S et ST sont simples à interpréter (Puy, Becker, et al., 2022) et sont des mesures puissantes et

polyvalentes d'AS (Saltelli et al., 2010b). La visualisation des indices en cartes de sensibilité aide à représenter la configuration spatiale de la sensibilité des paramètres d'entrée influents (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b).

L'extension des simulations de SMC à l'approche de Sobol constitue la meilleure procédure disponible pour calculer les indices en se basant uniquement sur les évaluations du modèle (Saltelli et al., 2008). Il existe plusieurs estimateurs dans la littérature pour simplifier le calcul des équations (A.1) et (A.2). Sans ces techniques, le temps de calcul informatique des indices de sensibilité serait extrêmement coûteux (Lilburne & Tarantola, 2009b). Une revue des différentes équations développées pour calculer ces indices peut être consultée dans Saltelli et al. (2010a).

Selon les meilleures pratiques en AS, l'estimateur de Saltelli et al. (2008) pour l'indice de sensibilité de premier ordre S et celui de Jansen (1999) pour l'indice de sensibilité des effets totaux ST, sont recommandés pour calculer les indices de Sobol. Ces estimateurs utilisent des combinaisons de matrices d'échantillons des paramètres d'entrée.

Deux matrices A et B sont construites par des séquences quasi-aléatoires de Sobol où chaque ligne est un point d'échantillon et chaque colonne un paramètre d'entrée différent. Les indices sont calculés en utilisant différentes combinaisons des matrices A, B et AB, où AB représente une matrice formée de toutes les colonnes de la matrice A(B) à l'exception de la ième colonne qui provient de B(A) (Puy, Piano, et al., 2022). Voici un exemple de la construction des matrices A, B et AB :

$$A = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.500 & 0.50 \\ 0.750 & 0.250 & 0.750 \\ 0.250 & 0.750 & 0.250 \\ 0.375 & 0.375 & 0.625 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.500 & 0.500 \\ 0.250 & 0.750 & 0.250 \\ 0.750 & 0.250 & 0.750 \\ 0.125 & 0.875 & 0.875 \end{bmatrix} \quad AB = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.500 & 0.500 \\ 0.750 & 0.250 & 0.750 \\ 0.250 & 0.750 & 0.250 \\ 0.375 & 0.375 & 0.625 \\ 0.500 & 0.500 & 0.500 \\ 0.250 & 0.750 & 0.250 \\ 0.750 & 0.250 & 0.750 \\ 0.125 & 0.875 & 0.875 \\ 0.500 & 0.500 & 0.500 \\ 0.250 & 0.250 & 0.750 \\ 0.750 & 0.750 & 0.250 \\ 0.125 & 0.375 & 0.625 \\ 0.500 & 0.500 & 0.500 \\ 0.750 & 0.750 & 0.750 \\ 0.250 & 0.250 & 0.250 \\ 0.375 & 0.875 & 0.625 \\ 0.500 & 0.500 & 0.500 \\ 0.750 & 0.250 & 0.250 \\ 0.250 & 0.750 & 0.750 \\ 0.375 & 0.375 & 0.875 \end{bmatrix}$$

L'estimateur de Saltelli et al. (2008) est donné par l'équation (9) :

$$\frac{\frac{1}{N}\sum_{v=1}^{N} f(B)_v \left[f\left(A_B^{(i)}\right)_v - f(A)_v \right]}{V(y)} \qquad (A.1)$$

L'estimateur de Jansen (1999) est donné par l'équation (10):

$$\frac{\frac{1}{2N}\sum_{v=1}^{N} \left[f(A)_v - f\left(A_B^{(i)}\right)_v \right]^2}{V(y)} \qquad (A.2)$$

Où v est l'indexation des lignes des matrices de 1 à N et i l'indexation des colonnes des matrices de 1 à k. Le nombre de simulations nécessaires avec ces estimateurs est de N(k+2).

A.5 Caractéristiques des études en ADMC ayant variées la courbure des fonctions de valeurs (c) et du paramètre d'agrégation (γ)

Tableau A.5.1 Études ADMC ayant réalisé des analyses d'incertitude (AI) et de sensibilité (AS) sur la variation de courbure des fonctions de valeurs (c) et du paramètre d'agrégation (γ)

Référence	Type d'analyse	Paramètres d'entrée variés	Méthode d'AS	Paramètres de l'AS
(Lahdelma & Salminen, 2012)	AS:Globale	• Courbures des fonctions de valeurs	Simulations Monte Carlo	• Courbure(c): 11 niveaux, c ∈ [−8,−4,−2,−1,−0.5,0,0.5,1,2,4,8]
(Scholten et al., 2015)	•AS:Globale • AI	• Poids des critères • Courbures des fonctions de valeurs et d'utilité • Paramètre d'agrégation	Décomposition de la variance : e-FAST (*Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test*)	• Courbure (c): Distribution uniforme [0, 10] si concave Distribution uniforme [−10, 0] si convexe Distribution uniforme [−0.4, 0.4] si approximativement linéaire • Additivité (γ): Distribution uniforme [0, 1]
(Bertsch & Fichtner, 2016)	AS:Globale	• Poids des critères • Courbures des fonctions de valeurs et d'utilité	Simulations Monte Carlo en utilisant l'outil SIMADA où les paramètres d'entrée sont variés dans des intervalles avec un seuil supérieur et inférieur.	• Courbure (c): Distribution uniforme [-10, -0.5] (puisque les préférences sont décroissantes)
(Haag et al., 2022b)	•AS:Locale • AI	• Poids des critères • Courbures des fonctions de valeurs et d'utilité • Paramètre d'agrégation	Fonctionnalité de curseur permettant de jouer avec un paramètre d'entrée.	• Courbure (c): [-5, 5] • Additivité (γ): [0, 1]

A.6 Échantillonnage radial de Sobol

La Figure A.6.1 présente un exemple d'un échantillonnage basé sur Sobol à deux et trois dimensions. Pour initier la séquence, un ensemble de points doit être spécifié (par exemple, en utilisant un générateur de séquences de Sobol). Concernant la taille de l'échantillon, il n'existe pas de consensus général sur un nombre optimal, celui-ci dépend de la complexité du modèle et du nombre de paramètres d'entrée analysés (X.-Y. Zhang et al., 2015).

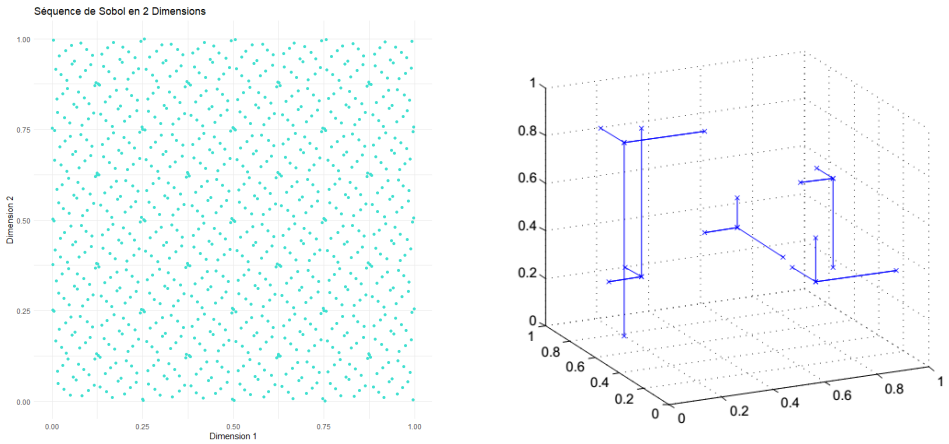


Figure A.6.1 Exemple d'un échantillon quasi-aléatoire de Sobol basé sur un échantillonnage radial dans un espace d'entrées de deux dimensions [gauche] et de trois dimensions (Tarantola & Becker, 2016) [droite]

A.7 Visualisation des incertitudes dans les modèles spatiaux

La visualisation de la sensibilité et des incertitudes dans les modèles spatiaux est encore peu étudiée (Şalap-Ayça et al., 2021a) et reste souvent réalisée de manière ad hoc (Kinkeldey et al., 2014). Le choix d'une méthode de visualisation des incertitudes appropriée peut empêcher les utilisateurs de percevoir l'aspect visuel des incertitudes comme un obstacle (Kinkeldey et al., 2014). La méthode la plus couramment utilisée pour visualiser les incertitudes spatiales consiste à placer des cartes adjacentes côte à côte. Cette approche peut être efficace pour un petit nombre de paramètres, mais elle devient rapidement exigeante sur le plan cognitif lorsque le nombre de paramètres augmente (Şalap-Ayça et al., 2021a). L'AS spatiale génère de nombreuses cartes, ce qui peut compliquer leur visualisation et leur interprétation (Şalap-Ayça et al., 2021). Avec k paramètres, l'ASG produit $2k$ cartes d'indices de sensibilité à analyser (Şalap-Ayça et al., 2021a). Pour gérer cette forte dimensionnalité visuelle, notamment pour les ensembles de données matricielles, une technique adaptée est nécessaire.

Kinkeldey et al. (2014) ont étudié les moyens d'évaluer la communication visuelle des incertitudes en passant en revue les techniques de visualisation des incertitudes géospatiales. Ils ont identifié trois catégories dichotomiques de visualisation des incertitudes: (i) intrinsèque vs extrinsèque, (ii) coïncidente vs adjacente, et (iii) statique vs dynamique. La Figure A.7.1 montre un exemple de cartes adjacentes et d'une carte de dominance. Une visualisation intrinsèque modifie la symbologie

existante (par exemple, valeur de couleur, transparence, etc.) pour représenter les incertitudes, plutôt que d'ajouter de nouveaux objets (comme des glyphes, des barres d'erreur, etc.), comme c'est le cas pour une visualisation extrinsèque. Les techniques intrinsèques sont l'approche la plus courante (Kinkeldey et al., 2014). Une vue coïncidente correspond à une visualisation intégrée, contrairement à une visualisation séparée, comme avec des cartes adjacentes. La majorité des études examinées utilisent des techniques coïncidentes (Kinkeldey et al., 2014). Une carte statistique représente la méthode classique, en opposition à une vue dynamique qui intègre des contrôles interactifs. Cependant, il n'existe pas de consensus sur la méthodologie optimale pour la visualisation des incertitudes (Kinkeldey et al., 2014).

L'utilisation d'une carte coïncidente dans une représentation en couche unique, avec une seule valeur attribuée à chaque emplacement sur la carte (c.-à-dire, chaque pixel de la carte), offre une flexibilité pour superposer les résultats de l'AS spatiale (Şalap-Ayça et al., 2021a). Cette approche consiste à calculer les indices de sensibilité S et ST pour chaque pixel de la carte, pour chaque paramètre. La création de cartes des paramètres dominants consiste à identifier, pour chaque pixel, la valeur maximale des indices S et ST parmi toutes les cartes de sensibilité (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; Şalap-Ayça et al., 2021a). Un code de couleur permet de représenter la variabilité des valeurs dans les pixels de la carte. Cependant, cette approche présente des limites lorsque plusieurs indices ont des valeurs approximativement égales, ce qui suggère la nécessité d'une méthode plus sophistiquée (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b).

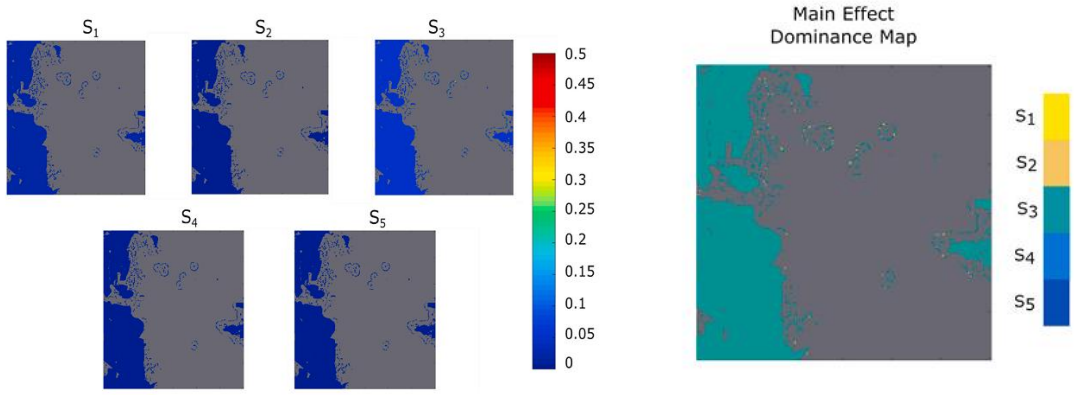


Figure A.7.1 Exemple d'une représentation des indices de sensibilité par des cartes adjacentes de cinq paramètres d'entrée [gauche] (Şalap-Ayça et al., 2021a) et d'une représentation par une carte coïncidente ou une carte de dominance [droite] (Şalap-Ayça et al., 2021a)

Malgré l'avantage considérable de produire une seule carte, il reste nécessaire de développer une conception plus efficace pour une représentation coïncidente, qui soit plus facile à comprendre pour les utilisateurs novices (Şalap-Ayça et al., 2021a). Les améliorations devraient viser à simplifier la représentation visuelle et à rendre les cartes d'analyse de sensibilité interactives. L'utilisation d'une stratégie de regroupement (par exemple, Huo et al. (2019); Sheikholeslami et al. (2019)) pourrait être une piste à explorer pour traiter le classement relatif des indices de sensibilité (Şalap-Ayça et al., 2021a). Sheikholeslami et al. (2019) ont proposé une méthode de regroupement basée sur les indices de sensibilité, permettant de classer les paramètres par groupes d'importance plutôt qu'individuellement. Cette méthode combine une transformation Box-Cox (Box & Cox, 1964) pour normaliser les indices de sensibilité et un regroupement hiérarchique agglomératif (Johnson, 1967) pour former des groupes d'importance selon les similitudes entre les indices : forte importance (Groupe 1), importance moyenne (Groupe 2), faible importance (Groupe 3), et sans importance (Groupe 4). Huo et al. (2019) ont utilisé l'approche de Sheikholeslami et al. (2019), qui devrait également permettre une réduction significative des coûts de calcul (Huo et al., 2019). Cependant, leurs résultats ne sont pas spatialement explicites et ne sont présentés que sous forme de diagrammes en barres pour illustrer les groupes d'importance des indices de sensibilité.

ANNEXE B COMPLÉMENT À LA MÉTHODOLOGIE DE L'OBJECTIF 1

B.1 Phase d'ateliers 1 : Co-création et validation des hiérarchies d'objectifs

L'organisation des ateliers 1.a et 1.b a été basée sur les travaux de (Haag, Zürcher, et al., 2019), puis adaptée aux besoins spécifiques du contexte du projet de recherche afin d'y intégrer les principes de l'innovation ouverte. La Figure B.1.1 présente le déroulement de la phase 1 d'ateliers avec les tâches de l'équipe de recherche et des participants.

	Tâche de l'équipe de recherche	Tâche du participant	Illustration
Accueil et mot d'introduction	• Attribution d'un numéro d'identification à chaque participant (processus d'anonymisation). Chaque participant reçoit deux feuilles de couleurs avec son numéro, une feuille orange et une feuille bleue. • Rappel de l'objectif du projet PIIVO • Rappel du fonctionnement de l'OAP SSANTO • Explications de l'objectif de l'atelier et des activités • Explication du processus d'élaboration des hiérarchies d'objectifs (par exemple, de la sélection des critères de décision) • Explications de l'intégration de l'innovation ouverte dans le processus (objectifs de l'IO)	• Complétion des formulaires de consentement (nom, rôle professionnel, employeur, signature) pour les participants ne l'ayant pas déjà fait par courriel préalablement.	
Activité brise-glace	• Division du groupe de participants en quatre sous-groupes de cinq personnes. Distribution d'un document par participant avec une photo d'une IVB (biorétentions et jardins de pluie, arbre, toit vert, marais artificiel, noue, étangs et lacs ou systèmes d'infiltration)	• Chaque participant, individuellement, définit trois fonctions d'un espace vert, autres que l'usage courant pour lequel il est prévu. À tour de rôle (deux tours), les participants donnent une fonction de l'espace vert qui lui a été attribué.	
Exercice 1 | Activité de divergence : Les idées catapultées	• Explications des consignes sur la formulation d'un objectif (avec un exemple). • On fait défiler à l'écran un diaporama de photos des 8 types d'IV pour que les participants les aient en tête pendant qu'ils réfléchissent aux objectifs	1) Individuellement, chaque participant, liste tous les objectifs de planification spatiale des IVB auquel il pense. D'abord, les objectifs liés à la maximisation de l'implantation des IVB aux endroits où on trouve les meilleures opportunités sur sa feuille orange (pour la perspective des *opportunités*). Puis, les objectifs visant à répondre aux besoins d'un territoire par l'implantation des IVB sur sa feuille bleue (pour la perspective des *besoins*). Dix minutes sont allouées. 2) Une fois le temps écoulé, les participants chiffonnent leur feuille *bleue* et leur feuille *orange* en boules. Les participants lancent leurs boules de papier au signal « Catapulte! ». 3) Chaque participant ramasse une boule de papier *orange* et *bleue*. 4) Chaque participant a devant lui une feuille orange (*opportunités*) et une feuille bleue (*besoins*) d'un autre participant. Les participants séparent les objectifs du prédécesseur par un trait, puis inscrivent leur numéro d'identification sous ce trait. Individuellement, les participants écrivent sur chacune des feuilles, de nouveaux objectifs qui ne se retrouvent pas sur ces feuilles et qu'il n'a pas déjà listés sur ses propres feuilles précédemment. Un temps de cinq minutes est alloué.	  

Figure B.1.1 Déroulement de la phase d'ateliers 1

	Tâche de l'équipe de recherche	Tâche du participant	Illustration
Exercice 2| Activité de convergence	● Les feuilles *oranges* et *bleues* sont ramassées et redistribuées aux tables de la manière suivante : deux tables reçoivent la moitié des feuilles *bleues* et deux tables reçoivent la moitié des feuilles *oranges*.	● En sous-groupe, les participants prennent connaissances des objectifs sur les feuilles. Ils inscrivent tous les objectifs listés sur des post-it en s'assurant de (1) ne pas dédoubler les objectifs, (2) formuler correctement les objectifs, (3) n'avoir qu'un seul objectif par post-it.	 
Exercice 3| Concordance des objectifs	● La liste maîtresse d'objectifs est affichée au mur et rendue visible aux participants.	● Chaque sous-groupe *besoins* et *opportunités* collent les post-it au mur à côté de l'objectif le plus similaire de la liste maîtresse affichée. Les objectifs sans correspondance sont placés dans une section prévue à cet effet sur le mur.	
Exercice 4 | Préférence des objectifs	● La liste maîtresse d'objectifs est distribuée en format papier à chaque participant.	● Les participants cochent les objectifs de la liste maîtresse qu'ils ne jugent pas pertinents de considérer dans un OAP pour la planification spatiale des IVB. Une section prévue pour les commentaires permet aux participants d'ajouter des précisions sur leurs votes d'exclusion.	
Exercice 5 | Discussion en plénière	● Les votes d'exclusion des objectifs sont identifiés sur la liste maîtresse d'objectifs affichée au mur par des autocollants rouges (c.-à-d. un autocollant par vote).	● Discussion en plénière sur les objectifs ayant reçu plusieurs votes d'exclusion et sur les objectifs sans correspondance.	 

Figure B.1.1 Déroulement de la phase d'ateliers 1 (suite)

B.2 Phase d'ateliers 2 : Définition des attributs mesurables et des échelles de valeurs

Pour définir les échelles de valeurs, présenter aux décideurs plusieurs formes d'échelles de valeurs (par exemple, concave, linéaire, convexe, etc.) et leur demander d'en choisir une ne constitue pas une approche suffisante (Eisenführ et al., 2010). L'utilisation d'une méthode structurée permet d'obtenir des estimations plus fiables (Langhans & Lienert, 2016a). La méthode de la notation directe a été utilisée pour les attributs de type « catégorique » et « booléen ». Elle consiste à évaluer directement la meilleure (note d'adéquation spatiale de 1) et la pire catégorie (note d'adéquation spatiale de 0) de l'attribut et toutes les autres catégories. La Figure B.2.1 montre un exemple de l'utilisation de la méthode de la notation directe avec un attribut de type « catégorique». Pour chaque exercice, l'objectif, l'attribut, le jeu de données et le type d'IVB concernés ont été présentés.

Objectif	Maximiser l'infiltration de l'eau dans les sols en place
Attribut [unités]	Classes de sol [catégories]
Jeu de données [source]	• Dépôts meubles [Ville de Montréal]
Type d'attribut	Catégorique

Biorétention



1) Déterminer la meilleure catégorie (1er rang; 1) et la pire catégorie (dernier rang; 0)

2) Classer les catégories restantes en ordre de préférence du meilleur au pire cas

3) Attribuer une note d'adéquation aux catégories selon le classement

Catégorie de types de sols	Rang	Note d'adéquation spatiale
1, 2a, 3: sédiments mélangés (surtout du till)		
9: argileux (tourbe, marne)		
8: argileux (argile, limon)		
7: sablonneux (sable, un peu de gravier)		
6: sablonneux (sable, gravier)		
5: argileux (argile, limon)		
4: argileux (argile, limon, un peu de sable)		

Figure B.2.1 Exemple d'utilisation de la méthode de la notation directe pour définir l'échelle de valeurs d'un attribut catégorique

La Figure B.2.2 montre un exemple d'utilisation de la méthode de la bissection avec le protocole PDF adapté et développé initialement par Lienert (2019). Elle consiste à demander aux experts d'évaluer si l'amélioration d'un attribut, passant de son pire niveau (noté 0) à un niveau moyen (noté 0,5), est équivalente à son amélioration de ce niveau moyen vers son meilleur niveau (noté 1) (Langhans & Lienert, 2016a).

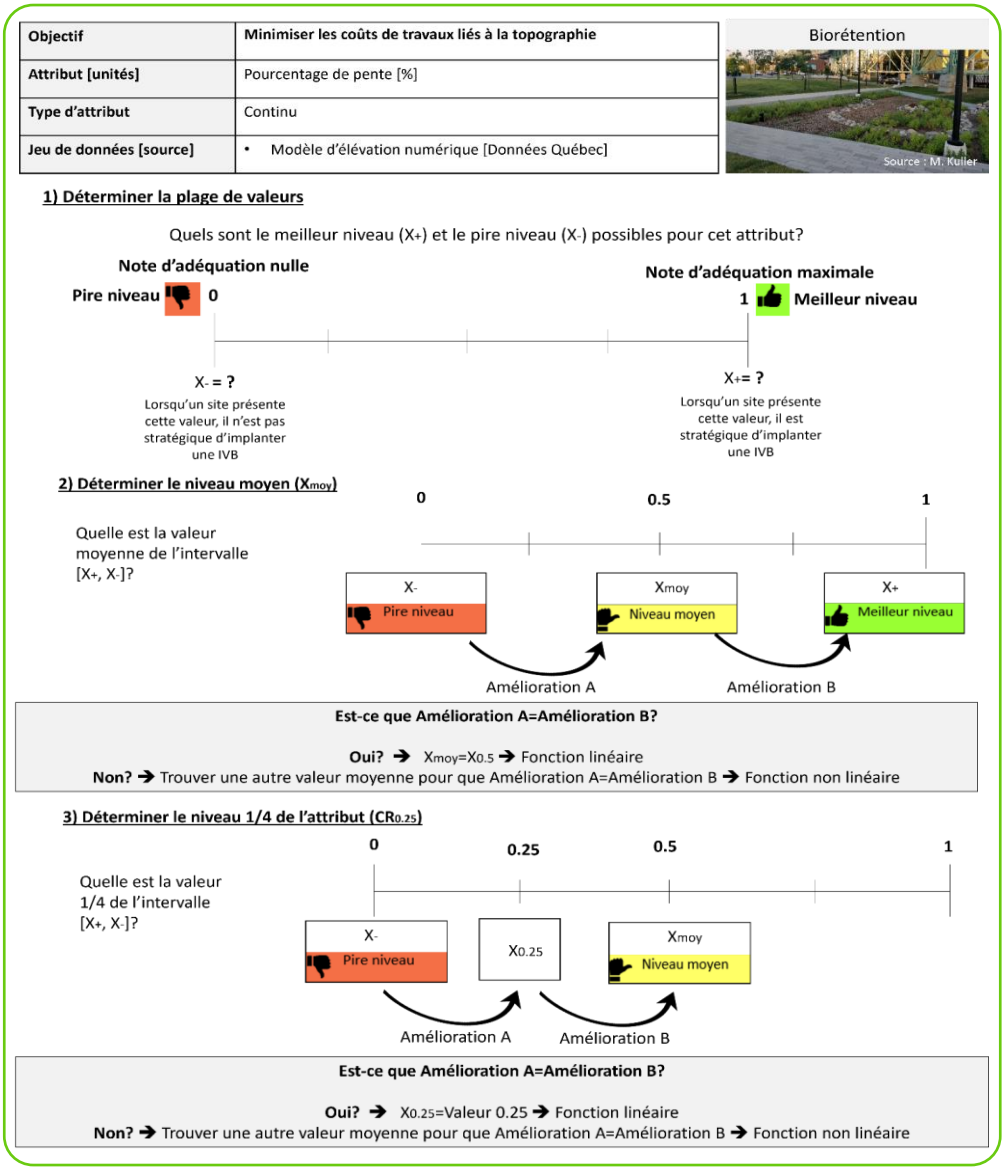


Figure B.2.2 Exemple d'utilisation de la méthode de la bissection inspiré du protocole PDF adapté de Lienert (2019) pour un attribut de type «continu»

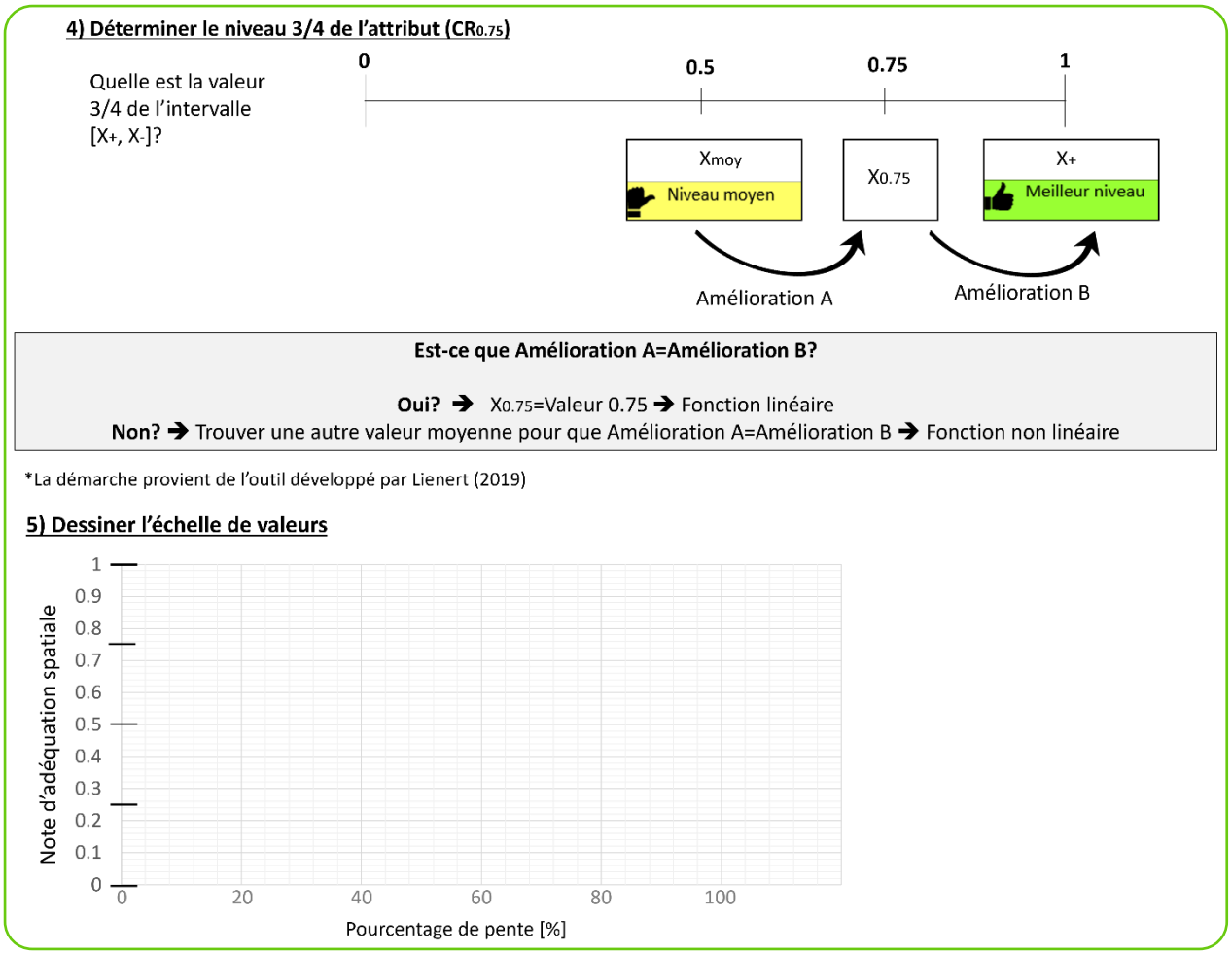


Figure B.2.2 Exemple d'utilisation de la méthode de la bissection inspiré du protocole PDF adapté de Lienert (2019) pour un attribut de type «continu» (suite)

ANNEXE C COMPLÉMENT À LA MÉTHODOLOGIE DE L'OBJECTIF 2

C.1 Méthode de pondération swing

La méthode de pondération swing permet de déterminer les poids de critères en utilisant des situations à classer selon leur importance relative (Eisenführ et al., 2010). Ces situations correspondent à l'augmentation d'un seul objectif à son meilleur niveau en conservant tous les autres objectifs à leur pire niveau. Les deux étapes principales d'un exercice de pondération swing sont (Eisenführ et al., 2010) :

i) Classement des situations: Une situation nulle est d'abord présentée au décideur, elle représente le scénario de base de la méthode et constitue la «pire situation possible», soit celle où tous les objectifs de la décision sont à leur pire niveau. Toutes les autres situations illustrées ont un objectif amélioré à leur meilleur niveau possible. Le décideur doit classer ces situations en ordre de préférence, c'est-à-dire en déterminant d'abord quel objectif est le plus important. Cet objectif est celui que le décideur préfère faire passer du pire au meilleur niveau (tous les autres objectifs étant au pire niveau). Il est classé au premier rang. Le décideur doit ensuite classer les objectifs restants selon sa préférence à améliorer chacun des objectifs à son meilleur niveau.

ii) Pondération des situations : La situation nulle (tous les objectifs au pire niveau) reçoit la note de 0 alors que la meilleure situation (objectif le plus important, soit celui dont l'amélioration de son pire à son meilleur niveau est classée au premier rang) reçoit la note de 100. Le décideur doit attribuer une note relative aux situations restantes selon l'ordre du classement établi à la première étape. La note est relative, cela signifie que pour un objectif noté à 50, il est deux fois moins important de l'améliorer à son meilleur niveau qu'un objectif noté à 100.

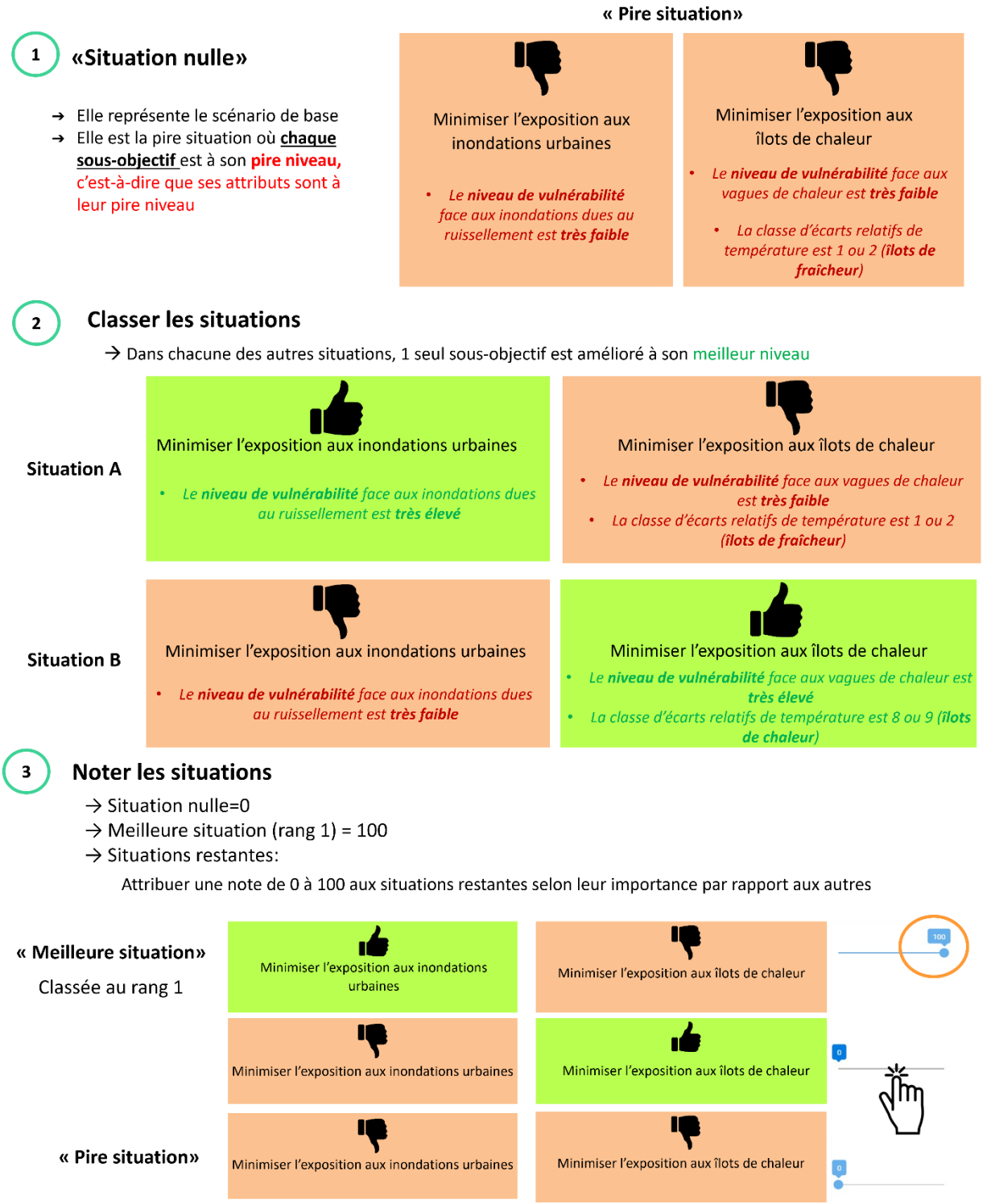


Figure C.1.1 Explications de la méthode de pondération swing

Lorsqu'appliqué pour une hiérarchie présentant plusieurs niveaux d'objectifs (par exemple, des objectifs principaux et des sous-objectifs) et plusieurs branches d'objectifs, l'exercice de

pondération swing doit être réalisé pour les objectifs du niveau inférieur de la hiérarchie d'objectifs et pour le niveau supérieur de la hiérarchie d'objectifs :

(i) Exercice de pondération swing au sein d'une même branche de la hiérarchie (sous-objectifs)

Le décideur doit classer (étape i) et pondérer (étape ii) les sous-objectifs d'une même branche de la hiérarchie d'objectifs. Les poids des situations notées sur une échelle de 0 à 100 sont ensuite normalisés afin que la somme des poids «locaux» au sein d'une même branche de la hiérarchie d'objectifs soit égale à 1 :

$$w_i = \frac{P_r}{\sum_{k=1}^{m} P_k} \qquad (C.1)$$

Où w_i le poids local du sous-objectif r (niveau inférieur), p_r la note donnée au sous-objectif r, m le nombre de sous-objectifs dans la branche, P_k la note donnée au sous-objectif k.

(ii) Exercice de pondération swing entre les branches de la hiérarchie d'objectifs (objectifs principaux)

Le décideur doit classer (i) et pondérer (ii) la meilleure situation (celle qu'il a classé au premier rang) de chaque branche de la hiérarchie d'objectifs. Les poids des objectifs du niveau supérieur sont également normalisés afin que la somme de ces poids entre les branches de la hiérarchie soit égale à 1.

$$w_s = \frac{P_R}{\sum_{j=1}^{n} P_j} \qquad (C.2)$$

Où w_s le poids de l'objectif R (niveau supérieur), p_R la note donnée à l'objectif principal R, n le nombre d'objectifs principaux de la hiérarchie, P_j la note donnée à l'objectif principal j.

(iii) Détermination des poids globaux des objectifs de la hiérarchie en combinant les résultats des étapes A et B.

Finalement, la détermination du poid global (w_r) de chacun des objectifs de la hiérarchie est obtenue par l'équation suivante :

$$w_r = \frac{P_r}{\sum_{k=1}^{m} P_k} \cdot \frac{P_R}{\sum_{j=1}^{n} P_j} = w_i \cdot w_s \quad (C.3)$$

Ainsi, la somme des poids des objectifs est normalisée à 1. Ces poids globaux obtenus constituent les valeurs que peut prendre en entrée l'OAP SSANTO.

C.2 Phase d'ateliers 3 : Détermination des poids relatifs des objectifs

L'expertise de l'équipe de recherche du Dr. M. Kuller sur la méthode de pondération swing a joué un rôle déterminant dans le choix de cette approche. Dre A. Aubert a développé un logiciel (Aubert & Masson, 2021) permettant de déterminer les poids en ADMC, offrant ainsi l'opportunité de tester son interface dans un cas d'étude. Le logiciel *ValuePreferences* (Version: 2.2.11) permet de créer un questionnaire en ligne et d'être utilisé comme un outil interactif lors d'un atelier facilité. Le logiciel n'avait été testé que de manière expérimentale et uniquement dans un contexte ADMC jusqu'à présent (Aubert et al., 2023; Aubert et al., 2024). Il a été utilisé dans un contexte SIG-ADMC pour la phase d'ateliers 3 du présent projet de recherche.

La Figure C.2.1 présente le déroulement de la phase 3 d'ateliers avec les tâches de l'équipe de recherche et des participants.

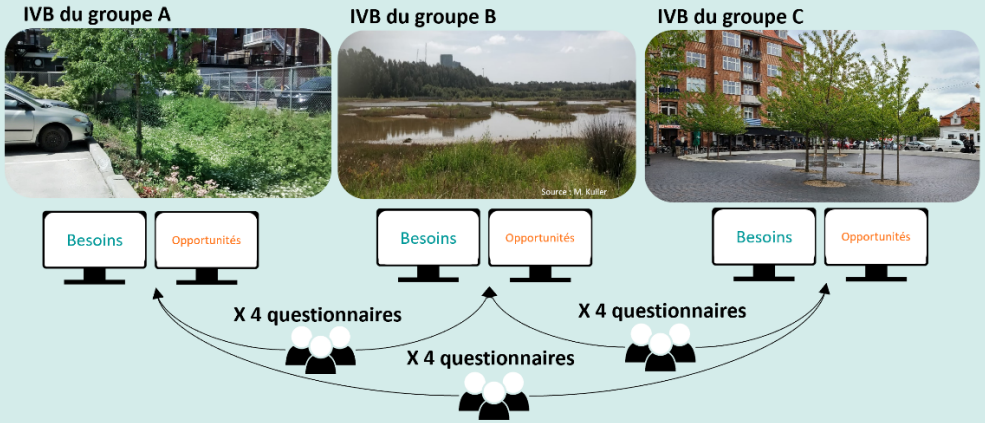
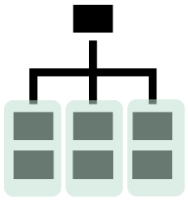
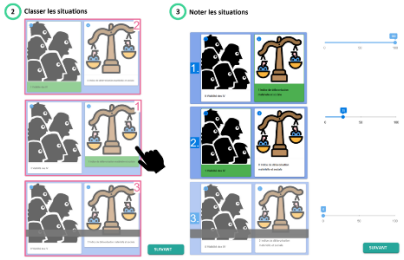
	Tâche du participant	Illustration
Préparation	● Assignation de 2 IVB à chaque participant, de sorte que chaque participant réponde à 4 questionnaires, soit pour 2 IVB et 2 perspectives d'adéquation (opportunités et besoins). ● Connexion à la plateforme de vidéoconférence où les participants peuvent poser des questions au moment de la complétion individuelle des questionnaires.	
Introduction	● Présentation des objectifs du projet et de l'activité de pondération swing. ● Présentation d'un exemple concret de l'exercice de pondération swing pour faciliter leur réflexion en termes de préférences. ●Explication de la signification des « meilleur » et « pire » niveaux des attributs.	 **Opportunités** **Meilleur niveau:** Indique une situation où le site offrirait la meilleure opportunité d'implantation d'IV **Besoins** **Meilleur niveau:** Indique une situation où le site aurait le plus besoin des bénéfices des IV (on décrit en réalité une situation non idéale, d'où le besoin d'implanter des IV)  **Pire niveau:** Représente une situation idéale où le site n'offrirait pas une bonne opportunité pour implanter une IV **Pire niveau:** Représente une situation idéale où on n'aurait pas besoin des IV.
Identification	● Chaque participant inscrit son organisation, son domaine d'intervention, son rôle et son champ d'expertise.	**Organisation** Veuillez indiquer le nom de l'organisation pour laquelle vous travaillez actuellement. **Échelle d'action** À quelle échelle agit cette organisation (municipal, provincial, etc.)? **Profession** Veuillez indiquer le titre du poste que vous occupez actuellement. **Domaine d'étude** Veuillez indiquer votre domaine d'étude.
Exercice de pondération du niveau inférieur des hiérarchies d'objectifs	● **Première étape** : Exercice de pondération swing pour comparer les objectifs de niveau inférieur à l'intérieur de chaque branche de la hiérarchie. ● Les objectifs de niveau inférieur sont présentés avec leurs objectifs supérieurs associés, accompagnés de descriptions détaillées incluant des attributs mesurables et les niveaux de performance possibles, avec des valeurs quantitatives lorsqu'applicable.	 

Figure C.2.1 Déroulement de la phase d'ateliers 3

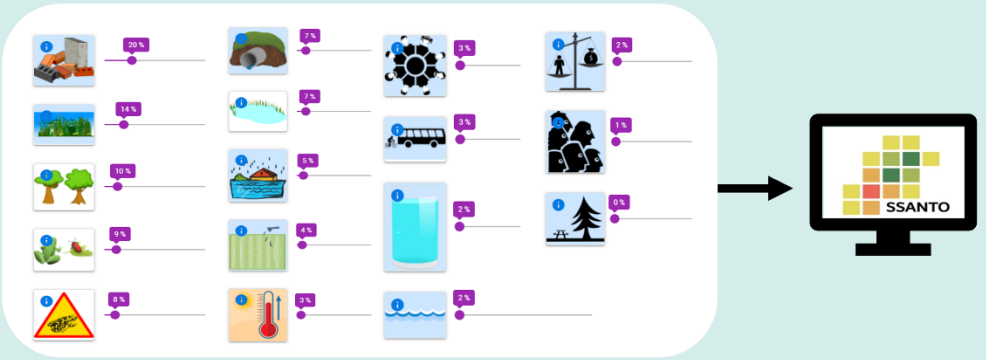
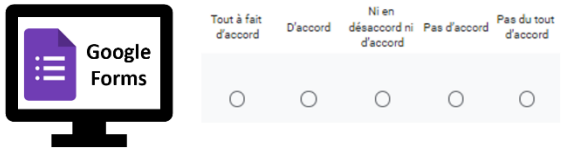
	Tâche du participant	Illustration
Exercice de pondération du niveau supérieur des hiérarchies d'objectifs	• **Deuxième étape** : Exercice de pondération swing pour les objectifs de niveau supérieur, en prenant en compte l'objectif le plus important de chaque branche des hiérarchies.	
Obtention des pondérations finales	• Le temps nécessaire pour remplir le questionnaire était d'environ une heure. • La somme des poids des objectifs pour chaque questionnaire est normalisée automatiquement par le logiciel *ValuePreferences* à 1. Les poids peuvent donc être directement entrés dans l'OAP SSANTO.	
Questionnaire de rétroaction	• Accès à un questionnaire de retour d'expérience sur Google Forms. Il demandait aux participants d'évaluer la difficulté de l'exercice ainsi que leur niveau de compréhension sur une échelle de Likert à cinq points. Ils avaient également la possibilité d'expliquer les difficultés rencontrées, de suggérer des ajustements aux objectifs ou de partager des commentaires sur leur expérience globale.	

Figure C.2.1 Déroulement de la phase d'ateliers 3 (suite)

ANNEXE D SUPPLEMENTARY MATERIAL, ARTICLE 1: CAN WE STOP REINVENTING THE WHEEL IN BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE PLANNING? USING VALUE-FOCUSED THINKING TO ENABLE TRANSFERABILITY OF A MULTICRITERIA PLANNING SUPPORT SYSTEM

Journal: Landscape and Urban Planning

Title: Can we stop reinventing the wheel in blue-green infrastructure planning? Using value-focused thinking to enable transferability of a spatial multicriteria analysis tool

Authors : Sandrine Lacroix[a,*], Martijn Kuller[b], Garance Gougeon[a], Justine Petrucci[a], Florence Lemieux-Chalifour[a], Alexandre Rioux[c], Danielle Dagenais[c], Françoise Bichai[a]

[a] *Department of Civil, Geological and Mining Engineering, Polytechnique Montréal, 2900, boul. Édouard-Montpetit, Montréal, QC, Canada*

[b] *Copernicus Institute of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands*

[c] *Faculté de l'Aménagement, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada*

**Corresponding author email address:* sandrine.lacroix@polymtl.ca (S.Lacroix).

D.1 Representation of stakeholders participating in workshop 1.a and 1.b

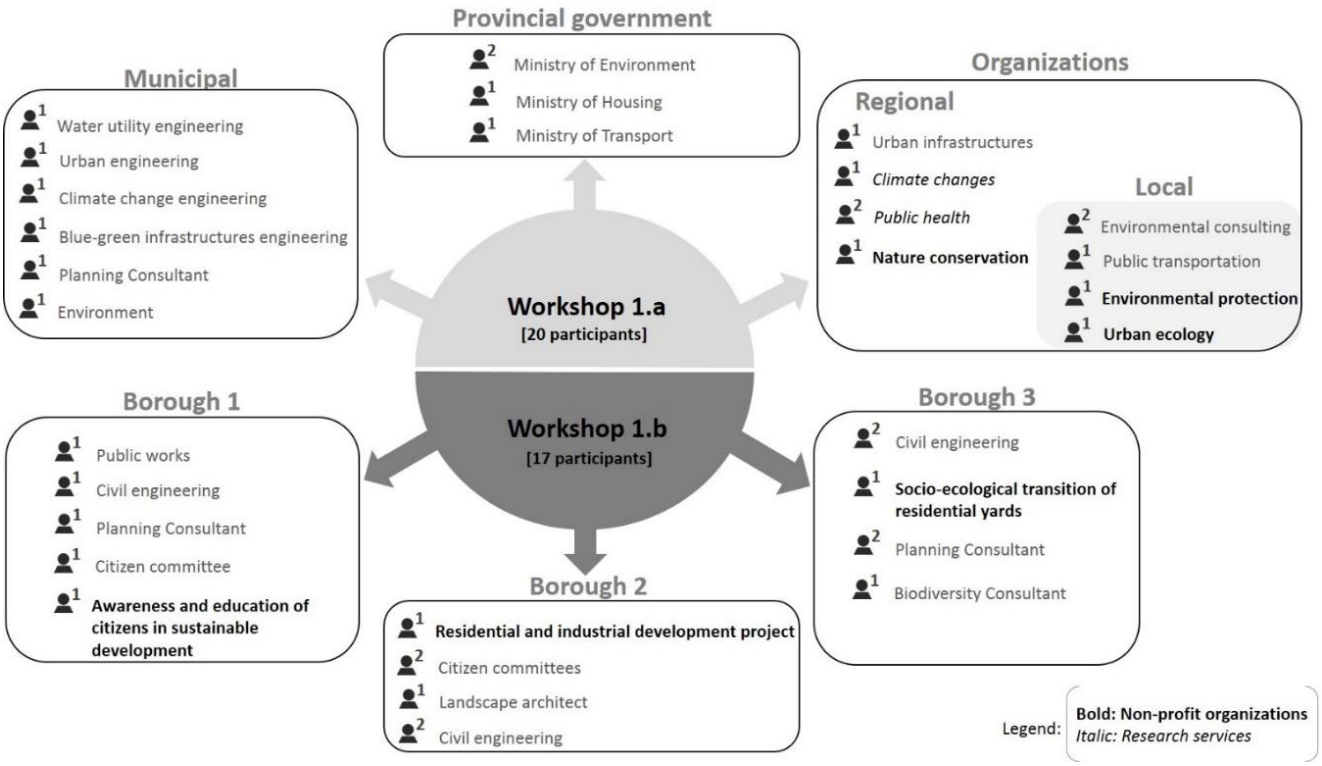


Figure D.1.1 Representation of stakeholders participating in workshop 1.a and 1.b

D.2 SI-Methodology

D.2.1 Definitions of the five BGI types

The definitions are adapted from MDDEFP (2011) and Melbourne water (2005).

BGI group (A):

Bioretention & rain gardens:

These shallow, vegetated depressions, known as rain gardens or bioretention systems, effectively treat water by employing processes such as retention, filtration, biological absorption, and in some cases, infiltration in native soils. Runoff water is filtered through a soil layer and plant roots, eventually reaching the system's bottom, where it is either collected for reuse or drained through perforated pipes. Unlike infiltration systems, they

can be implemented on different soil types, offering flexibility in location, scale, and form. They provide versatile stormwater management for various contexts.

Infiltration systems:

These systems, whether shallow trenches or depressions, are designed to retain and infiltrate water into the soil. They depend on soil characteristics such as permeability, more effective in permeable soils like sand, and require a deep water table to avoid structural issues. Vegetation enhances the pollutant removal process through filtration. Additionally, the existing soil types must be highly permeable, and there should be no risk of contamination with the groundwater.

Grassed swales:

These systems facilitate the conveyance of stormwater flows. They utilize vegetation for even distribution and slow down flows rates, favoring retention for water treatment through a filter bed and perforated drains.

BGI group (B):

Ponds & lakes:

These systems use sedimentation, nutrient absorption by phytoplankton, and UV disinfection for water storage and treatment, allowing potential reuse. They offer recreational spaces, habitats, and aesthetic appeal with diverse vegetation. Unlike wetlands, they are suitable for steep and confined sites, accommodating large water volumes.

Constructed wetlands:

These systems are shallow vegetated areas that allow for temporary water storage and maximize pollutant removal through plant processes and settling. They offer a variety of vegetation and habitats. These systems are based on sedimentation, filtration, and pollutant removal processes. Water flows slowly through dense vegetation, delaying water volumes. They often consist of an entry zone to remove sediments, a macrophyte zone where vegetation can remove fine particles, and a high-flow bypass channel to protect the vegetation. They provide habitats and create recreational and aesthetic areas.

D.2.2 Formulating and structuring the framework around VFT

D.2.2.1 Identifying criteria (step 1)

We first identified criteria from an existing framework for BGI planning (Kuller et al., 2017) named *Spatial Suitability ANalysis Tool* (SSANTO; Kuller et al., 2019). The original spatial suitability framework was developed and tested in Melbourne, Australia. Its criteria were based on a review of literature and Australian guidelines on BGI planning, of literature on BGI benefits and of existing GIS-MCDA based PSS (Kuller et al., 2017). Starting from these criteria, we then compared them to those from another framework developed and tested in a city in Quebec (Canada) (Dagenais et al., 2014). This decision tree framework was based on local data, literature, North Americans stormwater management guidelines and *Low Impact Development* (LID) principles. Finally, we reviewed the Quebec and North American standards and guidelines for BGI implementation (Chesapeake Stormwater Network, 2013; CSA Group, 2018; International Civil Aviation Organization, 2012; MDDEFP, 2011; MDDELCC, 2017; The Prince George's County Maryland, 2007; TRCA/CVCA, 2010).

Table D.2.1 Sources of decision criteria considered as values

Criteria	SSANTO framework (Kuller, Bach, et al., 2019)	Local framework Dagenais et al. (2014)	Others
Contaminated sites	X	X	5
Groundwater table depth	X	X	2
Soil types	X	X	1;2;4
Rainfall variability	X		
Specific winter conditions (snow accumulation, type of snow removal, type of de-icing)		X	
Slope	X	X	1;2
Drainage infrastructure distance	X		1
Land value	X		
Land ownership	X	X	
Lot size	X		
Street width/type	X		
Planned re(Developments)	X	X	
Planned infrastructure work	X	X	

Table D.2.1 Sources of decision criteria considered as values (continued)

Criteria	SSANTO framework (Kuller, Bach, et al., 2019)	Local framework Dagenais et al. (2014)	Others
Visibility	X		
Presence of flat roofs		X	
Cultural heritage sites	X		
Natural heritage sites	X	X	
Geological heritage sites	X		
Airports distance to	X		
Utility infrastructure	X		1;6
Building footprints	X		5;6
Surface water and flood plain	X		2
Underground infrastructure buffer			1
Water source buffer			1
Irrigation demand distance	X		
Social acceptability	X		
Recreational	X		
Relative wealth	X		
Pedestrian safety		X	
Travel corridors to be enhanced		X	
Social cohesion	X		
Sense of community	X		
Green cover	X		
Biodiversity	X		
Connectedness	X		
Total habitat	X		
Floods	X		
Territorial and societal sensitivities (e.g. heat vulnerability)	X	X	
Imperviousness	X	X	
Current BGI	X		
Combined sewer overflows		X	
Erosion afecting a waterway		X	
Groundwater recharge		X	
Drinking water vulnerability			3

1: The Prince George's County Maryland (2007); 2: MDDEFP (2011); 3: MELCC (2018); 4 : CSA Group (2018); 5: MDDELCC (2017); 6: Chesapeake Stormwater Network (2013)

D.2.2.2 Obtaining a master list of objectives (step 4)

Table D.2.2 Master list of objectives developed based on literature, existing frameworks and guidelines

* BR: Bioretentions; IS: Infiltration systems; S: Swales; P: Ponds & lakes; W: Constructed wetlands; GR: Green roofs

Opportunities side: Prioritizing sites offering the best opportunities for setting up BGI	
Objectives *(example of attribute or indicator)*	**BGI type***
Avoid potential contamination *(e.g. distance to landfill or contaminated sites [m])*	BR, IS, S, P, W
Prioritize soils with optimal hydrological characteristics *(e.g. depth to water table [m], infiltration rate by soil type [m/s], depth to bedrock [m])*	BR, IS, S, P, W
Prioritize areas receiving an adequate amount of precipitation *(e.g. number of days per year with more than 1 mm of rain [day/year])*	All
Avoid exposure to recurrent flooding *(e.g. presence of a flood plain, presence of bodies of water)*	BR, IS, S
Avoid exposure to de-icing salts *(e.g. degree of salinity)*	BR, IS, S, P, W
Prioritize sites with suitable slopes *(e.g. slope [%])*	BR, IS, S, W
Prioritize sites that are easy to integrate into the drainage system *(e.g., distance from storm or combined sewer system [m])*	BR, IS, S, P, W
Prioritize low-cost land *(e.g. municipal general property tax rate [rate/100$])*	P, W
Prioritize sites where the type of ownership facilitates implementation *(e.g. type of landowner)*	BR, IS, S, P, W
Prioritize sites of appropriate size *(e.g. plot size [m^2])*	P, W
Prioritize routes that facilitate implementation *(e.g. type of street)*	BR, S
Prioritize sites targeted by planned work *(e.g. planned urban (re)development projects, projects/work planned in the Three-Year Capital Plan)*	BR, IS, GR, S, P, W
Prioritize sites that contribute to the area's identity *(e.g., types of landmarks such as theaters, arenas, libraries, museums, etc.)*	All
Avoid interfering with existing heritage values *(e.g. type of heritage site such as classified heritage, heritage city, etc.)*	BR, IS, GR, S, P, W
Avoid interfering with air traffic *(attracting birds) (e.g. distance to an airport [m])*	P, W
Avoid interfering with public easements *(e.g. type of public easement)*	BR, IS, S, P, W
Avoid interfering with existing buildings *(e.g. distance from building footprint [m])*	BR, IS, P, W
Avoid interfering with existing underground and overhead infrastructure *(e.g. distance fro underground infrastructure [m])*	BR, IS
Prioritize abandoned or vacant sites *(e.g. presence of a vacant site)*	P, W

Table D.2.2 Master list of objectives developed based on literature, existing frameworks and guidelines (continued)

Needs side: Prioritize sites with the greatest need for BGI implantation	
Objectives *(example of attribute or indicator)*	**BGI type***
Improve the user-friendliness of active and public transportation *(e.g., proportion of the population using active or public transportation to get to work, by distribution area [%], presence of active and public transportation infrastructure)*	BR, IS, S
Improve air quality *(e.g. atmospheric concentrations of metal pollutants sampled [ng/m3], proximity to factories or industries [m], traffic density [AADT], street type [categories])*	All
Improve visibility of BGI (e.g.: distance from street furniture and front yards [m])	All
Improving educational potential (e.g. proximity to civic centers such as community and cultural sites, schools, sports venues, etc.) [m], type of land use creating achaladange [categories])	All
Improving access to green spaces *(e.g., parks or public green spaces within a 5-minute walking distance [m])*	P, W
Improve social and material equity *(e.g. index of material and social disadvantage)*	All
Reduce pollution near industrial areas *(e.g. industrial zones)*	BR, IS, S, P, W
Reduce vulnerability (sensitivity and exposure) to flooding *(e.g.: index of vulnerability to hydrometeorological hazards and distance from "bowl zones" in the topography [m])*	All
Reducing vulnerability (sensitivity and exposure) to heat islands *(e.g. "heat wave vulnerability index", surface temperature [°C])*	All
Increase vegetation cover *(e.g. vegetation cover [threshold value with NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)])*	All
Improve pollinator support *(e.g. proximity to suitable pollinator habitats [m])*	All
Increase habitat creation *(e.g. intersection between impermeable ground cover and ecological corridor [Boolean])*	All
Enhance sites of particular importance for biodiversity and the environment *(e.g. site category [Boolean])*	All
Improve low-quality habitats *(e.g. habitat quality [categories])*	All
Improve ecological connectivity *(e.g. proximity to an existing ecological corridor [m], proximity to a habitat plot [m], intersection between impervious soil cover and ecological corridor [Boolean])*	All
Reduce mineralized sites *(e.g. runoff coefficient by land use category)*	All
Improve the distribution of BGI *(e.g.: percentage of surfaces in an urban drainage basin already managed by an existing BGI [%])*	All
Reduce overflows *(e.g.: priority level for an overflow structure within an urban drainage basin)*	All
Reduce vulnerability of groundwater and drinking water intakes *(e.g. degree of salinity, degree of snow pollution, distance from drinking water intakes [m])*	BR, IS

D.2.2.3 Validating the master list of objectives with stakeholders (step 5)

Project presentation

We first introduced the research project to the participants, outlining elements such as the research team members, project aims, functioning of the GIS-MCDA based PSS, workshop aims, methodology employed in generating the master list of objectives, and the project timeline.

Icebreaker

The participants were in sub-groups, the same one they worked with for steps 3 and 4. Each sub-group received an image depicting a particular type of BGI and were tasked with defining three functions of the BGI beyond its intended current use.

Participant's tasks (step numbering is linked to Figure 4.2 of the paper)

1. ***Individual brainstorm, 1st round*:** Each participant received at the beginning an identification number to maintain anonymity. We asked participants to individually provide as many objectives as possible that came spontaneously to their mind. We gave them each a blue sheet (for the objectives related to meet the needs of a site) and an orange sheet (for the objectives related to the opportunities of a site) with their identification number written in the upper right corner. After 10 minutes, we asked them to crumple their two sheets into balls and toss them into a designated area at the center of the room.

2. ***Individual brainstorm, 2nd round:*** Each participant picked up a blue sheet and an orange sheet, other than their own, in the designated area. To identify which participant was generating the second round of objectives, we requested them to divide their colleague's objectives with a line and place their identification number beneath it. Individually, they were asked to first learn about the objectives that had been generated by their colleague on each sheet and then to write new objectives that they would not have generated previously or neither their colleague. Bouncing on the ideas of their colleagues could allow to be inspired by objectives they might not have thought of and to get rid of their cluster of ideas (Haag, Zürcher, et al., 2019).

3. ***Grouping objectives:*** In sub-groups, participants received several blue and orange sheets from step 2. Participants read the objectives on the sheets. They were asked to write all the objectives

listed on post-it notes, making sure to (1) not duplicate the objectives, (2) word the objectives correctly, and (3) have only one objective per post-it note.

4. ***Matching objectives:*** In the same sub-groups, participants were instructed to match their objectives on post-it notes with the most similar objective from our master list posted on the wall. Combining individual brainstorms with the provision of a master list is a promising approach to cover a satisfactory set of objectives (Haag, Zürcher, et al., 2019).

5. ***Individual exclusion votes***: Each participant received a paper copy of the master list of objectives, which were the same presented earlier on the wall. Individually, they were asked to check off the objectives they deemed irrelevant for inclusion in an urban BGI planning process. Each participant had one exclusion vote per objective. We provided the objective name, example attributes for measurement, and applicable BGI types. A designated space allowed participants to provide justifications or comments regarding their votes or any project-related matters.

6. ***Group discussion:*** The last activity involved a group discussion. Between steps 5 and 6, the research team used red stickers (1 per exclusion vote) to identify objectives from the master list of objectives on the wall that received the highest number of exclusion votes, facilitating the discussion's focus.

D.2.3 Operationalization of the framework

D.2.3.1 Defining and validating measurable attributes (step 7)

Determining the attributes requires knowledge of BGI planning, which prompted the selection of qualified experts. We identified these experts through professional contacts of the research team and municipal collaborators, based on their expertise in pertinent fields. We then used the snowball technique, i.e. one expert referred us to another until we reached relevant experts for all attributes (see Table D.2.3).

Table D.2.3 Role, sector of activity and expertise of each expert consulted to define and validate measurable attributes

# expert	Role	Sector of activity	Expertise	Date
E1	Associate Professor	Academic	Land use planning, urban development, architecture	October 06, 2020
E2	Environmental Supervisor	Municipal	Environmental Sciences	April 28, 2021
E3	Full professor	Academic	Heritage values of Canadian public spaces	May 12, 2021
E4	Assistant Professor	Academic	Transportation planning and land use, mobility behavior, active/public transportation, transportation equity, sustainable development	May 13, 2021
E5	Water Department	Municipal	BGI design for stormwater management, sustainable stormwater management	May 14, 2021
E6	Associate professor	Academic	Ecological economics, environmental geography, land use and planning	May 14, 2021 May 15, 2021
E7	Director Research and Development	Professional	Ecologist, geographer, conservation scientist	May 14, 2021
E8	Master student	Academic	Active mobility and BGI	April 11, 2023
E9	Full professor	Academic	Hydraulic and hydrological engineering, source water protection, water quality	April 12, 2023
E10	PHD student	Academic	Environmental engineering, water resources management, surface water quality, vulnerability of drinking water intakes	April 12, 2023
E11	Research associate	Academic	Drinking water and vulnerability of drinking water intakes	April 12, 2023
E12	Scientific advisor	Institutionnal	Urban greening issues, climate change, public health and environmental benefits from nature	April 19, 2023
E13	Scientific advisor	Institutionnal	Development and active transportation, impact of the built, social or community environment on population health	April 19, 2023
E14	Full professor	Academic	Population ecology, competition for space, integrated vegetation control, invasive species, natural water purification capacity of aquatic plants.	May 13, 2021 June 02, 2023
E15	Planning Consultant	Municipal	Asset management, sustainable stormwater management	June 22, 2023
E16	Coordinator in mobility and urban planning	Professional	Mobility and urban planning, eco-responsible parking	July 05, 2023
E17	Responsible nature-based solutions	Professional	Science- and nature-based solutions	July 05, 2023

D.2.3.2 Collecting geospatial datasets (step 8)

Table D.2.4 Geospatial datasets. * When an objective is common to both frameworks A) and B), its numbering follows the convention of framework A) in Figure 4.5 and Figure 4.6.

MELCC : Ministry of the Environment and the Fight against Climate Change; MERN : Ministry of Natural Resources and Forestry; MFFP: Ministry of Forests, Wildlife and Parks; MAMH: Ministry of Municipal Affairs and Housing; INSPQ: Quebec National Institute of Public Health; CERFO: Sainte-Foy Forestry Teaching and Research Centre

# objective *	Attribute	Dataset name	Scale	Data source	Handling required	Case study 1	Case study 2
1.1_Perf_Soils	Soil type	Surface geology	Country	Geological Survey of Canada		□	□
	Bedrock depth [m]	Thickness of unconsolidated deposits (Groundwater Knowledge Acquisition Projects - PACES)	Regional (12 regions)	Quebec open data, MELCC		□	
1.2_Perf_Ground	Groundwater table depth [m]	Depth of the water level in relation to the ground surface (Groundwater Knowledge Acquisition Projects - PACES)	Regional (12 regions)	Quebec open data, MELCC		□	
2.1_Cost_Topo	Percentage of slope [%]	Digital terrain models (DTM)	Provincial	Quebec open data, MERN	□	□	□
2.2_Cost_Sewer	Drainage infrastructure distance [m]	Sewer system pipes	Local	Municipality		□	□
3.1_Ease_Tenure	Land ownership	Cadastre	Local	Municipality		□	□
2.2_Ease_Lots	Available space on a lot [%]	Cadastre	Provincial (partly)	GeoIndex, MERN	□	□	□
3.2_Ease_Road	Street type	Quebec-AQ Network addresses	Provincial	Quebec open data, MERN		□	□
3.3_Ease_Works	Planned (re)Developments	Planned developments sites	Local	Municipality		□	□
	Capital works program	Three-year capital program	Local	Municipality		□	□
3.3_Conflicts_Airp	Airports distance to	Runway, Airports	Provincial	Quebec open data, Ministry of Transport		□	□
4.2_Conflict_Inf	Utility infrastructure	Easement site	Local	Municipality		□	□
4.1_Conflict_Build	Building footprints	Open Building Database (BDOI)	Country	Statistics Canada (only available for these cities in Quebec: Longueuil, Montreal, Quebec, Repentigny, Rimouski, Rouyn-Noranda, Shawinigan, Sherbrooke)		□	□
		Building footprints	Provincial (partly)	Quebec open data, MERN			
5.1_Water_Imp	Runoff coefficient	Runoff coefficient (to combined with urban drainage basins)	Country	Stormwater management guide, MELCC	□	□	□
	Type of impervious surfaces	Type of impervious surfaces	Local	Municipality			
	Percentage of impervious surfaces per urban drainage basin [%]				□		□

Table D.2.4 Geospatial datasets (continued)

# objective *	Attribute	Dataset name	Scale	Data source	Handling required	Case study 1	Case study 2
5.3_Water_Distrib	Percentage of urban drainage area managed by existing BGI	Existing BGI	Local	Municipality			
		Urban drainage basin	Local	Municipality	☐	☐	☐
5.2_Water_CSO	Priority level of an urban drainage basin	Overflow basin	Local	Municipality	☐		
		Location of drinking water sources	Local	Municipality			☐
		Location of swimming and recreational areas	Local	Municipality			
		Location of overflow structure	Local	Municipality			
		Land use classified based on the property use codes (CUBF code)	Local	Property assessment, MAMH			
6.1_Equi_Vis	Distance to point of interest	Land use classified based on the property use codes (CUBF code)	Local	Property assessment, MAMH	☐		
	Land use type	Land use (CUBF code)	Local	Municipality	☐	☐	☐
	Population density	2021 Census Product, Population and Dwelling Counts : Canada, provinces and territories, census subdivisions and dissemination areas	Country	Statistic Canada	☐	☐	☐
6.2_Equi_Disadv	Index of material and social disadvantage	Index of material and social disadvantage	Provincial (partly)	Quebec open data, INSPQ		☐	☐
5.1_Equi_Access	Distance to an existing green space or public park	Recreational areas in Quebec at the 1:100,000 scale (national parks of Quebec and Canada and regional parks)		Quebec open data, MERN		☐	☐
7.1_Health_Transp	Distance to active transportation infrastructure	Cycling network	Local	Municipality		☐	☐
	Bicycle lane separator type	Cycling network	Local	Municipality			☐
	Distance from public transit infrastructure	Bus and metro routes	Local	Municipality		☐	☐
7.2_Health_Air	Air quality index at stations and by sector	Quebec Air Quality Monitoring Network (RSQAQ)	Provincial (partly)	Quebec open data, MELCC		☐	☐
	Street type	Quebec-AQ Network addresses	Provincial	Quebec open data, MERN		☐	☐
7.3_Health_Drink	Buffer zone around water source	Location of drinking water sources	Local	Municipality			
	Buffer zone around septic tanks	Location of septic tanks	Local	Municipality		☐	
	Presence of contaminated sites	Contaminated Sites Inventory	Provincial	Quebec open data, MELCC		☐	☐
		Former landfills	Local	Municipality		☐	

Table D.2.4 Geospatial datasets (continued)

# objective *	Attribute	Dataset name	Scale	Data source	Handling required	Case study 1	Case study 2
8.1_Bio_Green	Vegetation cover	Canopy index 2021 [threshold with NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)]	Regional	Regional management organization for population services in the urban region			☐
		Ecoforestry map of the third inventory	Provincial	Quebec open data, MFFP		☐	☐
8.2_Bio_Connect	Conservation priority for ecological corridors	Database on the ecological connectivity of natural environments in the St. Lawrence Lowlands	Regional	McGill University, Quebec Biodiversity Science Centre, Apex Resource Management Solutions, Habitat, MELCC		☐	☐
	Habitat conservation priority	Database on the ecological connectivity of natural environments in the St. Lawrence Lowlands	Regional	McGill University, Quebec Biodiversity Science Centre, Apex Resource Management Solutions, Habitat, MELCC		☐	☐
9.1_Clim_Flood	Bowl streets	Bowl streets	Local	Municipality			☐
	Level of vulnerability to flooding due to runoff	Hydrometeorological vulnerability index	Provincial (partly)	Interactive Atlas of the vulnerability of the Quebec population to climate hazards, University Laval in partnership with Ouranos and INSPQ		☐	☐
9.2_Clim_Heat	Level of vulnerability to heat waves	Heat wave vulnerability index	Provincial (partly)	Interactive Atlas of the vulnerability of the Quebec population to climate hazards, University Laval in partnership with Ouranos and INSPQ		☐	☐
	Relative temperature difference classes	Urban heat/cool islands and relative temperature differences 2020-2022	Provincial (partly)	Quebec open data, INSPQ and CERFO		☐	☐
Overlays	Flood plain	Flood risk area database (*BDZI*)	Provincial	Quebec open data, MELCC		☐	☐
	Water bodies	Lakes and rivers database (LCE)	Provincial	Quebec open data, MELCC		☐	☐
	Heritage sites	Heritage sites cited by municipalities and aboriginal communities Heritage buildings cited by municipalities and aboriginal communities Heritage sites declared by the Québec government National heritage sites declared by the Quebec government under the Cultural Heritage Act Heritage sites classified by the Minister of Culture and Communications Heritage buildings classified by the Minister of Culture and Communications	Provincial	Quebec open data, Ministry of Culture and Communications	☐	☐	☐
	Parking lots	Parking lots	Local	Municipality		☐	☐
Outline of the case study		1:20,000 administrative divisions (SHP format)	Provincial	Quebec open data, MERN		☐	☐

D.2.3.3 Eliciting value scales (step 9)

We elicited two types of value scales, i.e. continuous (numerically continuous values) or discrete (categories or boolean), recognizing that structured approaches enhance reliability and that assumptions about linearity can hinder expert judgment representation (Ferretti & Montibeller, 2016; Langhans & Lienert, 2016b).

For continuous attributes (e.g. percentage of slope), we used the bisection method (Eisenführ et al., 2010) to define the value scale as a function. We determined the worst and best attribute levels based on minimum and maximum dataset values in case study areas or by consulting experts directly. These levels of the attribute range should not be too narrow and not too large, as recommended when eliciting value scales (Ferretti & Montibeller, 2016). We asked experts to assess if the improvement from a "worst level" (X_-) of the attribute (i.e. the 0 on the scale) to a mid-point level ($X_{0,5}$) (i.e. the 0.5 on the scale to begin) was equal to the improvement from this mid-level to a "best level" (X_+) of the attribute (i.e. the 1 on the scale), based on Lienert (2019). Equivalence led to a linear function. If not, iterations were conducted to find a mid-point for equivalent improvements. The same process could be applied at quarter ($X_{1/4}$) and three-quarter scale ($X_{3/4}$). Generally, five points are sufficient to draw a value function (Eisenführ et al., 2010). The intermediate points of the function are obtained by linear interpolation between known values.

For discrete attributes (e.g. land use categories), we used the direct method (Eisenführ et al., 2010). This method involves initially ranking categories of the attributes and then directly assigning a score on the scale. The top-ranked category received a maximum score of 1, while the lowest-ranked category was assigned a score of 0.

Table D.2.5 Experts consulted to elicit the value scales of the attributes measuring objectives of the framework for BGI planning

*The numbering of the objectives refers to that presented in the frameworks, in Figure 4.5 and Figure 4.6.

Consultation's information					**Expert's information**			
# consultation	**Themes**	**Objectives***	**Number of value scales elicited**	**Date**	**# expert**	**Role**	**Sector**	**Expertise**
A	Soils	1.1_Perf_soils	1	June 14, 2023	E18	Assistant Professor	Academic	Environment, environmental engineering, wastewater treatment, water quality, pollution
B	Costs, planned works, streets network & public easement	2.1_Cost_Topo 2.2_Cost_Sewer 3.2_Ease_Road 3.3_Ease_Works 4.2_Conflict_Inf	6	June 1, 2023 and June 20, 2023	E19	Green infrastructure engineer	Municipal	Water and environment engineer, treatment of contaminated water and soil
					E20	Green and resilient infrastructure engineer	Municipal	Hydraulics and hydrology, civil engineering, stormwater management , urban infrastructure design, green infrastructure, sustainable development
C	Costs, planned works, land ownership & public easement	3.1_Ease_Tenure 3.3_Ease_Works 4.2_Conflict_Inf	4	July 14, 2023 and July 18, 2023	E2	Environmental supervisor	Municipal	Water and soil contamination, city operations and BGI projects
					E21	Water engineer	Municipal	Water engineering
					E22	Specialist	Municipal	Biology, environment department
D	Visibility of BGI, material and social deprivation & access to green spaces	6.1_Equi_Vis 6.2_Equi_Disadv 5.1_Equi_Access	5	June 5, 2023 and June 7, 2023	E12	Scientific advisor	Public institution	Urban greening issues, climate change, public health and environmental benefits from nature
					E13	Scientific advisor	Public institution	Development and active transportation, impact of the built, social or community environment on population health
					E23	Scientific advisor	Public institution	Climate change

Table D.2.5 Experts consulted to elicit the value scales of the attributes measuring objectives of the framework for BGI planning (continued)

Consultation's information					**Expert's information**			
# consultation	**Themes**	Objectives*	**Number of value scales elicited**	**Date**	**# expert**	**Role**	**Sector**	**Expertise**
E	Biodiversity & ecological connectivity	8.1_Bio_Green 8.2_Bio_Connect	3	May 19, 2023	E7	Director of research and development	Private firm	Landscape ecologist and geographer, modelling-based approaches for biodiversity and land management solutions
F	Usability of active and public transportation	7.1_Health_Transp	3	June 19, 2023	E24	Master student	Academic	Active mobility and BGI
					E25	Landscaping consultant and architect	Municipal	Urban planning and mobility
					E26	Master student	Academic	Transport engineering
G	Floods & heat islands vulnerability	9.1_Clim_Flood 9.2_Clim_Heat	3	June 14, 2023	E27	Scientific Coordinator	Public institution	Adapting living environments to climate change
H	Combined sewers overflows & imperviousness	5.1_Water_Imp 5.2_Water_CSO 5.3_Water_Distrib	2	July 27, 2023	E9	Full professor	Academic	Hydraulic and hydrological engineering, water resources and supply, water quality
I	Air quality	7.2_Health_Air	3	August 1, 2023	E28	Toxicology and risk analysis trainee	Public institution	Environmental health, toxicology
					E29	APPR in environmental health toxicology	Public institution	Environmental toxicology, emergency management, climate change, cartography

D.3 SI-Results

D.3.1 Means-ends network

Table D.3.1 Additional information about fundamental objectives

Fundamental objective	Description
Maximize systems performance	The fundamental objective is to group together the means and objectives aimed at prioritizing locations that ensure the proper functioning of BGI implementation. For example, sites with optimal soil characteristics can contribute to optimizing performance, as they help minimize plant death and ensure appropriate water flow in BGI based on an infiltration process. This involves maintaining a permanently unsubmerged soil layer and maximizing the water storage capacity of the soil (MDDEFP, 2011; New Jersey Department of Environmental Protection, 2018; Rahman et al., 2012; U.S. Environmental Protection Agency, 2014).
Minimize costs	One of the main objectives for the implementation of BGI is to minimize the costs involved. A mean objective for lowering costs is to minimize the work required in the field by prioritizing sites with a suitable slope for the implementation of the desired type of BGI (Rahman et al., 2012). This mean objective is an example of what the means-ends network allows us to do: avoid duplication of decision criteria that pursue the same fundamental objectives. Prioritizing appropriate slopes can be linked to both ensuring appropriate water flow through systems and minimizing costs. However, we decided to use the slope decision criterion for the economic aspect, since appropriate water flow was covered by soil characteristics. Reducing the distance to existing drainage infrastructure to facilitate connection also allows us to minimize costs.
Maximize ease of integration in urban planning	This fundamental objective aims to bring together the means and objectives that affect the ease of implementing BGI in urban planning. The type of land ownership affects the ease of BGI implementation (Dagenais et al., 2014; New Jersey Department of Environmental Protection, 2018; Paquin, 2009; Voskamp & Ven, 2015), as it impacts feasibility. This is also the case for maximizing ease of integration into the road network, opportunities from planned works, and integration with existing sites that support BGI implementation. For example, the type of street can inform the type of owner and thus the ease of integrating BGI, and planned new urban developments could be subject to regulations that facilitate the implementation of stormwater management measures. Prioritizing suitable-sized lands also aims at ensuring a sufficient area is available for siting large BGIs, such as constructed wetlands or ponds and lakes.
Minimize conflicts with the built environment	This fundamental objective covers objectives related to the legislative framework to maximize the integration of BGI in the built environment and the regulatory context of the city. Minimizing the attraction of birds in the vicinity of air traffic, considering water infiltration near building foundations, and identifying public utility easement sites are examples of means objectives.

Table D.3.1 Additional information about fundamental objectives (continued)

Fundamental objective	Description
Maximize protection of water resources	A new aspect of the adapted suitability framework is source water protection. In Quebec, combined sewer overflows (CSOs) are an important environmental issue for source protection, which was not included in the original framework since Melbourne is more served by a separate sewer system (Melbourne Water Corporation). In Quebec, CSOs are of particular concern, being the main contributor to the pollution of water intended for supply (Leveque et al., 2021). The addition of an objective for reducing CSOs allows the inclusion of challenges faced by cities according to their stormwater system type in the tool's framework, enabling the crossing of borders between different urban contexts. We also defined two means based on existing decision criteria: reducing impervious surfaces to minimize the pollutant load transported to receiving streams and increasing the fraction of impermeable surfaces managed by BGI to optimize their distribution across the urban area.
Maximize environmental justice	This fundamental objective brings together the means and objectives that aim to prioritize social and territorial equity throughout the city. Variations in the spatial distribution of urban ecosystem values highlight the significance of strategically planning green infrastructure to ensure equitable access to benefits (Kremer et al., 2016). In the original framework, a 'relative wealth' criterion was considered as an opportunity for BGI placement. We decided to move a criterion related to disadvantaged sectors in BGI needs since greening would be all the more critical to supporting social capital (Coutts & Hahn, 2015). Another example is equitable access to recreational green spaces for communities, which can be supported by larger BGI such as constructed wetlands or ponds and lakes.
Maximize population health	Through their aesthetic appeal, BGI could promote the physical and mental well-being of communities (Coutts & Hahn, 2015). To help complement the social well-being objectives provided by BGI, an objective of improving the usability of active and public transport was included. Improving multi-modal travel is a common objective for cities when implementing on-street BGI (Dagenais et al., 2017). While Quebec aims to increase active transportation and achieve more sustainable mobility by 2030 (Ministère des Transports, 2021), the integration of BGI into the urban grid seems to be a measure with potential, considering that it can increase the comfort of pedestrians (Norton et al., 2015), act as barriers between road and pedestrian traffic with vehicles and provide aesthetic spaces (Boucher, 2010). Groundwater vulnerability is especially important to consider for cities that rely on groundwater as a partial or primary source of drinking water, such as 20% of the Quebec population (Rousseau et al., 2004). A mean objective to protect water sources by reducing groundwater vulnerability allows to consider the of BGI on groundwater quality, for example by acting as a pathway for salt into the aquifer (Burgis et al., 2020; CSA Group, 2018), in the location choices. Through the production of oxygen and the sequestration of CO_2 by plants, improvement of air quality is also a health benefit for the population (Gheorghe & Ion, 2011; Giguère, 2009; Hewitt et al., 2020).
Maximize biodiversity	Improvement of nature protection and conservation was defined as a fundamental objective, which is among benefits most often cited by cities when implementing BGI (Dagenais et al., 2011). These objectives of improving greening, preservation of biodiversity and ecological connectedness are applicable to any urban context.
Maximize adaptation to climate change	Improving climate adaptation of cities by strategic planning of BGI passes through reducing exposure of vulnerable populations to flooding and to heat. Vulnerability to hydrometeorological hazards was integrated in the framework to capture the vulnerability of populations exposed to flooding, which is a major issue in the Quebec context (Ouranos, 2018, 2019). The vulnerability of the population to heat islands can be reduced through the implementation of BGI, such as vegetated BGI that help mitigate urban heat islands (Boucher, 2010; Dagenais et al., 2014; Norton et al., 2015), which is also a priority for adaptation to climate change in Quebec (Bureau de normalisation du Quebec, 2012; Giguère, 2009; Gouvernement du Québec, 2012).

D.3.2 Master list of objectives

Using the means-ends network, we reduced the overall number of objectives for the master list from 45 to 37. We decided to not consider six criteria from the original SSANTO's framework, while others were merged with alternate criteria to form objectives. Table D.3.2 presents the rationales why these six criteria were not considered. Figure D.3.1 shows concordance and evolution of criteria to objectives between the original framework of GIS-MCDA tool SSANTO, guidelines, framework of Dagenais et al. (2014), and other literature, across our first three methodological steps.

The four objectives we included in the master from the local decision tree framework (Dagenais et al., 2014) are related to winter conditions, combined sewer overflows, pedestrians safety and travel corridors to be enhanced. We also enhanced the master list with four novel objectives from complementary works of students in the research team, namely related to air quality and to biodiversity (Chalifour-Lemieux, 2023). Based on the review in guidelines for the Quebec's context, we also considered additionnal objectives related to bedrock depth, water sources, and underground infrastructure to broaden biophysical objectives or attributes considered. For example, drinking water vulnerability was added to reflect a key concern in stormwater management for cities all across Quebec, namely in relation to new mandatory requirement from the drinking water intake regulations to conduct source water vulnerability assessments (Gouvernement du Québec, 2020). These guidelines were formulated within distinct contexts from the original GIS-MCDA based PSS SSANTO, facilitating the identification of novel objectives tailored to this new context.

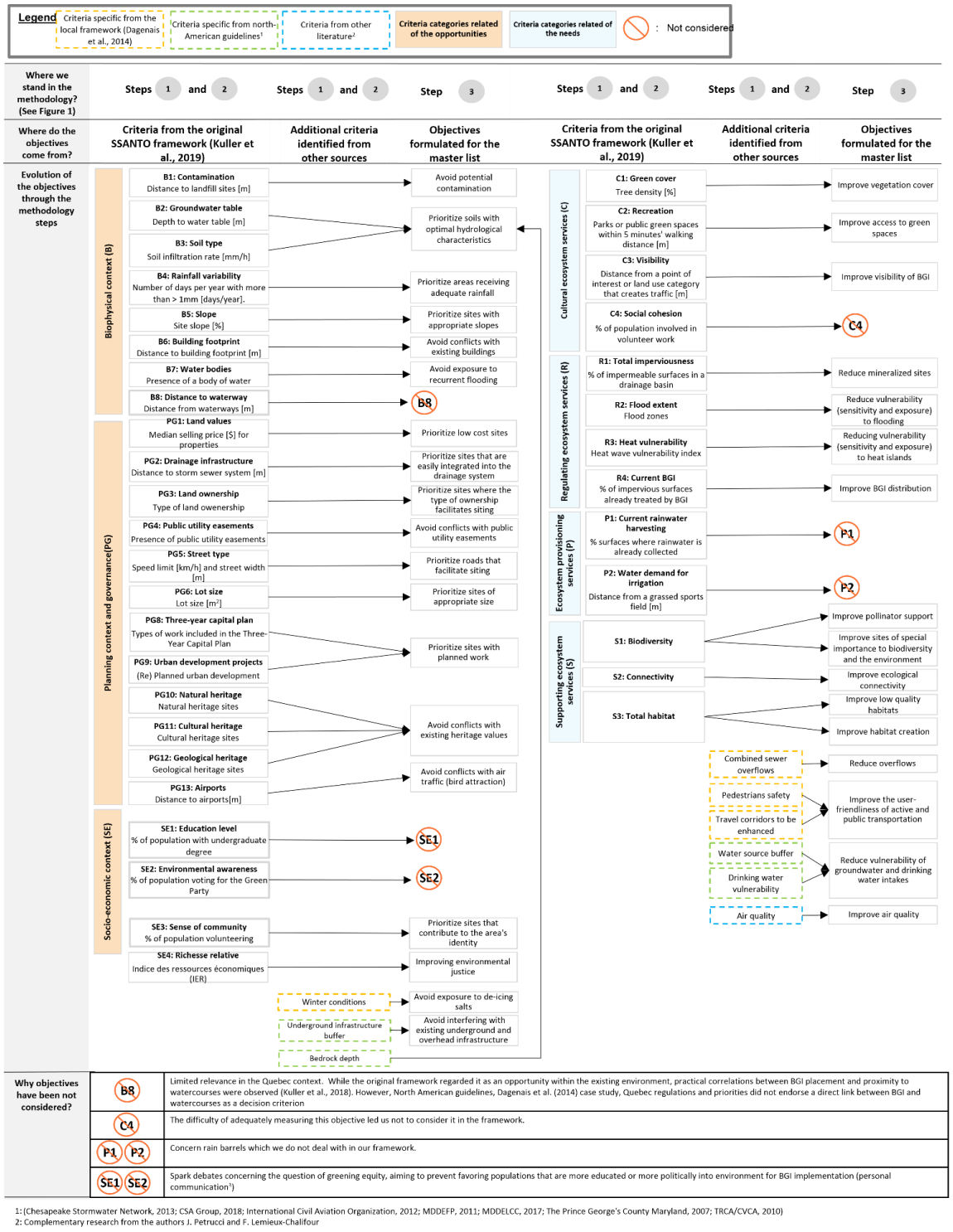


Figure D.3.1 Concordance and evolution of criteria to objectives between: Original framework of GIS-MCDA tool SSANTO, guidelines, framework of Dagenais et al. (2014), and other literature, across first three methodological steps. The last section of the figure depicts the reasons why six criteria of the original SSANTO's framework were not considered.

Table D.3.2 Rationales why criteria from the original GIS-MCDA framework were not considered as values at step 1 of our adaptation methodology

* The abbreviations of the criteria are linked to those in the Figure D.3.1

Criteria*	Rationales
B8 : Distance to waterways	The original framework regarded this criterion as an opportunity within the existing environment, practical correlations between BGI placement and proximity to waterways were observed (Kuller, Bach, et al., 2018). We have not identified any information on BGI close to waterways in north American guidelines, Dagenais et al. (2014) case study, nor Quebec regulations. In fact, stormwater control measures should be located near runoff sources (Walsh et al., 2016).
C4 : Social cohesion	The difficulty of adequately measuring this objective led us not to consider it in the framework.
P1 :Current rainwater harvesting P2: Water demand for irrigation	These criteria were relevant for rain barrels, which we do not include as a BGI type in our frameworks.
SE1 : Education level SE2 :Environmental awareness	These criteria spark debates concerning the question of greening equity, aiming to prevent favoring populations that are more educated or more politically into environment for BGI implementation (Personal communication: expert in political action and civic engagement on environmental matters in urban regions)

D.3.3 Results of the validation and co-creation workshops (1.a and 1.b)

D.3.3.1 Exclusion of objectives from the master list

Table D.3.3 Grid for analyzing the master list objectives following co-creation and validating workshops (1.a and 1.b) with the 37 stakeholders. Four possible changes have been made to the objectives of our master list: excluded, converted as an overlay data, combined with another objective and kept as it was**.**

Legend: % of exclusion votes: ≥ 25% ≥50% : Converted objective as overlay data : Excluded objective □: Objective kept as it was

#↝ : Combined objective (#: indicates the number of objectives with which it has been combined

	State	Objective	Condition 1 % of exclusion votes	Condition 2 Number of participants generated it during individual brainstorms	Condition 3 Has been matched with an objective on a post-it notes	Rationales
Opportunities perspective		**Maximize BGI performance**	n/a	0	No	
	⊘	Avoid potential contamination	27	2	Yes	Objectives proposed by stakeholders mostly favor soil decontamination, rather than a view of protecting BGI from pollution for their performance.
	□	Prioritize soils with optimal hydrological characteristics	16.2	3	Yes	-
	⊘	Prioritize areas receiving adequate rainfall	51.4	1	No	Stakeholders questioned the real variability of precipitation within the same city. More a question of the right plant species resistant to floods and droughts rather than a location choice.
	◈	Avoid exposure to recurrent flooding	24.3	0	No	This is a different objective from the others, since the BGI simply cannot be located in a water body (e.g. lake or river). By considering it as an objective of the hierarchical framework, this objective would be part of the classic MCDA weighting phase in the same way as the others. We decided to add it as an overlay to warn users of a water body or flood-prone areas (i.e. where water flows out of its bed).
	⊘	Avoid exposure to de-icing salts	54.1	0	No	Stakeholders argued that in cold climatic urban areas, it would be too restrictive to consider this objective, since the majority of streets are exposed to de-icing salts. More a question of the right plant species resistant to de-icing salts rather than a location choice.
		Minimize BGI cost	n/a	0	No	
	□	Prioritize sites with appropriate slopes	8.1	3	No	-
	□	Prioritize sites that are easily integrated into the drainage system	18.9	0	No	-
	⊘	Prioritize low cost sites	27	0	Yes	Objective may conflict with social equity, as some stakeholders pointed out that low-cost sites could be at odds with more densely populated, more disadvantaged areas where the co-benefits of BGI would be greatest for the population, but where eco-gentrification is possible and should be avoided.

Table D.3.3 Grid for analyzing the master list objectives following co-creation and validating workshops (1.a and 1.b) with the 37 stakeholders. Four possible changes have been made to the objectives of our master list: excluded, converted as an overlay data, combined with another objective and kept as it was (continued)

	State	Objective	Condition 1 % of exclusion votes	Condition 2 Number of participants generated it during individual brainstorms	Condition 3 Has been matched with an objective on a post-it notes	Rationales
Opportunities perspective		**Maximize ease of integration into the urban form**	n/a	0	No	
		Prioritize sites where the type of ownership facilitates siting	10.8	4	Yes	-
		Prioritize sites of appropriate size	8.1	2	Yes	-
		Prioritize roads that facilitate siting	8.1	6	Yes	-
		Prioritize sites with planned work	0.0	28	Yes	-
	1	Prioritize sites that contribute to the identity of the area	13.5	0	Yes	-
		Minimize conflicts with the built environment	n/a	0	No	
		Avoid conflicts with existing heritage values	29.7	0	No	The angle from which to approach this objective was mixed: some stakeholders justified that we could enhance heritage sites, but on the other hand some argue it can be more complex to set up BGI on these sites, which are sensitive in terms of the alteration of heritage values. Being an overlay, users can be alerted that there's a heritage site without influencing the suitability of the sites.
		Avoid conflicts with air traffic (bird attraction)	32.4	0	No	Kept because it aligns with established guidelines. Possible that participants in workshop 1.b did not feel concerned about air traffic issues as there are no nearby airports in their city boroughs.
	1	Avoid conflicts with public utility easements	18.9	0	No	-
		Avoid conflicts with existing buildings	27	1	Yes	Kept because it aligns with established guidelines.
	1	Avoid conflicts with existing underground and overhead infrastructure	16.2	1	No	-
Needs perspective		**Improve health of urban communities**	n/a	1	Yes	
		Improve the usability of active and public transport	2.7	14	Yes	-
	1	Improve air quality	0.0	7	Yes	-
		Improve territorial equity	n/a	1	No	
		Improve access to green spaces	0.0	10	Yes	-
		Improve educational potential	2.7	15	Yes	-
		Improve social and material equity	0.0	16	Yes	-

Table D.3.3 Grid for analyzing the master list objectives following co-creation and validating workshops (1.a and 1.b) with the 37 stakeholders. Four possible changes have been made to the objectives of our master list: excluded, converted as an overlay data, combined with another objective and kept as it was (continued)

	State	Objective	Condition 1 % of exclusion votes	Condition 2 Number of participants generated it during individual brainstorms	Condition 3 Has been matched with an objective on a post-it notes	Rationales
Needs perspective	[1]	Improve the visibility of BGI	29.7	5	Yes	Since five and 15 stakeholders proposed similar objectives in individual brainstorming (step 2) to address population flow and maximize educational potential, we decided to retain this aspect in the framework.
	[1]	Reduce pollution near industrial areas	5.4	3	Yes	-
		Improve adaptation to climate change	n/a	2	No	
		Reduce vulnerability (sensitivity and exposure) to flooding	0.0	29	Yes	-
		Reducing vulnerability (sensitivity and exposure) to heat islands	0.0	31	Yes	-
		Improve biodiversity	n/a	8	Yes	
		Improve green cover	0.0	11	Yes	-
	[4]	Improve pollinator support	2.7	4	Yes	-
	[4]	Improve habitat creation	2.7	3	Yes	-
	[4]	Improve sites of special importance to biodiversity and the environment	2.7	0	No	-
	[4]	Improve low quality habitats	5.4	2	No	-
	[4]	Improve ecological connectivity	0.0	12	Yes	-
		Reduce pollution of water resources	n/a	3	Yes	
		Reduce mineralized sites	0.0	15	Yes	-
		Improve BGI distribution	16.2	5	Yes	-
		Reduce overflows	0.0	19	Yes	-
		Reduce groundwater and drinking water intake vulnerability	8.1	5	Yes	-

n/a: The higher level objectives were not part of the activity 5 *Individual exclusion votes* of the workshops 1.a and 1.b.

D.3.3.2 Inclusion of new objectives

Stakeholders suggested 161 new ideas, i.e., an objective that differs from those in the master list that was presented to the participants (Table D.2.2). The majority (93%; 149 ideas out of 161) did not meet inclusion *condition 5*, 136 (84%) did not meet *condition 4*, and 126 (78%) did not meet *condition 2*. We found that 78 objectives (48%) were unrelated to a site's need or opportunity for BGI (*condition 1*). Only six objectives (10%) did not pertain to one of the five considered BGIs (*condition 3*). For instance, one participant suggested *retaining rainwater for reuse*, which we considered related to We categorized 40% of the objectives as more related to BGI design than location choice (*condition 6*). Examples include *improving pedestrian visibility* or *reducing the feeling of insecurity*, which may be influenced by factors like plant choice and maintenance. Fourteen objectives (22%) were considered too general (*condition 7*), like *prioritizing sites modified by climate change*, *improving happiness*, or *enhancing the water cycle*. In general, the proposed ideas differed from our master list objectives, with only four overlapping (*condition 8*).

After filtering objectives from stakeholders that did not meet the first two inclusion condition, we examined the remaining 17 objectives (see Table D.3.4 for the analysis grid). Among these, we categorized three as 'dormant' suggesting their potential incorporation into the framework in future research efforts. For instance, the objective to *increase urban agriculture*, although suggested by 11 individual stakeholders (30%) and supported by seven post-it notes in sub-groups, did not align with the functions of the five considered BGIs. Another example is the objective to rehabilitate contaminated sites, proposed by 10 individual stakeholders (27%) and backed by four post-it notes. We considered this could be a specific BGI in the framework, depending on plant choices (phytoremediation).

We decided to conduct further investigations with experts for five objectives that appeared to align with all of our inclusion condition: *maximize parking lots transformation*, *maximize social cohesion, maximize ease of implementation with vacant sites*, *maximize former buried watercourse rehabilitation*, and *encourage BGI implementation upstream of the wetlands*. Although experts acknowledged the relevance of parking lots and social cohesion, they remained in the 'dormant' category of our framework as we could not identify a suitable way to represent them. We explored several measurable attributes but lacked data. Regarding social cohesion, we considered four spatial attributes, but experts were hesitant to choose one due to potential biases and the risk of unintended consequences on equity. Vacant lots were an element that does not necessarily generate an additional opportunity for a BGI site. The link between

buried watercourse or natural wetlands rehabilitation and BGI implementation was unclear to the experts. Additional insights from discussions with these experts are available in Table D.3.5. We added two ideas as new attributes in our frameworks: existing parks to be redevelopment and bowl streets.

Table D.3.4 Analysis grid of the remaining 17 objectives suggested by stakeholders after sorting according to inclusion condition 1 and 2. The suggested objectives are presented in order of times generated by participants.

Legend: □: Inclusion criterion met ⊘: Not retained 💬: Investigated with experts STOP: Dormant

📍: Included as an attribute for an existing objective in the master list

Action	Suggested objectives	**Condition 3** # similar objectives in individual brainstorms	**Condition 4** # post-it with a similar objective	**Condition 5** Concerned current considered BGI	**Condition 6** Design criteria	**Condition 7** Too vague	**Condition 8** Overlap with a mean object
		□: > 1	□: ≥ 1	□: Yes	□: No	□: No	□: No
STOP	Increase urban agriculture and reduce food desert	11	7	No	Yes	No	No
STOP	Rehabilitate contaminated sites	10	4	No	Yes	No	No
📍	Enhance/redevelop/expand existing green spaces	9	1	Yes	No	No	No
💬	Prioritize abandoned or vacant sites	7	3	Yes	No	No	No
⊘	Improve public spaces aestheticism	7	2	Yes	No	Yes	Yes
💬	Maximize the transformation of parking spaces into BGI	6	0	Yes	No	No	No
💬	Ecourage social interaction	6	0	Yes	No	No	
📍	Improve greening/aesthetics of dense and highly dense urban spaces	5	0	Yes	No	No	No
⊘	Improve public participation (target public spaces and places of interest)	4	0	Yes	No	No	Yes
⊘	Maximize the vegetation cover of buildings (walls, roofs, overhanging trees)	1	1	No	No	Yes	No
💬	Prioritize former buried watercourse sites	1	1	Yes	No	No	No
⊘	Reduce the feeling of insecurity	1	0	No	Yes	No	No
⊘	Prioritize sites modified by climate change (e.g. new flooded area)	1	0	No	No	Yes	Yes
STOP	Prioritize flat roof (green roof)	1	0	No	No	No	No
⊘	Identify areas that are not well equipped with water drainage infrastructure	1	0	No	No	No	No
⊘	Reduce pollution around market gardening areas (e.g. barrier hedges)	0	1	No	No	No	No
💬	Encourage BGI implementation upstream of the wetlands	0	1	No	No	No	No

Table D.3.5 Insights from discussions with experts about suggested new objectives or attributes by stakeholders during workshops 1.a and 1.b

*See Table D.2.5 for more information about the experts according to their identification #

Objectives	Identification # of the experts (activity sector)*	Questions asked	Explored spatial attributes (A)	Rationale	Conclusion	Interesting future data layers to develop
Maximize **p**arking **l**ots transformation (PL)	E16 and E17 (independent charity)	**Q1:** Are there any elements to consider that would make it possible to prioritize certain parking lots over others for the implementation of BGI? **Q2:** What spatial data could be used to make this prioritization? **Q3:** Would transforming the parking lots be an opportunity for a BGI or does it meet a need instead?	Parking ratios (PL1), type of parking usage (PL2), parking lot size (PL3), type of parking owners (PL4), indicator of potential for mutualisation of parking spaces (PL5), degree of use of parking lots, or occupancy rate (e.g. 50% used) (PL6)	**Q1:** Minimum parking ratios (i.e., the number of spaces per m^2) are highly contextual and dependent on the project (PL1), making it difficult to generalize. They are based on surface area rather than parking needs, which is the biggest obstacle to greening parking lots. No parking use (PL2) takes priority over another; the issues remain the same. While larger parking lots could be targeted, we do not want to miss out on opportunities, and the issues for smaller parking lots are the same (PL3). The type of owner (private or public) has no impact on the ease of carrying out a BGI project (PL4). There is great potential in the mutualization of parking spaces (i.e., optimizing occupancy time and distributing it over time slots) because parking can be optimized by repurposing spaces for BGIs (PL5). However, the number of owners, communication issues, technology, and the owner's willingness can influence this potential; it is once again contextual. **Q2:** The challenge is to find the information. For example, the degree of use of parking lots or occupancy rate could be very interesting data in the future, but it needs to be created. Parking owners don't know this information. **Q3:** Difficult to choose since it meets the two perspectives.	Dormant objective : No way found to measure it properly	Parking lot occupancy rate
Maximize ease of implementation with **v**acant **s**ites (VS)	E2, E21, E22, E19 and E20 (municipal)	**Q1:** Would targeting vacant sites as an opportunity for implementing BGI be relevant?	Presence of vacant sites (VS1)	**Q1:** The aim is to implement as many BGIs as possible, everywhere, on both existing and non-existing sites. The value of this objective was thus questioned. According to the owner of the vacant lot, prioritizing these sites may be a trap and might not necessarily be an opportunity for BGI implementation.	Dormant objective : No way found to measure it properly	-
Maximize former **b**uried **w**atercourse rehabilitation (BW)	E14 (academic)	**Q1:** What would be the link between a BGI plant and the digging up of ancient watercourses in an urban environment?	Distance upstream of the watercourse (BW1)	**Q1:** The link between the restoration of ancient watercourses and the establishment of BGI is unclear, unless a new integrated BGI in the framework is the watercourse itself. The problem is to re-establish a water source, a source that is not too polluted, because the original watershed no longer exists. A possible solution is to use street runoff, which a BGI could filter before supplying the unearthed stream.	Not considered: The link with BGI implementation is not clear	-

Table D.3.5 Insights from discussions with experts about suggested new objectives or attributes by stakeholders during workshops 1.a and 1.b (continued)

Objectives	Identification # of the experts (activity sector)*	Questions asked	Explored spatial attributes (A)	Rationale	Conclusion
Encourage BGI implementation upstream of the wetlands (W)	E14 (academic)	**Q1:** Is it a practice that would be encouraged to install BGI upstream of wetlands? If so, do you think it would be to supply water to wetlands to minimize their drying out, or rather to improve the quality of the water found in wetlands? **Q2:** How could we spatially measure this objective? Is there any data?	Topography (W1), conditions of the wetlands (W2), wetlands type (W3)	**Q1**: In urban areas, there aren't many natural wetlands. Urban areas, such as Quebec's metropolis, have greatly modified wetlands. It's difficult to restore the hydrological regime. The main point to consider is: what is the water source in a natural wetland? It could depend on where it would be advantageous to install a BGI upstream of a natural wetland. For example, if a wetland receives less water than it should due to altered hydraulic conditions, why not channel rainwater from a BGI to supply it with water? The challenge is to bring in water, and BGI is not necessarily the best way to do it. The link with BGI is unclear. For water quality, it depends on the water source. If rainwater is the source, then the water does not have to be treated. If it's water with some pollution (from streets), this could be a way to improve the water before it reaches the wetland. When the water source is known, we need to determine if the BGI is useful in between. However, it would be on a case-by-case basis. **Q2:** The topography would be interesting to understand the path of the water's gravitational flow to the wetland and to identify the upstream (W1). In the case of the objective, we need to know if there is a water source and what the condition of the wetlands is (W2). Wetland type would not influence their prioritization for restoration (W3). A natural environment that is already protected may be of great value, but it is not necessarily the one with the greatest potential for restoration. The value of the wetland would thus not necessarily be a good way to measure its value. A combination of factors would probably be necessary; for example, if the water source is on the surface and identifiable, and if it is known to be polluted, then implementing a BGI could be considered.	Not considered: The link with BGI implementation is not clear. Complex question.
Maximize social cohesion (SC)	E12 and E13 (research institution)	**Q1:** What proxies do you think would make it possible to spatially measure the lack of social cohesion within an urban area?	Public insecurity (SC1), green alleys, community and collective gardens (SC2), voter turnout rate (SC3), and the number of community organizations (SC4)	**Q1:** A suggestion is to use data on insecurity in public spaces (SC1). This would make it possible to target areas for improving social cohesion. This is also in line with Hong et al. (2018), which states that "neighborhood social capital," including social cohesion and social interactions, is correlated with the presence of street trees and access to parks when the neighborhood is safe for pedestrians. However, there may be a link between social cohesion and the feeling of security, but the link with BGI implementation is difficult to establish. Green alleys, community and collective gardens (SC2) (especially collective ones, since people do not just have a plot of garden to themselves but maintain the gardens collectively), could be interesting. The use of proxies is, however, imperfect. Perhaps with several proxies, we could arrive at a reasonable estimate of social cohesion. Sometimes proxies like voter turnout rate (SC3) or the number of community organizations (SC4) are biased proxies since the high turnout rate will depend on education, accessibility, etc. Often, these are areas with more needs, so we don't want to say "there is already social cohesion and we avoid them." There is a risk of creating perverse effects with this objective.	Dormant objective : No way found to measure it properly

Table D.3.5 Insights from discussions with experts about suggested new objectives or attributes by stakeholders during workshops 1.a and 1.b (continued)

Objectives	Identification # of the experts (activity sector)*	Questions asked	Explored spatial attributes (A)	Rationale	Conclusion
Minimize exposure to urban flooding (F)	E15 (municipal)	**Q1:** Could bowl areas streets be managed by BGI to minimize urban floods? **Q2:** Would we prefer to implement a BGI at the bottom of the bowl, like a water sump, to catch the water, or upstream to intercept the water before it enters the bowl? **Q3:** Could the depth of the bowl be an indicator for prioritizing sites? **Q4:** Could sewer backup complaints be an interesting attribute for minimizing exposure to urban floods?	Presence of a bowl area in streets (i.e. where the street is located in a depression in relation to the surrounding areas; F1), complaints (F2)	**Q1**: Urban flooding means managing large volumes of water. Other types of retention, such as free play areas in parks, could be interesting, or sending the water from the basin elsewhere. We want to minimize exposure by redirecting the water to a place of lesser impact, rather than leaving it there; perhaps it could be done with swales. For bowl streets, the issue is really linked to topography and the redevelopment of public spaces. One efficient solution would be to redirect roof water to a rain garden rather than to the street to reduce sewer network overload. Not only in the public domain but also considering the characteristics of the private domain. **Q2:** It would depend on the BGI type. A constructed wetland or trees would probably be more interesting on the bowl street, but a BGI like bioretention upstream of the bowl. The aim is to reduce the impact on people. Unplugging residential roofs could be effective, for example. **Q3:** Very important element. A depth of 1000 mm in the bowl is generally targeted as a problematic area, but it could still be possible to manage 200-300 mm of depth with a BGI. It is this head of water that needs to be managed. One suggestion would be to use BGI up to a depth of 1000 mm and consider that beyond this depth, an alternative solution needs to be considered. However, this is a question that needs to be discussed with hydraulic engineers. **Q4:** The other concern is about how to minimize the impacts on residents and what is the most cost-effective solution for house protection. If the bowl area does not cause any damage, this is less of a priority. A lot of complaints in the bowl areas are received, because that is where there is the most sewer backup. The type of building really matters. There are three types of claims: surface flooding, basement seepage and roof sewer backup. For surface flooding, BGI implementation could play a role. However, the volumes involved are so great. In those moments, the sewer network would be rapidly saturated. It is this short period that is problematic. One suggestion would be to consider a buffer zone around the surface flooding complaints to implement a BGI. The expert, however, was not able to specify a buffer zone distance around a bowl area for implementing a BGI.	Attribute included in a non-final and optimal way pending further investigation

D.3.4 Objectives hierarchy for BGI planning

Table D.3.6 Summary of discussions from expert's consultation about measurable attributes for objectives framework

*The numbering of the objectives refers to that presented in the frameworks, in Figure 4.5 and Figure 4.6

**See Table D.2.5 for more information about the experts according to their identification #

# objective*	# expert**	What could influence suitability sites for BGI implementation?	Discussion points
3.1_Ease_Tenure	E5	Regulatory and hierarchical structure of the city (administrative subdivisions)	Depending on the political and geographic structure of the city, it may be easier to locate BGI on private land than on municipal land, where the regulatory and hierarchical structure may complicate the process. For example, in a city divided into smaller administrative subdivisions, it may be easier to incorporate BGI projects on private lots since they may be subject to additional stormwater retention rules in the planning regulations. In contrast, a city with a single administrative entity will have more authority over municipal lands.
2.2_Ease_Lots	E2	Available space on a lot	Experts underlined that it was not the size of the plot that mattered to them, but the percentage of building footprint vs. available space. If they were able to set this up at the regulatory level, this would be the data they would use to advocate for BGI implementation. The attribute proposed by the experts also aimed to make the link with the drainage area of the basin to be managed on the land (e.g., the size of the BGI is a function of the percentage of runoff to be treated on their land).
3.2_Ease_Road	E2	Current street design vs city road design guide; Types of streets;	Certain types of streets may be more conducive to the location of BGIs. For example, an arterial street, which is more central in the city and wider, may offer more opportunities for siting. Another criterion for assessing the level of opportunity for a street is whether or not the current street design meets the city's road design guide. If the guide is met with the street in its current state, it is difficult to consider incorporating other aspects into its design. If the street needs to be modified to meet the guide criteria, then it is easier to add stormwater management through BGI. Streets where no new greening is planned, therefore, have a lower level of opportunity. New streets with planned medians or overhangs may represent good opportunities, especially if tree planting is planned.
3.3_Ease_Works	E5	New developments because of new streets and buildings; Type of planned urban works; Regulatory and hierarchical structure of the city (administrative subdivisions)	It is easier to implement BGI in new developments because of new streets, new buildings, and regulations that may allow greening or impose stormwater discharge criteria. Planned urban works are also very good opportunities, such as sewer work that is usually accompanied by street redesign. Some types of new constructions or redevelopments are more likely than others to incorporate BGIs, such as public buildings that are points of interest (e.g., arenas, libraries, etc.). Parks are generally the easiest sites where to implement BGI, both for cities with a single administrative entity and for those subdivided into multiple administrative entities.

Table D.3.6 Summary of discussions from expert's consultation about measurable attributes for objectives framework (continued)

# objective	# expert*	What could influence suitability sites for BGI implementation?	Discussion points
5.1_Water_Imp	E9	Types of impervious surfaces	The distinction between types of impervious surfaces is interesting to make. For example, a roof is impermeable but may be directly connected, so it is different from a parking lot. The very fine resolution of this attribute enables us to see in detail what type of surface is interesting. It is valuable to have information at different scales (i.e., the percentage of impermeable surfaces in the urban catchment remains interesting).
5.2_Water_CSO	E9, E10, E11	Chemical risk potential for drinking water intake protection; Level of microbial index within a urban drainage basins;	The use of a single criterion, such as overflow frequency, may bias the assessment of the level of risk for drinking water intakes and recreational sites, as an overflow structure may be characterized by a high overflow frequency but associated with a low population urban drainage basin and therefore may not be of high risk. Consideration of microbial load, related to the population, and riparian distance are therefore important criteria to consider. The microbial contamination index would be an appropriate indicator to guide the placement of BGIs (e.g., prioritize urban drainage basins where the microbial index is most problematic).
9.1_Clim_Flood	E15	Location of hollow areas in "bowls"; Community vulnerability;	The topography of the land can influence the accumulation of water, such as in hollow areas or "bowls." To reduce urban flooding, locations within cities that direct runoff to these bowls should be targeted. This decision criterion can be viewed from the "physical" perspective of flood reduction, and from the "social" perspective of community vulnerability.
5.1_Equi_Access	E12, E13	Distance to a park or the travel time to a park;	The original attribute measuring the criterion of access to green spaces was boolean; presence or absence of a park at less than 500 meters. Experts argued that a continuous attribute would better represent our objective; i.e., the distance to a park or the travel time to a park would be more appropriate.
7.1_Health_Transp	E4, E8	Presence of areas where citizens already use active or public transportation; Presence of areas where there is active and public transportation infrastructure (e.g., bike lanes or sidewalks).	Greenery and BGIs could increase the attractiveness of active and public transportation, as well as improve the usability of these trips. Areas where citizens already use active or public transportation and areas with active and public transportation infrastructure (e.g., bike lanes or sidewalks) should be prioritized for the implementation of BGIs.
8.2_Bio_Connect	E7	Proximity to existing natural areas to increase the size and reduce the isolation of habitats; Presence of degraded areas that are close to other natural environment.	In general, habitats in urban areas are already highly fragmented, and it would be preferable to favor sites that are attached to, near, or connect existing natural areas to increase the size and reduce the isolation of habitats, rather than creating small isolated green spaces in the urban matrix. Increasing biodiversity through BGI should be emphasized in degraded areas that are close to other natural environments.

Table D.3.6 Summary of discussions from expert's consultation about measurable attributes for objectives framework (continued)

# objective	# expert*	What could influence suitability sites for BGI implementation?	Discussion points
Overlays			
Heritage sites	E3	Presence of heritage sites (natural, cultural, geological, etc.), no matter the type, bring additional assessments and complicates the process;	The ease or complexity of implementing BGIs does not vary according to the type of heritage (natural, cultural, geological, etc.). These are "sensitive" sites, but interventions are not prohibited as long as they are integrated as well as possible and do not conflict with the heritage value. However, these sites require additional assessments, which complicates the BGI implementation process. For example, it would be easier to implement a BGI on a non-heritage-listed or classified site.
Other elements discussed, not included in the frameworks			
Winter conditions	E14	Speed of cars for atmospheric dispersion of salts (salt spray); Application rate of de-icing salts; Concentration of salts in water in kg/m^2; Type of streets; Prioritization snow removal from a street.	The higher the speed of cars on a road, the greater the atmospheric dispersion of salts (salt spray). Attributes such as the application rate differentiated by street type and the concentration of salts in water in kg/m2 would be relevant in judging the suitability of a site for BGI placement. However, it may be difficult to measure the rate of salt application, especially since some individuals also apply salt to impervious surfaces on their property. Thus, one possible indicator is the type of streets to inform the type of vehicles and speed of traffic to limit the exposure of BGIs to salts. For snow, prioritization of snow removal can help target sites where used snow is removed most quickly, which could represent preferred sites for implementation.
Irrigation demand	E5	Location source of the demand for irrigation water; Cost and type of drinking water source supply in the city;	The propensity to irrigate public lands with stormwater may depend on the cost and type of potable water supply in the city. For example, there could be more incentive to use stormwater to irrigate in a dryer climate and if groundwater is at a low level. for a city with minimal potable water costs, it may appear less cost-effective to irrigate with stormwater than with potable water, as environmental benefits of saving potable water using a fit-for-purpose water quality approach remain difficult to monetize. A city that obtains its drinking water from groundwater may wish to preserve its groundwater levels, and stormwater irrigation may be attractive. In these cases, it would be relevant to know where the demand for irrigation water is coming from in order to prioritize those locations for placing water harvesting BGIs.
Lot prize	E1	Assessment role; Transaction prices;	Assessment role and transaction prices are good proxies for land pricing.

D.3.5 Value scales

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst).

Legend: # objective | Refers to the numbering presented in the objectives hierarchy frameworks in Figure 4.5 and Figure 4.6
Unit| m: meters; %: percentage
Source | G: Guidelines, [1]: The Prince George's County Maryland (2007), [2]: MDDEFP (2011), [3]: MELCC (2018), [4]: CSA Group (2018), [5]: MDDELCC (2017), [6]: Chesapeake Stormwater Network (2013); Expert's consultation #: Refers to Table D.2.3
BGI | BR: Bioretention & rain gardens; IS: Infiltration Systems; S: Swales; W: Wetlands; P: Ponds & lakes
Shape | N-L: Non-linear; L: Linear
Dir | Direction of the value scale; ↑: Positive correlation between attribute value and suitability score, i.e. as attribute value increases, so does suitability score, ↓: Negative correlation between attribute value and suitability score, i.e. as attribute value increases, suitability score decreases.

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
1.1_Perf_Soils	Soil type	–	Categorical	Expert's consultation A	BR, IS, S	N-L	1	Class 6: sandy (sand, gravel)	–	Sand infiltrates well.	▪ Assumption: Soft deposits are at least 3 feet deep. ▪ Soil layer thickness: If a soil layer is deep, the soil type is less important. For a very thin soil layer (less than 1 meter), it is crucial to know the type. ▪ Soil structure: Soil structure can be important to understand for a clay soil type since, depending on the soil structure around it, water could still infiltrate. ▪ There is greater uncertainty for soil types that do not have sand due to unknown local variability. Where there is sand, even with local variability, there will not really be any difference in infiltration.
							1	Class 7: sandy (sand, some gravel)	–	If there is "little gravel", the soil is less permeable.	
							0.5	Classes 1, 2a, 3: mixed sediments (mostly till)	–	If we consider that these are "mixed sediments" and therefore reworked, then we can expect the soil to be less compact.	
							0.4	Class 4: clay (clay, silt, some sand)	–	This class does have sand in its composition.	
							0.1	Class 9: clay (peat, marl)	–	Not as bad as classes 5 and 8.	
							0	Class 5: clay (clay, silt)	–	Classes 5 and 8 could be ranked equally since the difference would depend on the structure, so they receive the same score. Not as bad as class 8 because of the till interspersed.	
							0	Class 8: clay (clay, silt)	–	Classes 5 and 8 could be ranked equally since the difference would depend on the soil structure.	
	Bedrock depth	m	Boolean	G[3]	BR, IS, S	n/a	1	≥ 3	↑	Roc must be at least one meter below the infiltration basin bed. Must be deeper than 3 meters if we consider an average depth of 2 meters for a typical bioretention (TRCA/CVCA, 2010).	–
							0	< 3			
1.2_Perf_Ground	Groundwater table depth	m	Boolean	G[1, 2]	All	n/a	1	≥ 3	↑	Depth of the groundwater should be more than 3 meters from the ground surface, considering that the MELCC suggests a distance of 1 meter or more between the water table and the underside of a bioretention (MELCC, 2014) and considering an average depth of 2 meters for a typical bioretention (TRCA/CVCA, 2010).	–
							0	< 3			

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
2.1_Cost_Topo	Percentage of slope	%	Continuous	Expert's consultation B	BR, IS	N-L	1	2	↑	At 1% or 2%, that's when it is best.	▪ Assumption: A continuous slope is assumed over the entire cell surface. ▪ Swales are easier to implement on steep slopes than bioretention. ▪ It would be interesting to cross-reference the topography in elevation (m) with the slope of the tributary basin.
							1	1.5			
							0.9	0		A slope of 0% is not the best case, it is not as good as having a little slope, but it is still not as bad as having a big slope.	
							0.75	5	↓	From 3% upwards, it starts to cost more.	
							0	20		From 20% to more, the rating is 0.	
					W, P	N-L	1	0	↓	0% slope would be the best possible case, since we want the water to be retained.	
							0.9	3		Between 0% and 3% is feasible, but at the same time it's more expensive to have a 3% slope than a 0% slope. The difference in suitability between 0% and 3% should be less than between 3% and 5%.	
							0	5		A slope greater than 5% would be impossible for those systems and would thus cost more.	
2.2_Cost_sewer	Distance to catch basins and storm or combined sewers	m	Continuous	Expert's consultation B	BR, IS	N-L	1	0	↓	The further we are from the sewer, the higher the cost. We can place our BGI at 0 meters, below the pipe, so it would be the case.	▪ This objective would only be where there is a connection with the sewers or catch basins; otherwise this objective is not necessary. ▪ In general, connection with catch basins and BGI is not performed, only with sewer lines. In specific urban contexts (such as in case study 2), catch basins are connected to BGI.
							0	∞		There is no "maximum" distance.	
3.1_Ease_Tenure	Type of owner	–	Categorical	Expert's consultation C	BR, IS	N-L	1	Municipal	–	Land already owned by the city are the easiest.	▪ The value scale depends on the urban context. For example, experts from case study 2 did not think this classification applied to their case. ▪ It depends on the available space on the lot, as well as the owner, because the city would not be able to impose regulations, for example, if the available space does not allow it.
							0.75	Provincial government (and school service centers, etc.)	–	As far as the government is concerned, the city have some negotiating power. For schools, they have no more or less leeway. Nevertheless, exchanges with the provincial government are easier than the private sector, because it usually works with partnerships without regulation. Often, the provincial government has the same sustainable development objectives as cities.	
							0.5	Private: commercial	–	On private, commercial land, it is easier than residential land at the regulatory level. Asking commercial developments to implement a BGI, since they have more land and more parking, would be easier than on private residential land. It is more difficult on commercial than on governmental land. The internal politics would be difficult, but at the regulatory level it would be feasible.	
							0.15	Private: residential	–	On private, residential land, the city still has a certain amount of power. It is quite complex, but it is not impossible (with regulations, for example).	
							0	Federal government	–	Cities have no power over federal lands (e.g. oil pipelines, railways, ports, etc.).	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
3.1_Ease_Tenure	Type of owner	–	Categorical	Expert's consultation C	W, P	N-L	1	Municipal		Land already owned by the city are the easiest.	–
							0.5	Provincial government (and school service centers, etc.)		There's something to be done on sites like Hydro-Québec, MTQ, etc. They have their hands tied.	
							0.1	Private: commercial		It is not really possible to make these types of BGI on commercial land, but impossible. Episodic rather.	
							0	Private: residential		It is not really possible to make these types of BGI on residential land.	
							0	Federal government		Cities have no power over federal lands (e.g. oil pipelines, railways, ports, etc.).	
3.2_Ease_Road	Street type	–	Categorical	Expert's consultation B	BR, IS	N-L	1	Pedestrian street		Easier to implement on a pedestrian street.	▪ Assumptions: (1) We assume that the BGI will be located on the road right-of-way; (2) The value scale is from an "administrative" point of view (e.g., regulations, authorizations, etc.), rather than from a "technical" point of view (e.g., the width of the street) or from a "maintenance" point of view (e.g., access). ▪ For the experts consulted, the size of the street makes no difference. ▪ The value scale depends on the urban context; for example, experts from case study 1 emphasized that it could depend more on the right-of-way design standards of the road classes and the available right-of-way. They have local streets where they have a design guide for paving surface vs. right-of-way surface, which indicates the available right-of-way for other purposes. It is a case-by-case basis in their view, and each city decides what they want to do with their street design guides.
							1	Local		Easy on a local street.	
							1	Arterial		It could be more complicated on an arterial street, but it depends. It requires authorizations since it is inter-borough, whereas on a local street you don't need authorization.	
							1	Maritime link		–	
							1	Access to isolated communities		It is feasible, but from an administrative point of view it is probably more complicated. Maintenance would also be more difficult if it is isolated.	
							1	Access to resources		–	
							1	Transit collector		–	
							1	Municipal collector		Municipal streets are easier than a provincial thoroughfare.	
							0.9	Regional		Perhaps a little more complicated when it's national or regional, since there are several owners.	
							0.9	National		Perhaps a little more complicated when it's national or regional, since there are several owners.	
							0	Highway		On the highway, we would not put a BGI on the right-of-way.	
							n/a	Classless		The "no class" category would be given the same suitability rating as the street category next to it. *Not on a viaduct	
3.3_Ease_Works	Presence of planned development projects	–	Boolean	Expert's consultation C and B	All	n/a	1	Presence	–	Regulations favoring the installation of a BGI on a new development lot (e.g. require a certain % of BGI).	▪ Land for new developments does not belong to the city, so the will of the owners is essential.
							0	Absence	–		

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
3.3_Ease_Works	Planned work	–	Categorical	Expert's consultation C	BR, IS	N-L	1	A: No intervention, maintenance or preventive maintenance	–	–	▪ These are categories of an intervention plan for water, sewer and road assets of a city. ▪ With the exception of resurfacing work and lining work (the pavement is not touched, because it is structural), whenever there is work to be done, it is a good opportunity. As soon as the street is opened up, it is an opportunity.
							1	C: Intervention desirable	–	–	
							1	D: Immediate attention	–	–	
							0	B: Studies or surveys required	–	–	
		–	Boolean	Expert's consultation B	All	n/a	1	Presence of planned work	–	In general, if the work is on the three-year capital plan, it will facilitate (e.g. opening up the street).	▪ Suitability would not be influenced by category of work, any type of work could be an opportunity. ▪ Presence of planned work could include works on-street sewer or aqueduct pipe, on public buildings or spaces (multisport centers, public swimming pools, theater, library, etc.), on parks, on public roads (intersections, sewer system improvements), on walking and cycling paths, on parking lots, etc.
							0	Absence of planned work	–		
2.2_Ease_Lots	Percentage of the free area of the plot	%	Continuous	Expert's consultation B	W, P	L	1	30% of land occupied (70% left for BGI)	↓	If there is 70% or more of the lot left, it is possible, and the size of the BGI will be adjusted accordingly.	* *The suggested attribute values are arbitrary and serve as an initial reflection on the attribute.*
							0	80% of land occupied (only 20% left vacant)		If the building takes up 80% or more of the land and so that only 20% is left vacant, it doesn't matter which BGI we use, it would not be really possible.	
4.1_Conflict_Build	Building footprint distance	m	Boolean	G[1]	BR, IS	n/a	0	3	↑	Minimum horizontal separation distance (m) from building foundation.	▪ Experts said at less than 4 meters, it is still possible, but it is recommended not to put trees (to avoid roots to pierce the membrane), and a geomembrane is necessary between the BGI and the building.
					W, P	n/a	0	7.62	↑	It is recommended that the perimeters of constructed wetlands be situated at a distance of 25 feet (7.62 meters) away from building foundations, if possible.	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
4.2_Conflict_Inf	Presence of a public utility	–	Boolean	Expert's consultation B and G[4]	All	n/a	0	Presence	–	At the moment, BGI are not built over public utilities. One reason is because if work is planned on the public utilities, the BGI would have to be removed in case of works. Interference with underground utilities should also be avoided, particularly for water and sewer lines. However, this approach could change, as some stakeholders are open to the idea of installing BGIs above public utilities, albeit with certain precautions.	▪ The utilities concerned are underground electrical and gas services. ▪ It would not be impossible to implement it directly above, but in case of planned underground work, the BGI would have to be removed. ** In the coming years there will probably be an evolution on the vertical distance allowed between BGI and public utilities (research projects are currently underway on this subject).* **It may depends of the city context.*
							1	Absence	–		
	Horizontal clearance to sewer and water pipes	m	Boolean	Expert's consultation B and C G[4,5]	All	n/a	0	1.5	↑	BGI like bioretention should be more than 1.524 meters horizontally from a storm drain, or wet utility lines.	▪ Underground infrastructures include: aqueducts and sewers in materials that can corrode (e.g. ductile iron, reinforced concrete, metal and concrete pipes). The required clearance depends on the pipe material. For example, PVC pipes do not require this clearance. For the moment, the clearance only applies to water and sewer pipes (gas pipes are only a vertical distance, so not directly above). ▪ This clearance is mainly due to de-icing salts in winter, to corrosion and also to roots clogging the passageway. **The experts mentioned that this clearance was one of the biggest obstacles to the implementation of BGI, and that research is needed to re-evaluate this 1.5-meter distance since it is very conservative value.*

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
3.3_Conflict_Air	Distance to airports	m	Continuous	G[6] and (Kuller et al., 2019)	W, P	L	0	1000	↑	Usually, a circle with a radius of 13 km is deemed sufficient for implementing an efficient wildlife management strategy.	▪ Water bodies can pose a specific danger due to their strong attractiveness for birds. On airport premises, the presence of exposed water should be eradicated or reduced to the maximum extent, according to the following guidelines.
							1	1300			
5.1_Water_Imp	Type of impervious surfaces	–	Categorical	Expert's consultation H	All	N-L	1	20: Asphalt	–	Asphalt is the worst because it retains heat, which heats the runoff. It is where the most pollutants are found like hydrocarbons, heavy metals generated by heavy vehicles, or micro-plastics. They come from degraded roads in cities. Remove the source of runoff and replace it with BGI would be the best.	–
							0.75	50: Concrete	–	–	
							0.6	53: Paving stone	–	It is more permeable than concrete.	
							0.5	70: Non-vegetated	–	It could be because vegetation does not naturally grow there, an industrial zone, or a very compacted soil. The level of imperviousness is uncertain, so an average score is assigned.	
							0.4	52: Aggregate	–	From this category, the suitability scores is linearly scaled down to 0.	
							0.3	100: Buildings (roof)	–	–	
							0.2	110: Buildings (green roof)	–	It is already a BGI. However, they could be improve since there is a limit to how much water a building can retain, eventually it will run off, and often it is not the whole roof that is green.	
							0.1	51: Gravel	–	Gravel is still permeable, so water infiltrates.	
							0	60: Green island	–	–	
							0	80: Vegetated	–	Although the type is unknown, it is vegetated.	
							0	65: Tree pit	–	The tree retains rain and intercepts up to 30% of it, so it is very good. We do not want to replace it.	
							0	54: Granite	–	If we think of granite as the rock that comes out of a mountain, then we do not want to replace it by BGI.	
							0	90: Water surface	–	Not applicable.	
							0	1: Not classified (shaded areas)		Not classified by the layer's creators, so we can't classify them ourselves.	
							0	11: Not classified (untreated areas)		Not classified by the layer's creators, so we can't classify them ourselves.	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
5.1_Water_Imp	Impervious surfaces percentage per urban catchment	%	Continuous	Expert's consultation H	All	L	0	Minimum % observed	↑	The minimum and maximum will depend on the range of attribute value on the urban area. If there is 0% impervious surface, it is going to be the lowest priority. Keep it linear for suitability scores. Keep it simple.	▪ We can include impervious surfaces such as asphalt, pavement, concrete and buildings (roofs).
							1	Maximum % observed			
	Runoff coefficient	–	Categorical	Expert's consultation H	All	N-L	0.83	Commercial-Downtown: 0.7 to 0.95	–	The higher the runoff coefficient, the higher the priority would be. There is no 0, because there is always the possibility of runoff. We can use the average runoff coefficient values of the ranges as a rating of suitability, which is already a prioritization.	▪ This attribute could be useful for cities that do not have access to the detailed impervious categories data. Runoff coefficients are a good substitute, because it is derived from the type of impervious surfaces detected.
							0.75	Industrial-Heavy: 0.6 to 0.9	–		
							0.68	Residential-Townhouse: 0.6 to 0.75	–		
							0.65	Industrial-Light: 0.5 to 0.8	–		
							0.6	Residential-Apartment block: 0.5 to 0.7	–		
							0.6	Commercial-Suburbs: 0.5 to 0.7	–		
							0.5	Residential-Semi-detached units: 0.4 to 0.6	–		
							0.4	Residential-Detached houses: 0.3 to 0.5	–		
							0.33	Residential-Suburban house: 0.25 to 0.4	–		
							0.28	Playgrounds: 0.2 to 0.35	–		
							0.2	Fields: 0.1 to 0.3	–		
							0.18	Parks, cemeteries: 0.1 to 0.25	–		
5.3_Water_Distrib	Percentage of urban drainage managed by existing BGI	%	Continuous	Expert's consultation H	All	n/a	–	–	–	The aim is to implement as many BGI as possible. According to the expert, it is not a problem to have several BGI close together, and thus prioritizing urban drainage watershed that have less BGI is not relevant. There is no "minimum distance" between BGI, so a concentration of systems should not be avoided. BGI distribution is more interesting from a social equity point of view.	▪ Suggestion from the expert: (1) look at network density (length of sewer network) vs. existing BGI. If there is less sewer density, higher priority; (2) measure the BGI deficit to be filled, i.e. the % of treatable vs the % of existing BGI. We could see the potential vs. the availability.

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
5.2_Water_CSO	Priority level of an urban drainage basin	–	Categorical	Expert's consultation H	All	N-L	1	Urban catchments (UC) associated with an overflow system (OS) that directly affects bathing and recreation sites	–	Where there are official bathing sites, this is a priority.	▪ This attribute was developed for this project by a PhD student (Petrucci, J.)
							0.85	UC with OS directly affecting drinking water intake	–	Drinking water intakes rank second in priority and the scores would not be linear. There would be more emphasis on water uses, and the other classes would have a lower score.	
							0.4	UC associated with OS directly affecting uncontrolled bathing AND recreation sites	–	Not knowing uncontrolled bathing sites, would be priority to put discouragement measures like awareness signs, etc. but to implant BGI no. If it is an uncontrolled site, maybe one day it will become an official site. It is a major risk, but from a BGI perspective it is not the highest priority. Lower than drinking water intakes for suitability rating.	
							0.35	All other UC linked to an OS, but which do not have a direct impact on a bathing area, recreational area or drinking water intake (not in the immediate or intermediate area)	–	–	
							0.35	Remainder of UC areas not linked to OS (infiltration of water in these UC areas at source can reduce runoff and therefore overloading in the network)	–	–	
							0	Not applicable: (network separated)	–	Includes pseudo-separating and unitary networks, so no priority.	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
6.1_Equi_Vis	Distance to point of interest	m	Continuous	Expert's consultation D	BR, IS, S	N-L	1	0	↓	The best possible distance would be 0 meters. There is no detour to get there.	▪ Assumptions: 1) A visual distance is considered; 2) The distance is according to a person that would be outside, on the site of the point of interest. * *Value scales are centered on the "health argument* ▪ The values are not based on scientific knowledge, but more on personal judgement as you imagine yourself moving around a point of interest. Experts gave these values with a lot of reservations. ▪ The value scale would depends on a lot of factors, such as where you are on the site of the point of interest, what the obstacles are, whether you are inside the building, and so on. Distance may also depend on the point of interest.
							1	50		Between 0 and 50 meters, it could be constant because you can still see the BGI.	
							0.75	112.5		Since they don't have any data in mind on this subject, they suggest a linear function that decreases the further away you are, up to 300 meters.	
							0.5	175			
							0.25	237.5			
							0	300		At 300 meters you have to walk and move around a bit to see the BGI. It would be maybe a 3 to 5 minutes' walk, so not that far. 300 meters is also the value of the original SSANTO value scale.	
					W,P	N-L	1	0	↓	The best possible distance would be 0 meters.	
							1	300		These BGI are more spectacular, and there is more wildlife. The constant plateau could be moved up to 300 meters (but that depends on the quality of the system) since it is still accessible. Most people go for the point of interest, so between 0 and 300 meters, it is a visual distance where you can see the BGI, and after that people could move around a bit.	
							0.75	525		Linear after 300 meters till 1200 meters.	
							0.5	750			
							0.25	975			
							0	1200		A distance of 1200 meters would correspond to a maximum of 15-minute walk[1]. With an average walking speed of 4.8 km/h, you get 1200m. It is still accessible from the point of interest, but you can't see it from the point of interest - you have to move around.	
	Population density per distribution area	Inhabitant/km^2	Continuous	Expert's consultation D	All	L	1	Maximum density observed in a distribution area over the urban area	↑	From the point of view of visibility, without the constraints, the denser it is, the more people take advantage of it.	
							0	Minimum density observed in a distribution area over the urban area		The lower the density of people, the less the benefits can be felt by the population, so the closer to 0.	

[1] In cities, it is advisable to plan open green spaces at a maximum 15-minute walking duration of residents (Reyes et al., 2014). Research indicates that walking speeds can vary, ranging from 4.5 km/h to 5 km/h (Morar et al., 2014). This is why we have opted for the commonly used average speed of 4.8 km/h.

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information					
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale		Rationale
							Score	Attribute value	
6.1_Equi_Vis	Land use type (per CUBF code)	–	Categorical	Expert's consultation D	Br, IS, S	N-L	–	**7: Cultural, recreational and leisure activities**	Rank #1.
							1	72: Public gatherings	Lots of people going.
							1	76:Parks	It is more inclusive, I do not have to pay.
							1	74:Recreational activities	Uses that are also good for your health.
							0.8	71: Exhibition of cultural objects	Exhibition halls, art galleries, libraries: a higher rating because these sites can be free, and therefore more inclusive.
							0.25	73: Entertainment	If it is amusement parks, karting, golf, not too interesting. Especially if you have to pay, it is less accessible.
							0.25	75:Tourist center and group camp	In terms of visibility, it is very targeted. Not so much people are going.
							0	79:Gambling and other cultural activities	In the aim of not encouraging gambling and make these sites more attractive.
							–	**6: Services**	Rank #2.
							1	68:Educational services	Schools, universities, CEGEPs, etc.
							0.8	69:Miscellaneous services	Religious activities, foundations and organizations: People hang out at these places.
							0.8	65:Professional services	In the case of health services, people may be more distressed and therefore less able to take advantage of them than schools, for example. Also includes social services.
							0.25	60:Office buildings	Everything from office buildings, business services, repair services, finance and real estate, government and construction is classified at the same level. It is a special clientele, people do not really see from their offices necessarily.
							0.25	61:Finance, insurance and real estate services	
							0.25	62:Personal services	
							0.25	63:Business services	
							0.25	64:Repair services	
							0.25	66:Construction services	
							0.25	67:Government service	
							–	**5: Commercial**	Rank #3.
							0.5	54: Retail sale of food products	A lot of people will frequent these shops, so it is more of an essential business. On the other hand, it depends: it could be a food store with finer products.
							0.4	59:Other retail activities	Pharmacies, SAQ, antique shops, booksellers, sports experts. Because there are drugs and pharmacies, the suitability score would be higher.
							0.25	50:Shopping centers and commercial buildings	All on the same level, except for food because we have no choice but to go. Since you have to pay to access these shops.
							0.25	52:Building products and hardware retailing	
							0.25	53:General merchandise retailing	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information							Value scale information		
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale		Rationale
							Score	Attribute value	
6.1_Equi_Vis	Land use type (per CUBF code)	–	Categorical	Expert's consultation D	Br, IS, S	N-L	0.25	56:Retail sale of clothing and accessories	All on the same level, except for food because we have no choice but to go. Since you have to pay to access these shops.
							0.25	57:Retail sale of home furnishings and related equipment	
							0.25	58:Accommodation and food services	
							0	51:Wholesale	–
							0	55:Retail sale of vehicles and related products	We do not want green washing, because of the risk of pollution.
							–	**4:transport, communications and utilities**	Rank #4.
							0.8	41: Railroads and subways	Subway exits can be very interesting. What is "collective" would get a higher rating. People can see it, but people should be able to stop, not just at the curb, but at the exits.
							0.4	46: Vehicle parking lots and garages	Parking lots are a big draw, but it depends on the parking. People do not hang around in parking lots, sometimes people park and go away for a long time, they do not stay there.
							0.25	42: Motorized transport (infrastructure)	Includes bus transport, so a slightly higher score. Collective" would receive a higher score. But it also includes truck transport, so less. Heavy-vehicle network. Same as public roads.
							0.25 *S: 1*	45: Public roads	Highways, arterial roads, etc. On streets it is good too, but visibility depends on the type of street. A not-so-high mark, because if people are just passing by quickly and the BGI is on the side of the road, it does not really give great visibility. *For swales, the suitability score would be 1.
							0.10	47: Information and cultural industries	Communication, network and broadcast centers, film industries, etc. Although it is a service, in terms of visibility, nobody really frequents these places. Not 0, because there may be employees.
							0	43: Air transport (infrastructure)	–
							0	44: Maritime transport (infrastructure)	–
							0	48: Public services (infrastructure)	Waterworks, sewers, power transmission, etc. People do not necessarily go there.
							0	49: Other transport, communications and utilities (infrastructure)	If it is antennas, it is 0. (We assume telecom offices are in services)
							–	**1: Residential**	Rank #5. It is only the locals who will benefit. Visibility is very local.
							1	15: Shared dwelling	Any infrastructure with multiple residences is very suitable. Since it also includes seniors' residences. It also includes rooming houses, student residences and orphanages.
							0.15	10: Dwelling	Other categories are not ideal for visibility. Benefits to few people.
							0.15	12: Mobile home, trailer	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information					
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale		Rationale
							Score	Attribute value	
6.1_Equi_Vis	Land use type (per CUBF code)	–	Categorical	Expert's consultation D	Br, IS, S	N-L	0.15	16: Residential hotel and motel	Other categories are not ideal for visibility. Benefits to few people.
							0.15	17: Trailer or mobile home park	
							0.15	18:Temporary residence	
							0.15	19:Other residential buildings	
							0	11: Cottage or vacation home	Cottages and temporary homes benefit only one or a few people. Not enough people benefit.
							–	**2-3:Manufacturing industries**	Rank #6. It is more local, there are benefits, but it is more for the employees, there is less traffic, so it is ranked lower for the visibility issue. People go to work and then they leave. There are other environmental benefits, but not for visibility.
							0	All	–
							–	**8:Production and extraction of natural resources**	Rank #7. Normally, people do not really go to these sites. Visibility is 0.
							0	All	–
							–	**9:Undeveloped buildings and bodies of water**	Rank #8. Visibility is 0.
							0	All	–
					W, P	N-L	1	**7: Cultural, recreational and leisure activities** **Except 79: 0*	It is more in this category that the BGI should go. It is really this category that would maximize the visibility.
							0	**6: Services**	Not applicable.
							0	**5: Commercial**	Not applicable.
							0	**4:Transport, communications and utilities**	–
							0.1	**1: Residential** **Except 15: 0.5*	–
							0	**2-3:Manufacturing industries**	Not applicable.
							0.7	**8:Production and extraction of natural resources** **Except 85: 0*	More space. Could be good practice to have these systems in these spaces. Less people though. From the point of view of demonstrating good practices and raising awareness, even if it is a restricted clientele, it is a more targeted and less general public visibility. We want to make these people more aware, for example in agriculture, for a certain public.
							0.7	**9:Undeveloped buildings and bodies of water** **Except 94, 95, 98: 0*	More for conservation and enhancement to make them visible and attractive. Not a 0 for sure. For the well-being and visibility of these spaces.

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information								
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
6.2_Equi_Disadv	Index of material and social disadvantage (IDMS) per diffusion area (DA)	–	Categorical	Expert's consultation D	All	N-L	1	DA materially and socially disadvantaged	–	Completely disadvantaged population, highest priority.	▪ Supplementary interesting information would be location of social housing, or cooperative. It would not overlap with the disadvantage index, since the need and the solution are not necessarily in the same place. This is often a population that does not have access to quality outdoor green spaces.
							0.75	DA socially advantaged but materially disadvantaged		Higher priority when the population is materially disadvantaged, than socially disadvantaged.	
							0.75	DA with average disadvantage		Moderately disadvantaged; they are still disadvantaged. It is average on both counts.	
							0.25	DA materially advantaged but socially disadvantaged		When you have money and are materially advantaged, you have more access to resources, so it could be less of a priority.	
							0	DA materially and socially advantaged		The population is not disadvantaged, the least priority. In the interests of equity, they should not be targeted.	
							0	Empty-Data not available		No data available.	
5.1_Equi_Access	Distance to an existing green space or public park	m	Continuous	Expert's consultation D	W,P		1	1200	↑	This would be a walking time in minutes, i.e. a maximum of 15 minutes' walking. With an average walking speed of 4.8 km/h[2], this gives 1200m. A "distance" of 15 minutes is the "feasible" limit. For a human, it is more a question of time. At 15 minutes, we feel that it is no longer "accessible", that it is no longer a park we're going to use every day.	▪ It also depends on the type of park. If you have a 1-hectare park, you might not be willing to move for a 15-minute walk, but a park that's bigger might be, or like a linear park that can take you somewhere else. ▪ Assumption: 1) Populations of different ages are considered for the average walking speed used to convert minutes into meters; 2) We imagine that the BGI provides a quality living space as well, a multifunctional space.
							0.75	975		Linear after that up to a 15-minute walk, so the further you have to walk to reach the park, the greater the need for the BGI.	
							0.5	750			
							0.25	525			
							0	300		From 0 to 300m it's considered very accessible, and therefore already suitable. The ideal would be to have a park less than 300 meters away. So those who have access to a park less than 300 meters away would not have priority. Beyond 300 meters, it's no longer really considered "nearby".	
							0	0			

[2] In cities, it is advisable to plan open green spaces at a maximum 15-minute walking duration of residents (Reyes et al., 2014). Research indicates that walking speeds can vary, ranging from 4.5 km/h to 5 km/h (Morar et al., 2014). This is why we have opted for the commonly used average speed of 4.8 km/h.

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
7.1 Health Transp	Distance to active transportation infrastructure	m	Continuous	Expert's consultation F	BR, IS, S	N-L	1	0	↓	The "best distance" is 0 meter, i.e. either directly adjacent to the transportation infrastructure. A BGI continues along it. As soon as you leave the bike path, the BGI will no longer be really profitable.	▪ It was considered like a visual distance, up to which you can see the benefits of the BGI. How far can a BGI benefit cyclists or pedestrians?
							0.9	30		So from 0 to 30 meters is ideal, you can still take advantage of the shade, etc. and then the suitability rating goes down linearly until 100 meters. From 0 to 30 meters you can take advantage of the BGI, then the further away you are, the less you benefit.	
							0.5	50		At 50 meters, we could be at 0.5 suitability rating.	
							0.25	75		Linear down to 100 meters.	
							0	100		There is a possible limit. A distance of 100 meters could represent the distance between 2 intersections on a city bike path (on average intersections are about 250 meters apart). If we are traveling in a straight line, for example, and can see a BGI every 200-300 meters.	
	Bicycle lane separator type	–	Categorical	Expert's consultation F	BR, IS, S	N-L	1	P-Floor marking	–	The priority location would be the cycle path that does not already have a delineator and that is not isolated and simply has a pavement marking.	
							0.75	D-Delineator		With a delineator, a car could still pass over the cycle track between two delineators, i.e. less safe.	
							0.75	J-Jersey		Jersey is still safe, but it is not visually appealing, so we might want to replace it with a BGI. Jersey not user-friendly, like delineator.	–
							0.25	S-Elevation		Elevation is more difficult to modify and visually more attractive than a delineator, for example.	
							0.1	C-Fence		The fence is considered permanent.	
							0	M-Mail		The concrete or planted mail already protects the bike path completely, it is the lowest-priority type.	
	Distance from public transit infrastructure	m	Continuous	Expert's consultation F	BR, IS, S	N-L	1	0	↓	The best possible case is 0 meters, as you get more out of the BGI waiting at the bus stop, for example, if you are right next to it.	
							1	6		Ideally, for example for a tree, we should have one every 5-6 metres (in the old days, it was about every 10 metres). Below 6 meters, it is less desirable. But this 6-meter value is personal, and depends on the type of tree, the district, etc.	
							0.8	10			
							0.75	15		At 15 metres, it is still profitable.	–
							0.5	20		20-30 metres is still a reasonable distance when you are waiting a long time at a stop, so there could be a fairly high score around that range. A plateau between 20 and 30 meters. You can still enjoy it, even if you do not take advantage of the shade, for example.	
							0.5	30			
							0	50		Up to 50 meters, it descends linearly.	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
7.2_Health_Air	Air quality index	–	Categorical	Expert's consultation I	All	N-L	1	Poor (over 50)	–	If we forget the other issues, we prioritize the Poor level.	–
							0.75	Acceptable (26 to 50)		It is still a priority to put in an area where air quality is poorer.	
							0.25	Good (1 to 25)		–	
							0	No value		No data available	
	Street types	–	Categorical	Expert's consultation I	BR, IS		1	Highways	–	Highways are the types with the highest volume of traffic, speed and flow.	▪ Congestion is a major problem, as stationary vehicles that have to stop, restart and then stop again, generate a lot of particulates, because the brakes are over-solicited. The distance travelled also has an impact. Repeated friction situations.
							0.9	National			
							0.9	Regional		Regional roads are big streets too. Go by size and type of road where there is a lot of traffic.	
							0.9	Artery		In an urban environment, arteries are major roads.	
							0.7	Maritime link		Lots of traffic and congestion on bridges.	
							0.6	Municipal collector		–	
							0.6	Transit collector		–	
							0.5	Local		–	
							0.5	Pedestrian street		Streets closed to traffic. However, pedestrian streets are often adjacent to major streets and arteries, so the placement of BGI can have a positive impact.	
							0.1	Access to resources		These are remote locations. Even if they are big trucks, there is generally less population, so less impact on the population in terms of air pollution.	
							0.1	Access to isolated communities		Few people use them. Private roads	
							0	No class		–	
7.3 Health Drink	Buffer zone around water source	m	Boolean	G[1, 5]	BR, IS	n/a	0	30	↑	A minimum distance of 30 metres[1] or 30.50[5] meters should be maintained from Category 1 and 2 water supply intakes between the bioretention area and a water supply well.	▪ There is also the Quebec's Regulation on water withdrawal and protection specifying a 30-metre protection zone[7]. ▪ Experts from case study one confirmed that no infiltration into the well recharge zone is permitted.
	Buffer zone around septic tanks	m	Boolean	G[1,5,4]	BR, IS	n/a	0	10	↑	A minimum distance of 10 metres must be maintained between stand-alone wastewater treatment systems and an infiltration system.	▪ To prevent cross-contamination, a gap of 15.24 meters[5] or 35 feet (10.668 meters)[4] between a septic system area and the bioretention system is also recommended, except in cases where septic systems are specifically designed to handle surface water.

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
7.3 Health Drink	Presence of contaminated sites	–	Boolean	G[1]	BR, IS	n/a	0	Presence of contaminated site	–	Infiltration of stormwater should not happen in areas such as former technical landfill sites, contaminated locations, and similar sites. Inappropriate for industrial or commercial sites where the potential for significant sediment or pollutant release exists.	–
8.1_Bio_Green	Vegetation cover (threshold with NDVI)	–	Categorical	Expert's consultation E	BR, IS, S	N-L	1	1. NDVI < 0.3 and MNH < 3.0m = Low mineral (road, parking)	–	Demineralizing has a greater impact than placing a BGI in an area of low vegetation. This will create new habitats.	
							0.5	3. NDVI ≥ 0.3 and MNH < 3.0m = Low vegetation (crops, grass)		An area of low vegetation can be further improved (this is the most "feasible" category, but not the one with the greatest impact). A score of 0.5 because the impact of demineralizing (i.e. rank 1) is at least double that of installing BGI on low vegetation.	
							0	4. NDVI ≥ 0.3 and MNH ≥ 3.0m = High vegetation (canopy)		High vegetation is already the biggest canopy you could wish for, so adding a BGI would not add as much to a site. We do not want to replace high vegetation with low vegetation with the implementation of a BGI. So in terms of improving this site, adding a BGI would not help. We do not want to change the type of cover.	
							0	5. Aquatic		Not realistic to install a BGI in an environment such as a lake. We do not want to replace the water with plant cover either.	
							0	2. NDVI < 0.3 and MNH ≥ 3.0m = High mineral (buildings)		Mineral high would be the worst because it is simply not really feasible to put those BGI.	
					W, P	N-L	1	1. NDVI < 0.3 and MNH < 3.0m = Low mineral (road, parking lot, etc.)	–	The only category where we could improve the site by introducing those BGI, with a view to improving the plant cover, would be the low mineral.	–
							0	3. NDVI ≥ 0.3 and MNH < 3.0m = Low vegetation (crops, grass, etc.)		The addition of those BGI will have no impact on vegetation cover.	
							0	4. NDVI ≥ 0.3 and MNH ≥ 3.0m = High vegetation (canopy)			
							0	5. Aquatic		If we assume that we want to create a BGI, and not just add vegetation to existing bodies of water, we do not want to replace these sites with constructed wetlands for example. Perhaps we could improve them slightly, but normally we do not want to target an existing water body.	
							0	2. NDVI < 0.3 and MNH ≥ 3.0m = High mineral (buildings)		As with bioretention, high mineral is simply not feasible.	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information							Value scale information				
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
8.2 Bio Connect	Conservation priority for ecological corridors	–	Categorical	Expert's consultation E	BR, IS, S	L	0.5	2.76 - 5.00: Very high priority	–	Bioretention is not the BGI that is most likely to improve ecological connectivity, hence the score of 0.5. This BGI corresponds less to the habitat needs of the species selected for the development of these data.	▪ The value scale was drawn up by considering which type of BGI is most likely to meet this objective, judging the performance of the BGI in meeting the objective. The category ranking for the different BGI would be the same, since they perform the same functions in terms of ecological connectivity, but the difference would be in their relative impact. ** So the extreme values of the value scales are not 1 and 0 here.*
							0.4	2.08 - 2.76: High priority		Linear for other categories. We do not know the soil cover (high mineral, low mineral, etc.), so it is hard to judge how much we would have improved the site, but the idea is to say that if the site has been classified as a low priority, then adding something will not really have a big impact after all.	
							0.3	1.39 - 2.08: Medium priority			
							0.2	0.70 - 1.39: Low priority			
							0.1	0.00 - 0.70: Very low priority		If we change the soil cover to bioretention, it is probably better than what was there, so the suitability score wouldn't be 0.	
					W, P	N-L	0.8	2.76 - 5.00: Very high priority	–	Constructed wetland improve ecological connectivity. Still, there is a need for access to environments like wetlands.	▪ At the Quebec scale, all categories are possible. For a city that would not have all the categories, we can only "normalize" the values on the local scale, i.e,. maintain the same scale of values and "equal" vouchers between categories.
							0.65	2.08 - 2.76: High priority		Linear grading for other categories.	
							0.5	1.39 - 2.08: Medium priority			
							0.35	0.70 - 1.39: Low priority			
							0.2	0.00 - 0.70: Very low priority		Putting in a constructed wetlands is still better than putting in a bioretention system, so the suitability score would be a little higher than 0.1.	
											▪ The value scales depend on the habitat requirements of the species concerned. The target species are: the large shrew (Blarina brevicauda), American marten (Martes americana), striped salamander (Plethodon cinereus), wood frog (Rana sylvatica) and black bear (Ursus americanus).

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
8.2 Bio Connect	Habitat conservation priority	–	Categorical	Expert's consultation E	BR, IS, S	L	0.5	0.00 - 0.20: Very low priority	–	The potential gain is higher if we have a site with a very low conservation priority, which are unimportant sites such as sidewalks, herbaceous land, which do not contribute to habitat conservation.	–
							0.25	0.20 - 0.40: Low priority		–	
							0	0.40 - 0.60: Medium priority		Medium priority is a fairly important area for conservation, so we'd leave the suitability score at 0 to avoid replacing this habitat once again with bioretention.	
							0	0.60 - 0.80: High priority		We do not want to change strong and very strong cosnervation priority sites to bioretention, which are in fact already very high quality habitats.	
							0	0.80 - 1.00: Very high priority		Since we're talking about habitat conservation priorities, when you have a very high priority, you don't want to replace that habitat with one of lower quality. Bioretention is not very important in terms of the habitats it provides	
					W, P	L	0.8	0.00 - 0.20: Very low priority	–	The impact is greater if a marsh is located in a very low-priority zone.	
							0.6	0.20 - 0.40: Low priority		–	
							0.4	0.40 - 0.60: Medium priority		–	
							0	0.60 - 0.80: High priority		As with bioretention.	
							0	0.80 - 1.00: Very high priority		As with bioretention.	
9.1_Clim_Flood	Level of vulnerability to flooding due to runoff	–	Categorical	Expert's consultation G	BR, IS, S	N-L	1	Very high vulnerability	–	A score of 1 until average vulnerability.	▪ The value scale was created for 2 different datasets, each with a different number of categories.
							1	High vulnerability			
							1	Medium vulnerability			
							0.6	Moderate vulnerability		–	
							0.2	Low vulnerability		–	
							0	Very low vulnerability		–	
							n/a	Missing data		–	
					W, P	L	1	Very high vulnerability	–	–	
							0.8	High vulnerability		The wetland can capture water, but perhaps a little less.	
							0.6	Medium vulnerability		–	
							0.4	Moderate vulnerability		–	
							0.2	Low vulnerability		–	
							0	Very low vulnerability		–	
							n/a	Missing data		–	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
9.1_Clim_Flood	Level of vulnerability to flooding due to runoff	–	Categorical	Expert's consultation G	BR, IS, S	N-L	1	Major	–	–	▪ The value scale was created for 2 different datasets, each with a different number of categories.
							1	High		–	
							0.8	Moderate		–	
							0.4	Minor		–	
							0	Non-Significant		–	
							n/a	Missing data		–	
					W, P	N-L	1	Major	–	–	
							0.6	High		–	
							0.4	Moderate		–	
							0.2	Minor		–	
							0	Non-Significant		–	
							n/a	Missing data		–	
	Presence of a bowl area	–	Boolean	Expert's consultation H	W, P		1	Presence of bowl area with a depth of 1000 mm and more	–	There are places where we could put BGI in the bowl, like wetlands.	–
9.2_Clim_Heat	Relative temperature difference classes	–	Categorical	Expert's consultation G	BR, IS, S	L	1	9 (high heat island potential)	–	Category 9, bioretentions can maximize heat island reduction.	
							1	8		Also with a suitability rating of 1, since these are heat islands.	
							0.9	7		Linear between categories.	
							0.7	6			
							0.5	5			
							0.3	4			
							0.1	3			
							0	2 (islands of freshness)		The suitability score would also be 0, since these are also islands of freshness.	
							0	1 (islands of freshness)		Category 1 is the minimum.	
					W, P	N-L	1	9 (high heat island potential)	–	Those BGI are larger and the water still provides cooling.	
							1	8		–	–
							1	7		–	
							1	6		–	
							0.6	5		–	
							0.4	4		–	
							0.2	3		–	
							0	2 (islands of freshness)		The suitability score would also be 0, since these are also islands of freshness.	
							0	1 (islands of freshness)		Category 1 is the minimum. Adding these BGI will not make any difference.	

Table D.3.7 Value scales according to the objectives and the attributes of the spatial suitability frameworks for BGI planning. The discrete attributes are shown in the order in which the categories were classified by the experts (i.e. from 1, which is the best rank, to the worst) (continued).

Attribute information				Value scale information							
# objective	Attribute	Unit	Type	Source	BGI	Shape	Value scale			Rationale	Additional information
							Score	Attribute value	Dir		
9.2_Clim_Heat	Level of vulnerability to heat waves	–	Categorical	Expert's consultation G	BR, IS, S	N-L	1	Very high vulnerability		–	▪ The value scale was created for 2 different datasets, each with a different number of categories.
							0.8	High vulnerability		–	
							0.6	Medium vulnerability		–	
							0.6	Moderate vulnerability		–	
							0.4	Low vulnerability		–	
							0	Very low vulnerability		Bioretention has little effect if vulnerability is very low.	
							n/a	Missing data		Ideally, we'd go and find the data for the missing data, or interpolate it to see if there's a very high vulnerability all around, and if the center has missing data, maybe consider it as a very high vulnerability too.	
					W,P	N-L	1	Very high vulnerability		–	
							1	High vulnerability		–	
							1	Medium vulnerability		–	
							0.5	Moderate vulnerability		–	
							0.2	Low vulnerability		–	
							0	Very low vulnerability		–	
							n/a	Missing data		–	
					BR, IS, S	N-L	1	Major		–	
							0.8	High		–	
							0.6	Moderate		–	
							0.2	Minor		–	
							0	Non-Significant		–	
							n/a	Missing data		–	
					W,P	N-L	1	Major		–	
							1	High		–	
							0.5	Moderate		–	
							0.2	Minor		–	
							0	Non-Significant			
							n/a	Missing data			

ANNEXE E SUPPLEMENTARY MATERIAL, ARTICLE 2: UNCOVERING STAKEHOLDER PREFERENCES FOR URBAN BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE SITING: INSIGHTS FROM ONLINE SWING WEIGHTS ELICITATION

Journal: Cities (under revision by the journal)

Title: Uncovering stakeholder preferences for urban blue-green infrastructure siting: Insights from online swing weights elicitation

Authors : Sandrine Lacroix [a], Martijn Kuller [b,*], Alice Aubert [c], Danielle Dagenais [d], Françoise Bichai [a]

[a] *Department of Civil Engineering, Polytechnique Montréal, 2900, boul. Édouard-Montpetit, Montréal, QC, Canada*

[b] *Copernicus Institute of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands*

[c] *ZHAW School of Life Sciences and Facility Management, Institute of Natural Resource Sciences, Zurich, Switzerland*

[d] *Faculté de l'Aménagement, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada*

*Corresponding author email address: m.kuller@uu.nl (M.Kuller)

E.1 Stakeholder profiles participating in the swing weights elicitation workshops

Table E.1.1 Stakeholder profiles participating in the swing weights elicitation workshops

BR: Bioretention | IS : Infiltration systems | S : Swales | W: Constructed wetlands | P&L: Ponds & lakes | T: Trees
#: An identification number starting with 1, referring to the preliminary case study and starting with 2, referring to the main case study.
*: Stakeholder common to both case studies

#	Participating organization	Organizational scope	Description of role	Field of study	Type of BGI in the completed questionnaires		
					BR, IS, S	W, P &L	T
1.A	City of Trois-Rivières	Municipal	Engineer	Civil and water engineering	X	X	
1.B	City of Trois-Rivières*	Municipal	Engineer	Water engineering	X	X	
1.C	City of Trois-Rivières	Municipal	Stormwater engineer	Civil engineering	X	X	
1.D	City of Trois-Rivières	Municipal	Urban Engineering	Civil engineering	X	X	
1.E	City of Trois-Rivières	Municipal	Road planner	Civil engineering technique	X	X	
1.F	City of Trois-Rivières	Municipal	Head of Planning Division (Engineering)	Civil engineering	X	X	
1.G	City of Trois-Rivières	Municipal	Urban Engineering Coordinator	Civil engineering	X	X	
1.H	City of Trois-Rivières	Municipal	Environmental Supervisor	Geography & Environmental Studies	X	X	
1.I	City of Trois-Rivières	Municipal	Public Participation Coordinator	Sociology & History	X	X	
1.J	City of Trois-Rivières	Municipal	Drinking water specialist	Medical biology and environment	X	X	
1.K	City of Trois-Rivières	Municipal	Landscape architect	Landscape Architecture	X	X	
1.L	City of Trois-Rivières	Municipal	Head of the Sustainable Development Division	Biology	X	X	
2.A	Borough 1, City of Montreal	Municipal	Ecological transition planning consultant	Environmental sciences		X	
2.B	NPO for ecological corridors development	Municipal	Biologist, urban Biodiversity consultant and research fellow	Biology and landscaping	X	X	X
2.C	Borough 3, City of Montreal	Municipal	Municipal infrastructure project management engineer	Municipal construction engineering	X		
2.D	Community garden	Municipal	Garden president	Urban studies in plant biology		X	X
2.E	City of Montreal, water department	Municipal	Section manager/executive	Civil engineering		X	X
2.F	City of Trois-Rivières	Municipal	Environmental specialist-biologist	Biology		X	X
2.G	City of Trois-Rivières*	Municipal	Engineer	Water engineering	X		X
2.H	NPO for environmental protection	Regional	Responsible for nature-based solutions	Nature-based solutions and BGI	X	X	
2.I	NPO for environmental issues	Gouvernmental	Biodiversity sector coordinator	Biology	X	X	
2.J	City of Montreal	Municipal	Landscaping consultant and architect	Architecture	X		X
2.K	Urban planning and landscape architecture firm	Local and municipal	Planning design specialist	Environment and urban planning	X	X	
2.L	Public health expertise and reference center	Provincial	Scientific consultant	Environmental Geography - BA, Urban Studies - MA	X		X
2.M	Ministry of the Environment, the Fight against Climate Change, Wildlife and Parks	Provincial	Engineer	Civil engineering and biology	X	X	
2.N	NPO for urban infrastructures	Municipal	Project manager	Hydraulics and urban infrastructure management		X	X
2.O	Borough 2, City of Montreal	Municipal	Public works director	Management	X		X
2.P	NPO of community cafeteria	Municipal	General manager	Management	X	X	
2.Q	Public health expertise and reference center	Provincial	Scientific consultant	Public health	X		X
2.R	Biodiversity consulting firm	Municipal and provincial	Director of science and research	Landscape geography and ecology	X	X	
2.S	NPO for regional climatology and adaptation to climate change	Provincial and international	Adaptation science coordinator	Land use planning, GIS, risk management	X	X	
2.T	City of Montreal, ecological transition department	Municipal	Planning consultant	Climate change adaptation and community resilience		X	X

E.2 Hierarchies of objectives used to elicit stakeholder weights

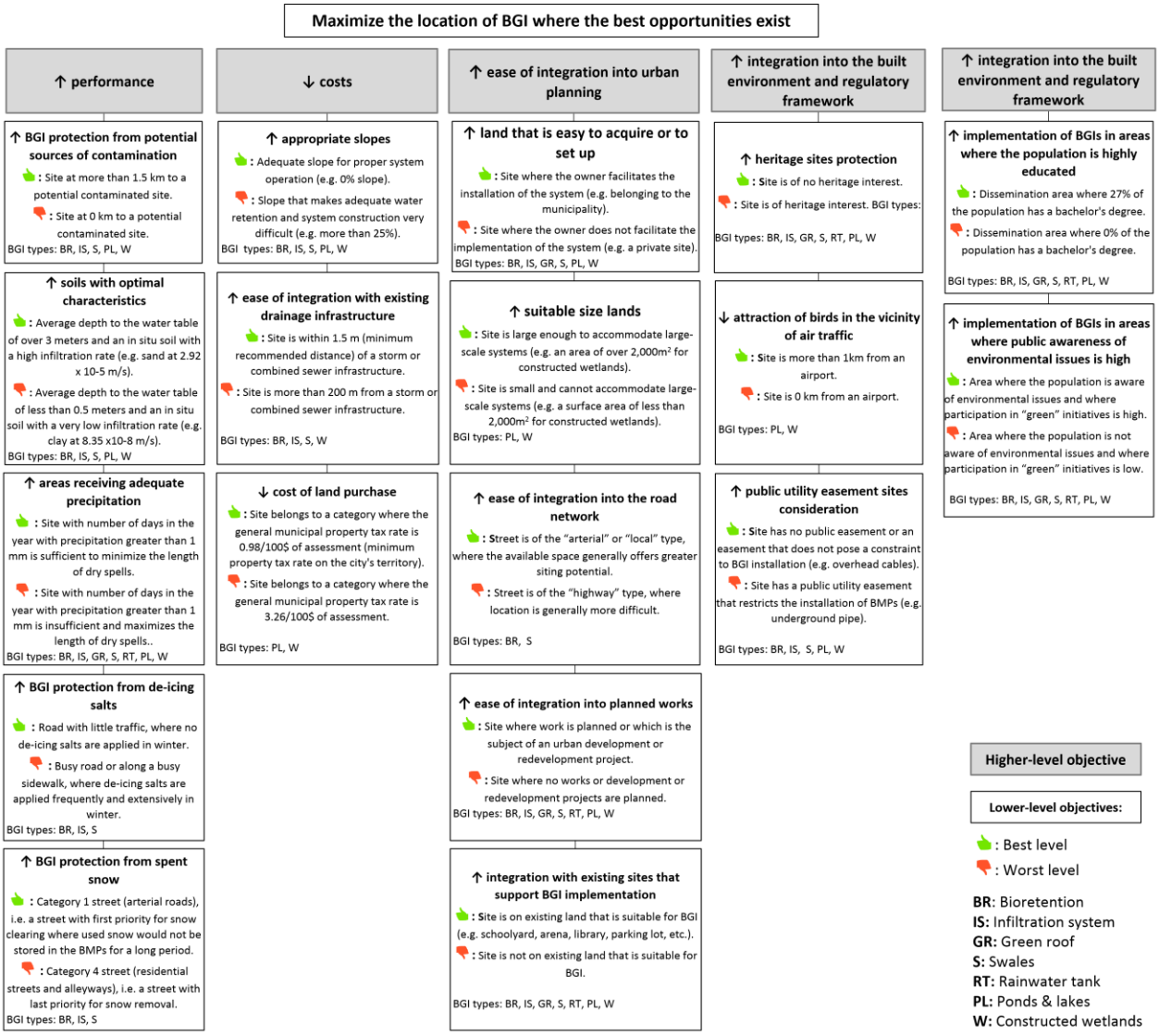


Figure E.2.1 Preliminary case study: Hierarchies of objectives for small BGI systems (bioretention, infiltration system and swale, hereafter referred to as group A), large BGI systems (constructed wetland and pond & lake, hereafter referred to as group B), green roofs and rainwater tanks for strategic BGI spatial planning related to opportunities suitability perspective.

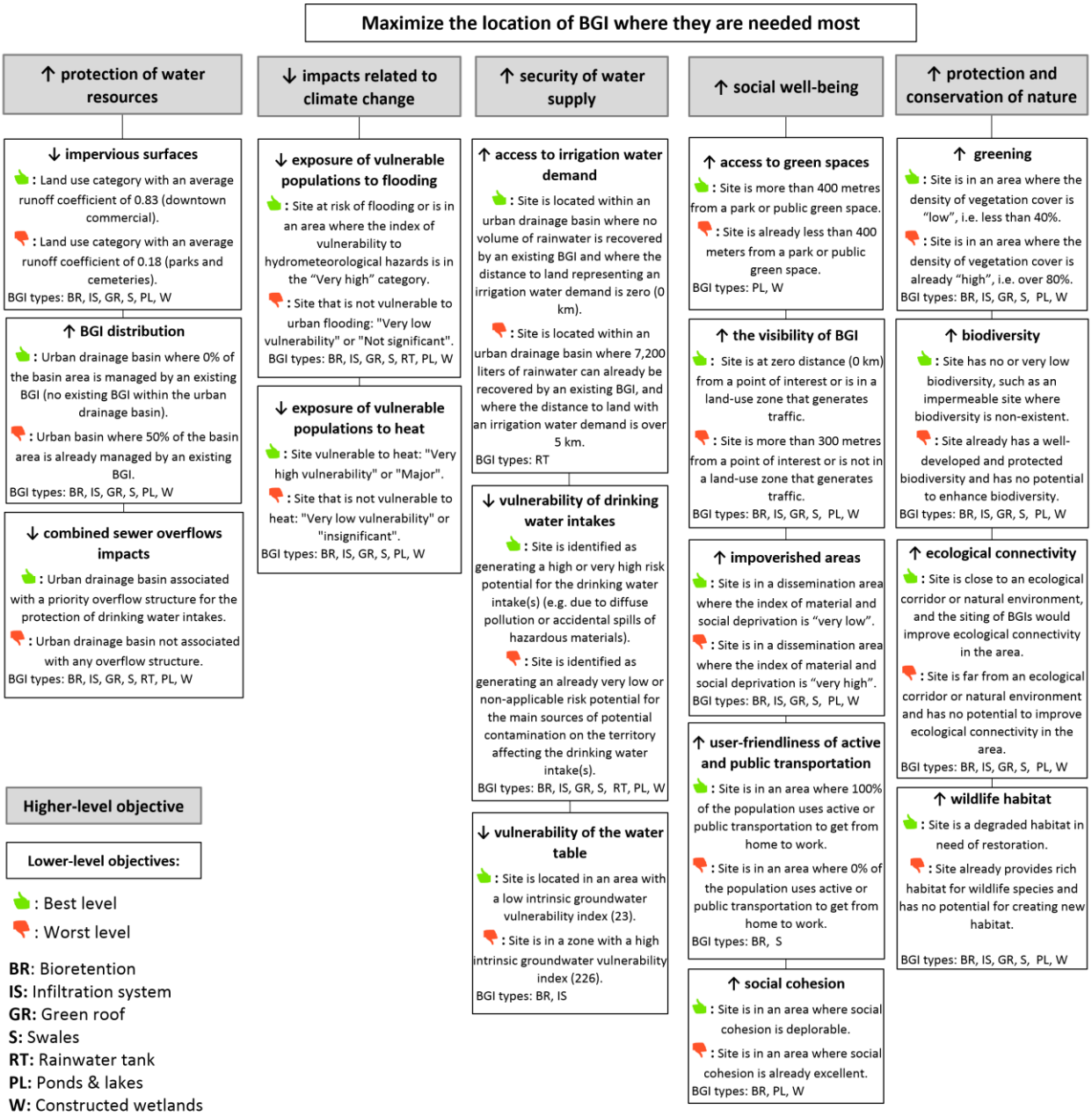


Figure E.2.1 Preliminary case study: Hierarchies of objectives for small BGI systems (bioretention, infiltration system and swale, hereafter referred to as group A), large BGI systems (constructed wetland and pond & lake, hereafter referred to as group B), green roofs and rainwater tanks for strategic BGI spatial planning related to needs suitability perspective (continued)

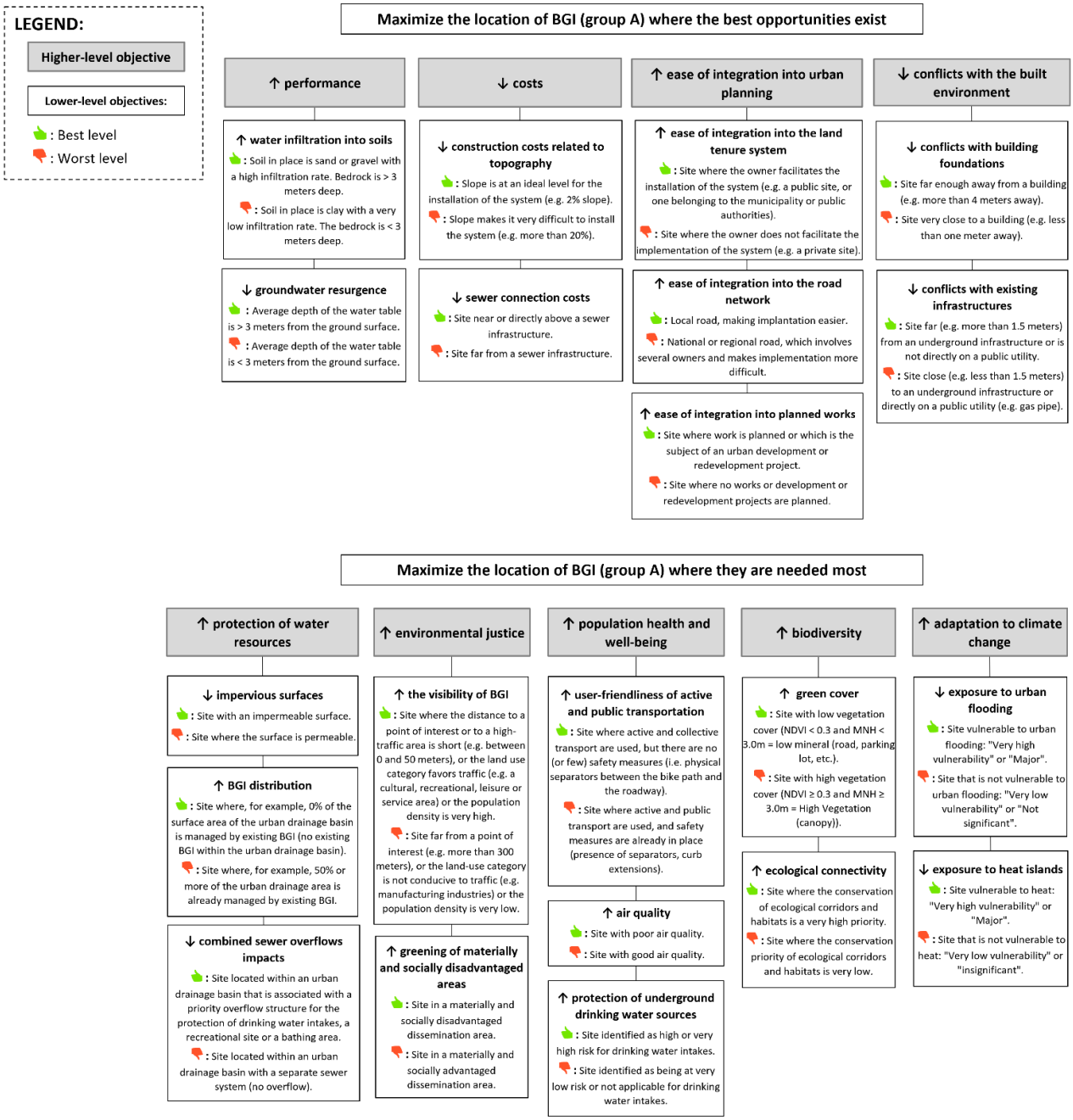


Figure E.2.2 Main case study: Hierarchies of objectives for bioretention, infiltration systems and swales (BGI group A) for strategic BGI spatial planning related to opportunities (top) and needs (bottom) suitability perspective. Adapted from Lacroix et al. (2024).

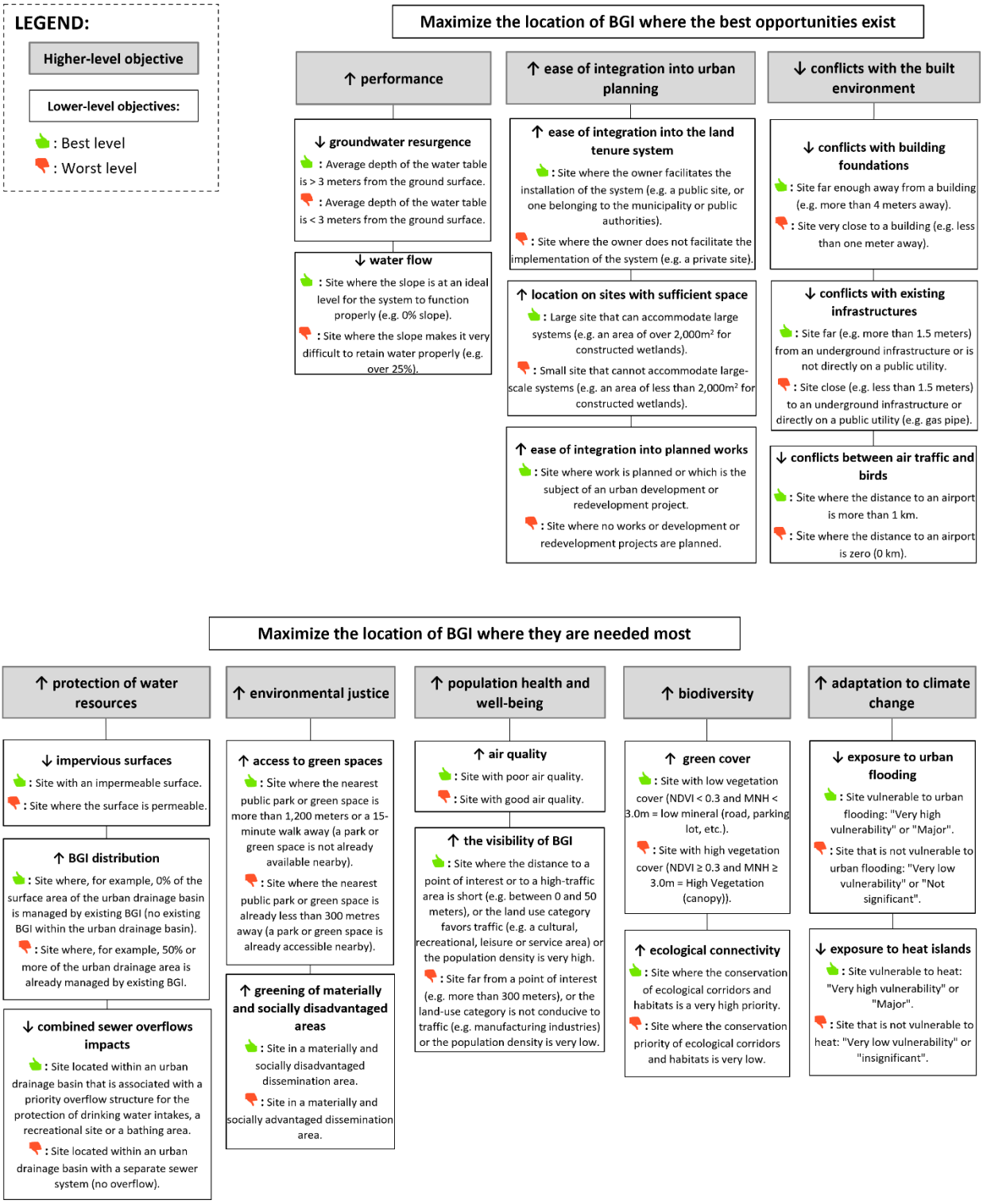


Figure E.2.3 Main case study: Hierarchies of objectives for constructed wetlands and ponds and lakes (BGI group B) for strategic BGI spatial planning related to opportunities (top) and needs (bottom) suitability perspective. Adapted from Lacroix et al. (2024).

E.3 Screenshots illustrating the steps of the online swing-weight elicitation software, using an example branch from an objective hierarchy

Key software features enhance the weight elicitation process and mitigate issues occurring in online elicitation without guidance (Aubert et al., 2020), including : (i) a "drag and drop" for ranking scenarios and a slider for rating, eliminating the need for manual entry; (ii) orderly presentation of rankings, minimizing answer inconsistency; (iii) default scores for the "preferred" scenario (100) and the null scenario (0), preventing stakeholders from altering these values; (iv) blocking users from assigning a higher score to a lower-ranked scenario; and (v) an introductory task for stakeholders to practice with the software, fostering familiarity with weights in a simplified context and acting as a "training and practice task", as recommended by Aubert et al. (2020).

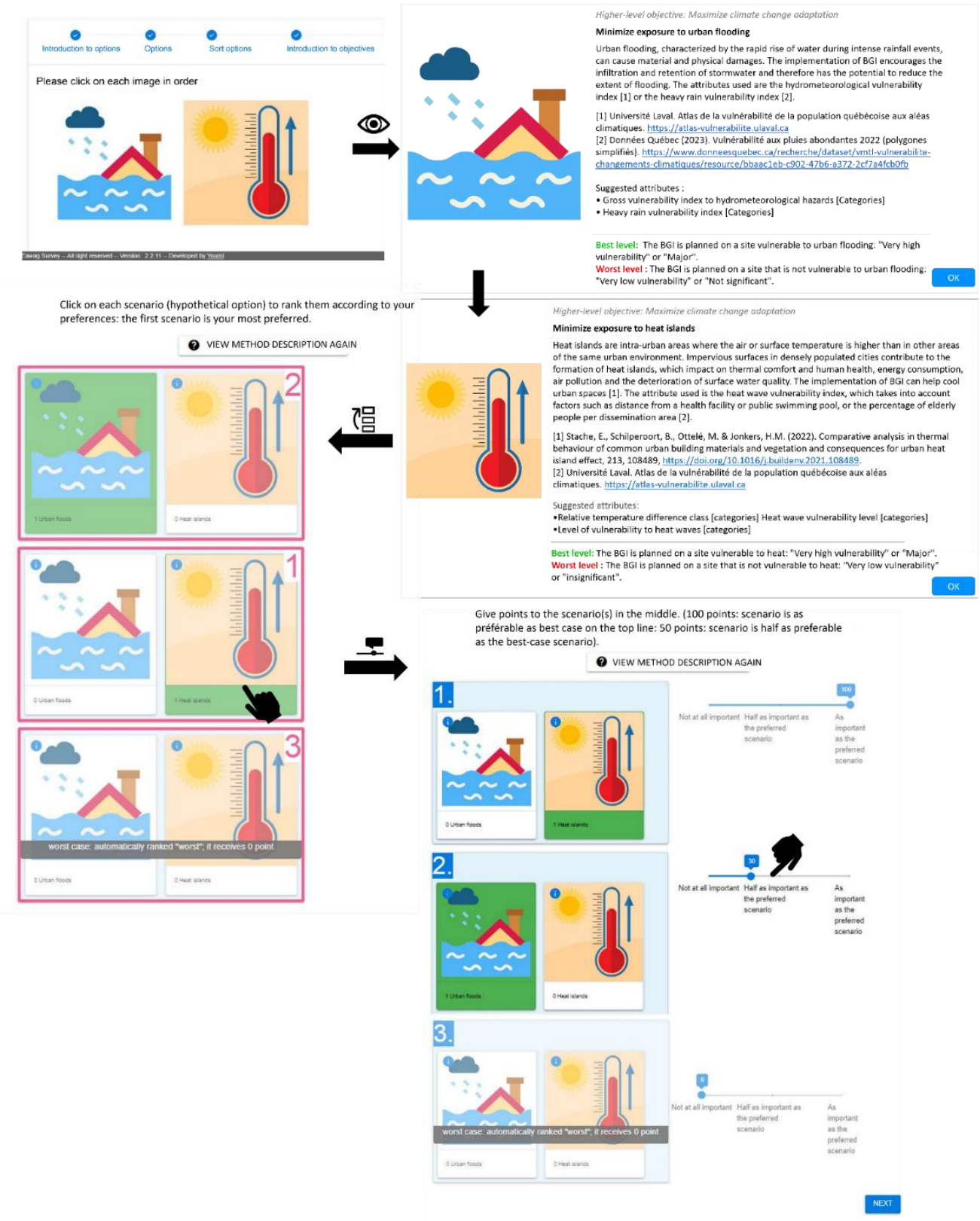


Figure E.3.1 Overview of the *ValuePreferences* (Version: 3.1.4) (Aubert & Masson, 2021) software interface and the steps stakeholders follow in the questionnaires.

E.4 Research hypotheses

When we formulated our research questions, we had certain expectations regarding the results. We present here our research hypotheses based on literature.

> ***R1.*** *Which objectives are more important and less important for stakeholders for strategic BGI planning?*

For opportunities-related objectives, we expect stakeholders to weight objectives related to biophysical aspects, as these criteria are commonly found in BGI siting guidelines, such as soil type, slope and impermeability (Kuller, Bach, et al., 2018; MDDEFP, 2011; New Jersey Department of Environmental Protection, 2018; U.S. Environmental Protection Agency, 2014). This emphasis on biophysical criteria is also prominent in planning support systems (PSS) for BGI and there is a practical link between site selection and biophysical factors (Kuller, Bach, et al., 2018). Furthermore, these factors can significantly impact the feasibility of BGI implementation. We also expect a higher weight to be accorded to prioritizing sites affected by planned works and development projects. Lacroix et al. (2024) conducted two workshops with 37 stakeholders to co-create and validate objectives to be considered while planning BGIs in urban areas. The objective of maximizing the integration of BGI siting in planned works and development projects was highly suggested in individual brainstorming activities (28 out of 37 stakeholders), indicating the high importance of this objective. Indeed, this approach of strategic opportunism is still observed, e.g. in Montreal (Quebec, Canada), where greening is prioritized whenever there is an opportunity to remove pavement during construction work (Madénian & Van Neste, 2024). This hypothesis aligns with Kuller, Bach, et al. (2018) observations of an overrepresentation of BGI in streetscapes supported by opportunistic planning practices during street renewal and roadworks. We anticipate that the objectives related to minimizing conflicts with the built environment will be assigned low weights from the stakeholders. During the workshops conducted by Lacroix et al. (2024), these objectives received more votes for exclusion from the objective hierarchies. This may be because stakeholders are wary of overly restricting the implementation of BGI by considering these factors.

For needs-related objectives, we expect urban heat island mitigation to be among the highest weights for stakeholders in Quebec. According to co-creation and validation workshops with stakeholders conducted in a previous study (Lacroix et al., 2024), this objective was prominently suggested by stakeholders during individual brainstorming sessions (31 out of 37 stakeholders), imply that they may hold priority in their preferences. We nevertheless reserve some caution because, practical observations in Melbourne revealed

that BGIs were not implemented in heat-vulnerable areas (Kuller, Bach, et al., 2018) and previous studies have shown that the cooling benefits of BGI were among the lowest priorities for stakeholders (Derkzen et al., 2017; Meerow & Newell, 2017). We anticipated that objectives concerning stormwater management would hold greater significance for stakeholders, as observed in previous studies on BGI preferences (Jayasooriya et al., 2019; Meerow, 2019; Meerow & Newell, 2017). Stormwater management was consistently highlighted as one of the most important benefits across various cities according to the study of Meerow (2019). Mitigating vulnerability to flooding (29 out of 37 stakeholders) and addressing overflow issues (19 out of 37 stakeholders) were also highly suggested by stakeholders during Lacroix et al. (2024) workshops. We could also expect other BGI benefits to be assigned high weights by stakeholders, like reducing social vulnerability, increasing access to green space and improving air quality, which were regarded as the next most important objectives for stakeholders of three American cities by Meerow (2019). A practical correlation between BGI location and communities with relatively lower house prices was also observed by Kuller, Bach, et al. (2018), suggesting prioritizing areas with greater disadvantage may emerge as a priority. We expect that the least important objectives for stakeholders would be those providing more indirect services. This was observed by Meerow (2019), who found that maximizing landscape connectivity was one of the least important objectives in all three cities studied. The objective of maximizing the visibility of BGIs also emerged as one with a high percentage of votes for exclusion from the objective hierarchies according to Lacroix et al. (2024). This may again be due to the more indirect benefits of this objective, such as aesthetics and educational potential.

When comparing preferences from stakeholders of the preliminary case study and the main case study, it is expected they may vary, as observed by Meerow (2019), where stakeholders in three cities had different priorities regarding the benefits of BGI. Their priorities may also reflect the challenges they face.

> ***R2.*** *Which objectives in strategic BGI planning have the most and least consensus among stakeholders in their preferences?*

We generally expect individual weights to vary between different stakeholders for the same objective. A similar result was observed in the study of Meerow (2019), where except for certain criteria, preferences for other benefits varied. Phillips et al. (2023) also observed variations in preferences among participants regarding the priorities of location choice for on-street BGI. However, since we observed a strong response rate from stakeholders towards certain objectives during co-creation and validation workshops with stakeholders conducted in an earlier stage of the project (Lacroix et al., 2024), we anticipate more

consensus on these objectives. For opportunities-related objectives, we expect the objective of prioritizing sites affected by planned works and development projects to have a greater consensus and for needs-related objectives, we expect the objectives of urban heat island mitigation and stormwater management to have a greater consensus.

> ***R3.*** *How do individual stakeholder preferences compare to each other for the complete set of objectives related to strategic BGI planning?*

Since we expect variation in preferences for the same objective between stakeholders, we anticipate that preferences for the set of objectives between two stakeholders will not follow specific patterns. We do not anticipate a clear relationship between the independent variables and preferences, based on previous studies by Kuller et al. (2023) and Bryan et al. (2010). The former study observed no link between stakeholder preferences and factors such as language, gender, age group, field of work and years of experience with floods and flood management. The latter study found no significant difference among different services and groups regarding management priorities of natural capital and ecosystem services.

E.5 Data collected for each case studies

Table E.5.1 Information on elicited swing weights

Case study	BGI group type	Suitability perspective	Objectives level	# objectives	# respondents	Total # elicited weights (objectives x respondents)
Preliminary	A, B, green roofs & rainwater tanks	Opportunities	Lower	18	12	216
			Higher	5	12	60
		Needs	Lower	17	12	216
			Higher	5	12	60
Main	A	Opportunities	Lower	9	14	126
			Higher	4	14	56
		Needs	Lower	12	13	156
			Higher	5	13	65
	B	Opportunities	Lower	8	14	112
			Higher	3	14	42
		Needs	Lower	11	14	154
			Higher	5	14	70
	C	Opportunities	Lower	9	11	99
			Higher	4	11	44
		Needs	Lower	13	11	143
			Higher	5	11	55

E.6 Interpretation of coefficient of variation CV

Table E.6.1 Interpretation of coefficient of variation CV, from Jayasooriya et al. (2019)

Coefficient of variation CV	Significance
$CV \geq 0.8$	Poor degree of consensus
$0.5 > CV > 0.8$	Less than satisfactory degree of consensus
$0.5 \leq CV$	Good degree of consensus

E.7 Interpretation of Spearman correlation coefficient ρ

Table E.7.1 Interpretation of Spearman correlation coefficient ρ, adapted from Dancey and Reidy (2004)

Spearman correlation coefficient ρ *	**Significance**
$\rho \geq 0.70$	High correlation
$0.40 > \rho > 0.69$	Strong correlation
$0.30 > \rho > 0.39$	Moderate correlation
$0.20 > \rho > 0.29$	Weak correlation
$0.01 > \rho > 0.19$	No/negligible correlation

* Applicable for both positive and negative ρ: + : Positive correlation, - : Negative correlation

E.8 Key considerations for interpreting the results

Table E.8.1 Key considerations for interpreting the results

Consideration	Explanations
Time	Stakeholder preferences were elicited only at one specific moment, while preferences can change over time. Capturing them at a single moment may not fully represent the dynamic nature of stakeholder opinions (Aubert & Lienert, 2019; Kuller et al., 2023).
Geography	The elicitation workshops for the main case study involved stakeholders from different organizational levels and cities, enhancing generalizability but focusing on general preferences rather than site-specific insights. We defined the best and worst objective levels required for the swing method on "absolute" attribute, rather than on "relative" attribute values. This means that the minimum and maximum levels are based on the extreme values of the spatial data layers, rather than the minimum and maximum observed on a specific case study (Lacroix et al., 2024). Caution is advised when generalizing findings to other cities, as preferences may be context-dependent and vary across case studies.
Hierarchical structure	Conclusions from stakeholder preferences depend on how objectives are grouped hierarchically. For instance, health-related lower-level objectives tended to receive lower weights, while heat island mitigation, categorized under climate adaptation, emerged as a higher priority. This objective could have been categorized under health, raising its priority. Therefore, using swing weight elicitation hierarchically is relative to which objectives are being compared at each step. Additionally, the balance of the objective hierarchy is crucial, as branches with fewer objectives tend to receive higher weights in lower-level swing exercises (Marttunen et al., 2018).
Weight uniformity	We assumed the same weight was applied for all the attributes measuring an objective, thus all the attributes are at their worst level when the objective is at its worst level.
Statistical significance	While many spearman correlations were not statistically significant, suggesting a need for caution in interpreting monotonic relationships, this does not discount the presence of meaningful associations influenced by sample size or preference variability.
Stakeholder appreciation	Some stakeholders displayed inconsistency or misunderstanding during the weighting exercise, emphasizing the need for caution in interpreting the results. A concern was the inability to review or modify responses in the questionnaire after the final normalization calculation. Trust in the process is crucial for reliable preferences and ensuring acceptability from stakeholders. Clear rational articulation to stakeholders on our approach is vital. We think consistency-checks would have help to better follow their concerns through the process, such as selecting a statement about their preferences instead of numerical answers or inquire about the importance of objectives in different branches of the objective hierarchy and compared with the final elicited weights (Aubert et al., 2024). Allowing revisions could improve the user experience and stakeholder learning (Aubert et al., 2024). Note, the latest version of *ValuePreferences* (Version: 3.1.4) allows for stepwise repetition or repeating the questionnaires at the end.
GIS-MCDA settings	We adapted the online software for swing weights elicitation which was developed for an MCDA case study to function within GIS-MCDA settings. In GIS-MCDA context, the possible alternatives are sites (map grid cells) in the urban area. Stakeholders may have encountered difficulty in understanding the terms "worst level" and "best level" in the context of GIS-MCDA alternatives. Objectives related to the needs of the urban area caused confusion, since the "best level" describes a case where the site is currently non-ideal and BGI implementation would improve the situation the most. We therefore recommend changing the terms for a GIS-MCDA context, where alternatives are sites. We thus recommend instead referring to "worst and best opportunities" and "least and greatest needs" of the urban area.

E.9 SI-Methodology

E.9.1 Integrating stakeholder preferences in GIS-MCDA

Multi-attribute value theory (MAVT) is a prominent approach in MCDA (Keeney & Raiffa, 1976). It assigns scores (i.e. real numbers) to each decision alternative, facilitating their comparison and ranking (Ferretti et al., 2014). In GIS-MCDA, the alternatives (*j*) to be ranked are potential sites or map raster cells within a study area. MAVT handles large numbers of alternatives without additional elicitation efforts (Ferretti et al., 2014). A crucial step in MAVT is weight (w_i) elicitation to capture the subjective preferences of stakeholders for objectives *i* (Ferretti & Geneletti, 2020). Each objective *i* is measured through one or more attributes, with marginal value scales (v_i) used to evaluate individual objective performance ($v_i(a_{ji})$). These scales transform attribute levels into a standardized scale from 0 to 1. Under MAVT, the simple additive value model (Eisenführ et al., 2010) is the most commonly used aggregation rule to obtain the final score of each alternative (Belton & Stewart, 2002; Zheng & Lienert, 2018):

$$V(a_j) = \sum_{i=1}^{m} w_i \cdot v_i(a_{ji}) \qquad (B.1)$$

Where $V(a_j)$: the overall suitability score of an alternative *j*; w_i: the weights given to objective *i*, reflecting the relative importance of objectives; $v_i(a_{ji})$: the marginal value scale for objective *i*, representing the performance of alternative *j* for that objective; *m*: the total number of sub-objectives.

It should be noted that several aggregation methods exist (Eisenführ et al., 2010; Langhans et al., 2014) and that the simple additive value model has limitations. Specifically, it allows poor performance in one objective to be offset by high performance in others, and it assumes preferential independence, that the evaluation of one objective is unaffected by the performance of others, thereby justifying the summation of individual scores but potentially oversimplifying complex interactions between objectives in real-world planning contexts (Langhans et al., 2014). The newer version of the SSANTO PSS includes a feature that enables variation in the degree of additivity applied within the aggregation models.

E.9.2 Swing weighting method

We used the swing weights elicitation method to measure stakeholder preferences (Eisenführ et al., 2010):

1. A null scenario is presented where all objective attributes are at their worst possible level. For example, to *minimize exposure to heat islands* (needs suitability perspective), the worst case is to plan

BGI in locations that are not vulnerable to heat, as these sites are potential cool islands and have less need for BGI implementation. The worst possible level is thus that the BGI is planned on a site that is not vulnerable to heat. Another example is to *maximize ease of integration into planned works* (opportunities suitability perspective): the worst possible level is that the BGI is planned where no works or development projects are planned, since the opportunity is minimal.

2. Scenarios are then provided where a single objective is improved from its worst to its best possible attribute level (e.g. to *minimize exposure to heat islands*, the best possible level is now that the BGI is planned on a site that is highly vulnerable to heat, since the need for BGI implementation is greater). The stakeholder is tasked with ranking these scenarios according to the priority order in which he wishes to improve an objective to its best level. The most preferred scenario is assigned the top rank (number one).
3. The stakeholder is then asked to give a score from 0 to 100 to the ranked scenarios, with the scenario ranked first automatically receiving a score of 100. The null scenario (step 1), where all the objectives are at their worst level receives a score of 0. The assigned scores should reflect the relative importance of improving an attribute from its worst to best level compared to improving the most important attribute from worst to best level (at the first rank).
4. In a multi-level hierarchical weighting process, weights are assessed within "objectives families", referring to objectives within the same branch of the objective hierarchy (i.e. under the same higher-level objective) (Belton & Stewart, 2002). The final weights for each lower-level objective are normalized, so the sum of all weights is one (Eisenführ et al., 2010), through Eq. B.2 (Aubert et al., 2020):

$$w_r = w_{inf} \cdot w_{sup} = \frac{p_a}{\sum_{k=1}^{m} P_k} \cdot \frac{p_A}{\sum_{j=1}^{n} P_j} \qquad (B.2)$$

where w_r is the global weight, w_{inf} the local weight of lower-objective a (lower-level of the objective hierarchy), w_{sup} the weight of higher-level objective A (upper level of the objective hierarchy), p_a the score given to lower-objective a, m the number of sub-objectives in the branch of the objectives hierarchy, P_k the score given to sub-objective k, p_A the score given to higher-level objective A, n the number of higher-level objectives in the hierarchy, P_j the score given to higher-level objective j.

E.9.3 Swing weights elicitation questionnaires

E.9.3.1 Complete questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives

The questionnaire below is a translation of the French version distributed to participants.

Welcome

Workshop: Obtaining objectives weights for strategic planning of blue-green infrastructure (BGI) in urban areas

As part of the research project :

PIIVO: Integrated Planning of Green Infrastructures in Open Innovation (***P**lanification **I**ntégrée des **I**nfrastructures **V**ertes en innovation **O**uverte*)

This questionnaire is for:
•**BGI group A**: Bioretention systems, swales, and infiltration systems
•Objectives related to the ***Opportunities*** offered by the urban area

ACTIVITY SEQUENCE

This questionnaire is based on the SWING weighting method [1]. It aims to capture the preferences of various stakeholders regarding the objectives of implementing blue-green infrastructure (BGI) in an urban area. These preferences help guide the selection of sites for these systems by assigning relative weights to the objectives, which are integrated into the SSANTO planning support system (PSS) [2].
SSANTO (Spatial Suitability ANalysis TOol) is a spatial analysis and multi-criteria PSS that provides information on the suitability of a type of GI among eight types proposed by the PSS for a selected study area. These types include bioretention and rain gardens, infiltration systems, swales, green roofs, ponds and lakes, rainwater harvesting barrels, constructed wetlands, and urban trees.
Based on biophysical, socio-economic, planning, and governance objectives related to ecosystem services, this model conducts a spatial suitability analysis from two perspectives: ***Opportunities*** and ***Needs***. The ***Opportunities*** perspective refers to the environmental opportunities and constraints for implementing GI, while the ***Needs*** perspective identifies locations where the benefits of GI would be most necessary.
The goal of this third workshop is to obtain the weighting of objectives for three hierarchies: bioretention, constructed wetlands, and urban trees. Each participant will only need to complete the weighting exercise for two out of the three types of BGI. Therefore, you will have four questionnaires to fill out:

The aim of this workshop is to obtain the weighting of the objectives in three objective hierarchies: one for BGI group A (bioretentions, infiltration system and swale), one for BGI group B (constructed wetlands and pond & lake) and one for BGI group C (urban trees). The questionnaires are constructed according to these hierarchies.
The questionnaire is divided into two main parts:
(i) Weighting the lower level of the hierarchy (sub-objectives of each branch). The sub-objectives will be presented to you in groups according to the main objective they relate to.
(ii) Weighting the higher level of the hierarchy (main objectives). The main objectives will be represented by the sub-objective ranked 1st in each branch of the hierarchy.

**The abbreviation BGI (blue-green infrastructure) is used to simplify the text in the questionnaire.

[1] Eisenführ, F., Weber, M., & Langer, T. (2010). Rational Decision Making: Springer.
[2] Kuller, M., M.Bach, P., Roberts, S., Browne, D., & Deletic, A. (2019). A planning-support tool for spatial suitability assessment of green urban stormwater infrastructure. Science of the Total Environment, 686, 856-868. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.051

Contact Person

Sandrine Lacroix
Polytechnique Montréal
Montréal
sandrine.lacroix@polymtl.ca

Note on privacy protection

Participants will not be able to identify other participants. Only the principal research team will be able to do so in order to track the information provided by respondents (you). All your responses to this questionnaire will be anonymous, and the collected data will be securely stored on the project manager's personal laptop. This laptop is protected by a password at login. All data will be accessible to other members of the research team for this project. The data will be kept confidential for 7 years, as required for data intended for scientific publication.
By responding to this questionnaire, you consent to the use of the data under these conditions.

REFUSE AGREE

Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives

Pre-survey

Organization
Please indicate the name of the organization you are currently working for.

Scale of action
At what level does this organization operate (municipal, provincial, etc.)?

Profession
Please indicate the title of your current position.

Field of study
Please indicate your field of study.

NEXT

Pre survey

Introduction Exercise

Before starting the objective weighting exercise, you will be presented with a brief introductory exercise. This exercise is not part of the data collected for our study. Rather, it is designed to help you become familiar with the functionalities of the questionnaire you will be using and to begin thinking in terms of more strategic or less strategic sites for implementing green infrastructure.

To this end, three typical site examples have been selected, each representing a different land use: residential area, commercial area, and industrial area. These three typical cases illustrate that different sites within the urban area can have varying impacts on the "suitability" of a site for implementing BGIs, such as runoff water quality, available space, and property rights.

1. You need to click on each of the images to review each site example.
2. After reviewing the three examples, click on the example you wish to rank as 1st, then click on the example you wish to rank as 2nd. The last example will automatically be ranked 3rd.

This is a simple exercise to familiarize participants with the ranking functionalities of the questionnaire software. The fictional ranking of these examples is not part of the data collected.

NEXT

Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

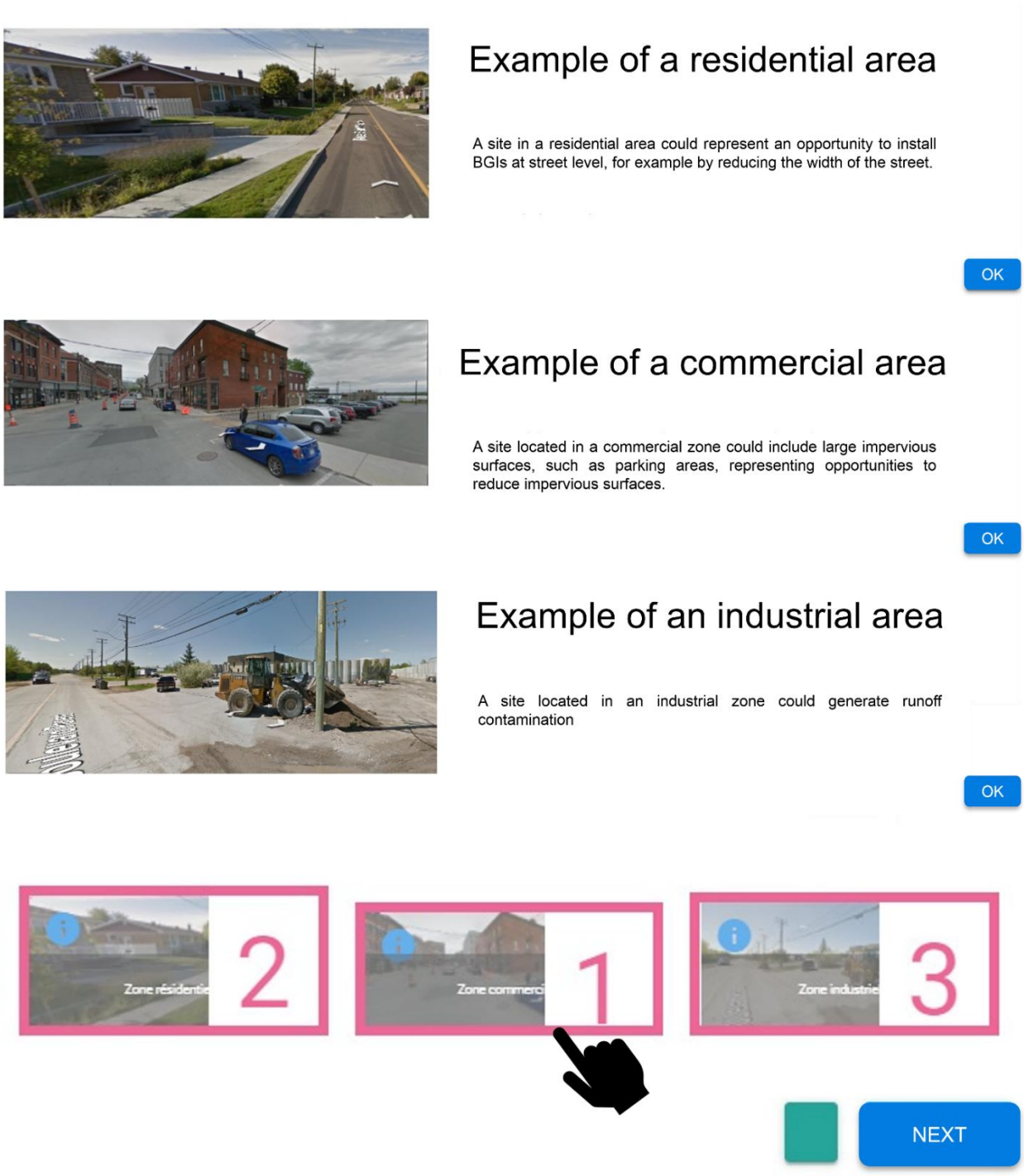


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

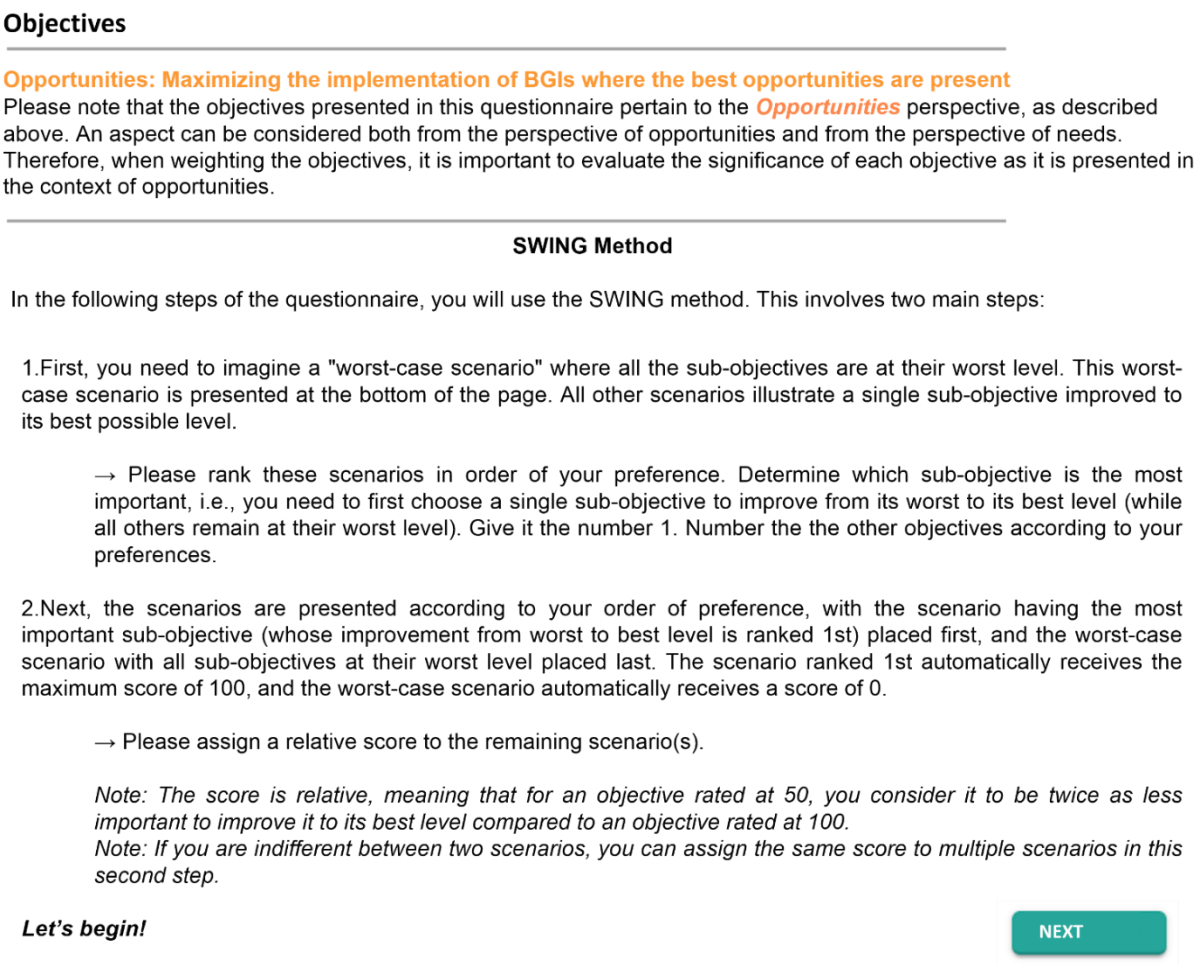


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Swing weights exercise for each branch of the objective hierarchy (i.e. initially between lower-level objectives within the same branch)

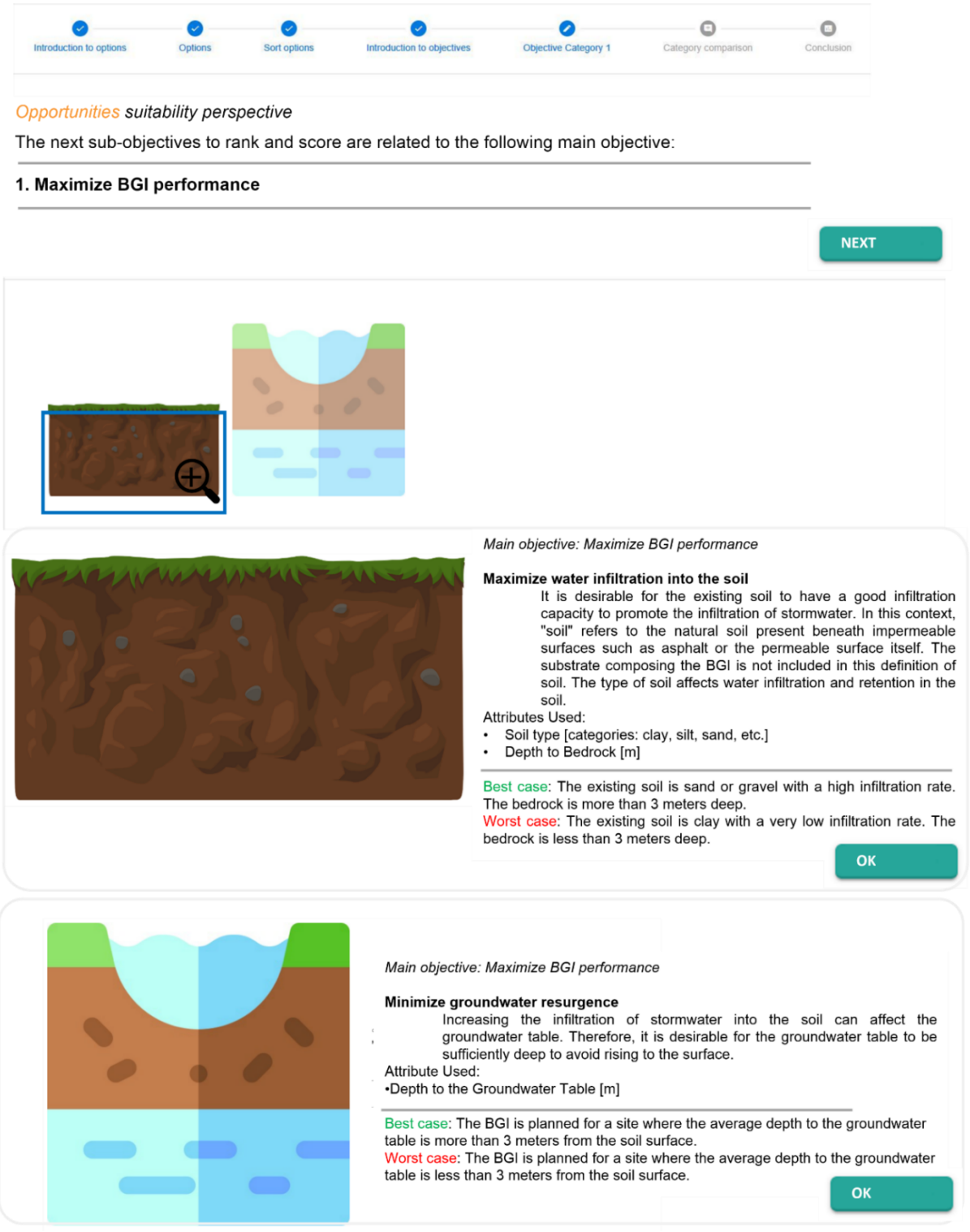
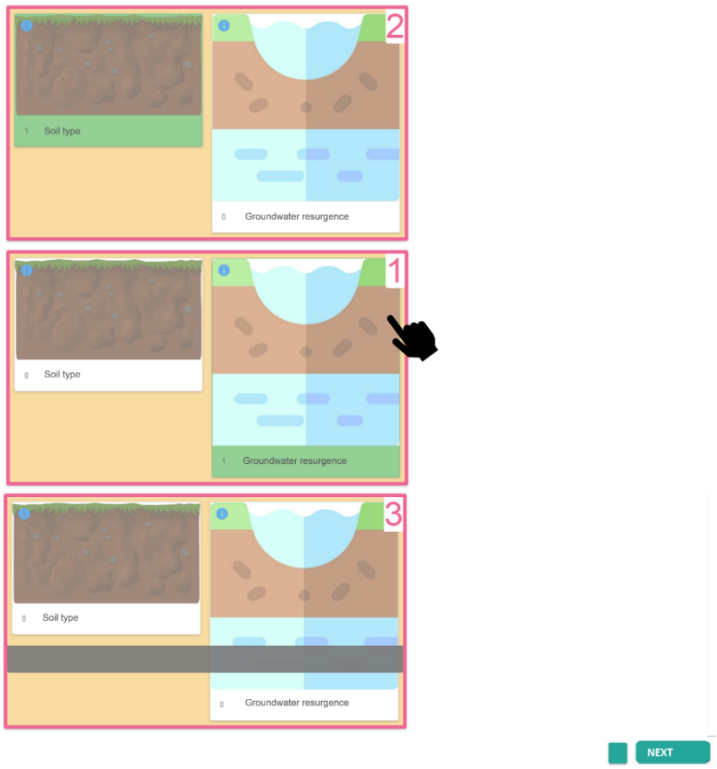


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Ranking step



Scoring step

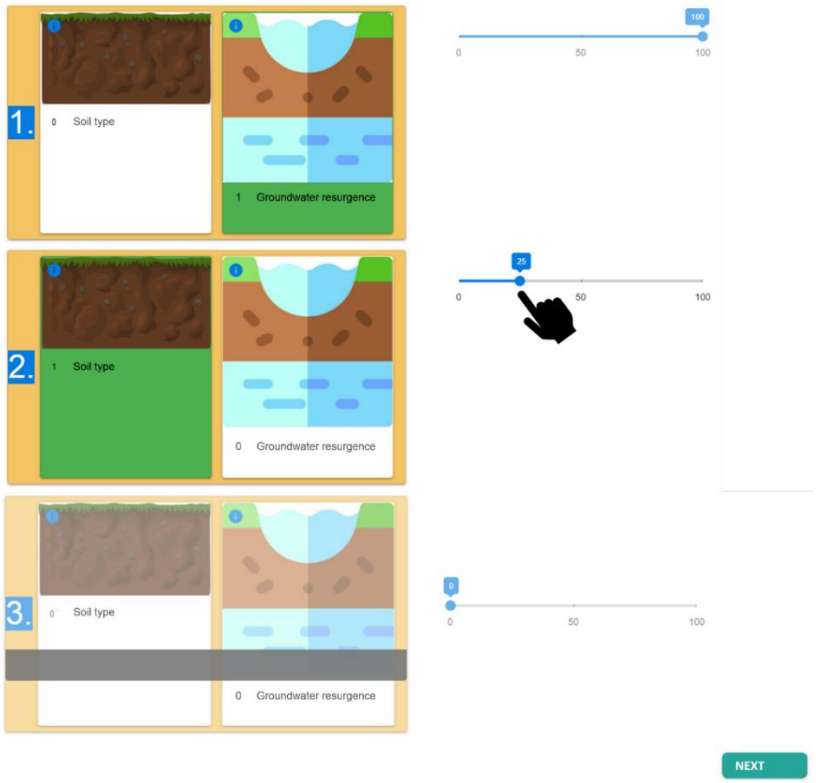


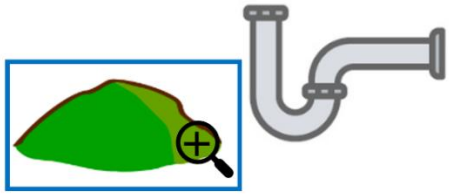
Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

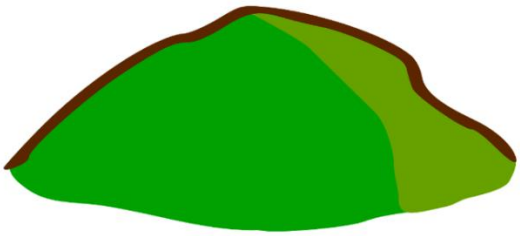
Opportunities suitability perspective

The next sub-objectives to rank and score are related to the following main objective:

2. Minimize cost

NEXT





Main objective: Minimize cost

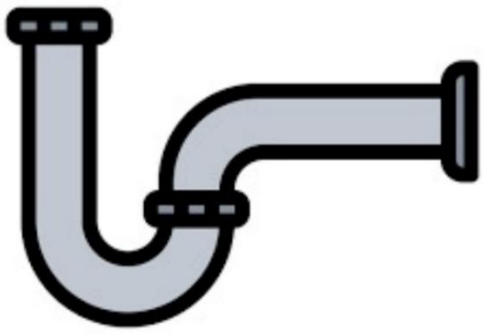
Minimize topographic work costs

The slope of a site affects its hydrology, including runoff rates and flow velocities. For BGIs to function optimally, the site's slope must meet predefined values for each type of BGI. Existing topography influences the ease of implementing a BGI. A site that already has an appropriate slope for a type of BGI allows for reduced work related to adjusting the terrain slope, thereby reducing installation costs.

Attribute Used:
•Slope Percentage [%]

Best case: The BGI is planned for a site where the slope is ideal for the system's installation (e.g., a 2% slope).
Worst case: The BGI is planned for a site where the slope makes the system's installation very difficult (e.g., more than 20%).

OK



Main objective: Minimize cost

Minimize connection costs to the sewer network

Implementing a BGI near existing stormwater drainage infrastructure facilitates its integration into the network, including reducing connection costs.

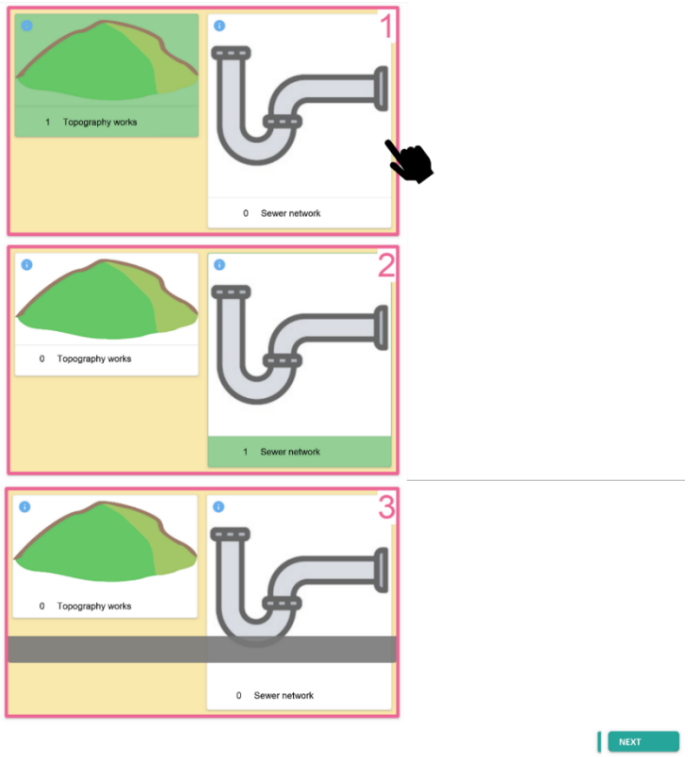
Attribute Used:
•Distance to catch basins and the storm or combined sewer network [m]

Best case: The BGI is planned for a site close to or directly above a sewer infrastructure.
Worst case: The BGI is planned for a site far from any sewer infrastructure.

OK

Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Ranking step



Scoring step

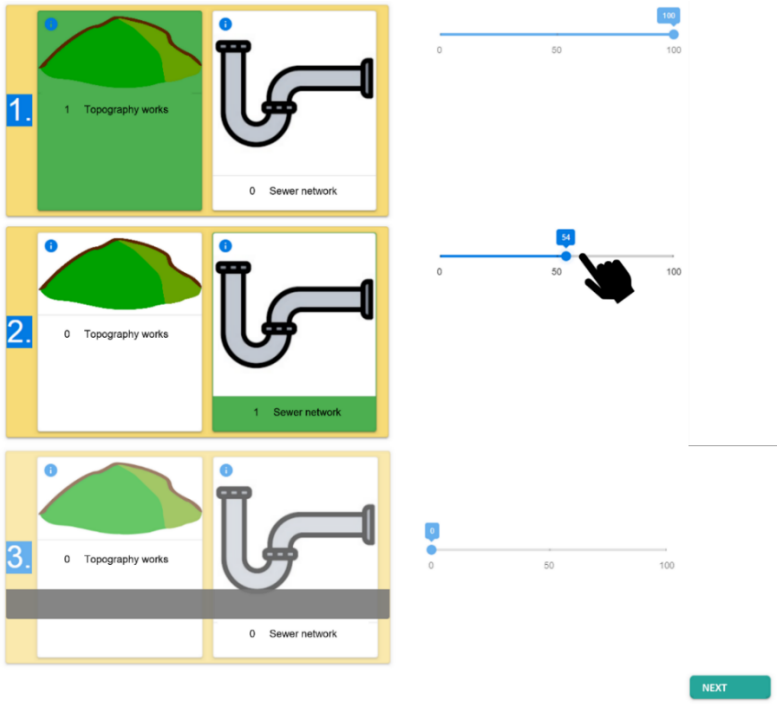


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Opportunities suitability perspective

The next sub-objectives to rank and score are related to the following main objective:

3. Maximize ease of integration into urban planning

NEXT





Main Objective: Maximize ease of integration into urban planning

Maximize ease of integration with land ownership

A BGI project must be conducted in coordination with the landowner. The property rights of the land influence the ease of implementing BGIs. For example, land owned by the municipality might facilitate the implementation process and future maintenance of the system.

Attribute Used:

•Type of Owner [categories]

Best case: The BGI is planned for a site where the owner facilitates the system's installation (e.g., a public site, or land owned by the municipality or public authorities).

Worst case: The BGI is planned for a site where the owner does not facilitate the system's installation (e.g., private land).

OK



Main Objective: Maximize ease of integration into urban planning

Maximize ease of integration into the road network

Roads represent opportunities for the implementation of certain types of BGIs. The ease of implementation depends on the accessibility, maintenance, and regulations of the existing roads. The type of road (highway, national road, regional road, etc.) is therefore considered here.

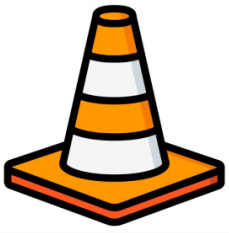
Attribute Used:

•Type of Road [categories]

Best case: The BGI is planned for a local road, which makes implementation easier.

Worst case: The BGI is planned for a national or regional road, which involves multiple stakeholders and makes implementation more difficult.

OK



Main Objective: Maximize ease of integration into urban planning

Maximize ease of integration into planned works

Planned works such as road repairs, infrastructure construction (roads, water mains, sewers, etc.), or the construction of spaces and buildings represent opportunities for integrating BGIs. This objective also includes opportunities to implement BGIs in projects involving the redevelopment of Integrated Urban Revitalization (IUR) areas or areas slated for redevelopment.

Attributes Used:

- Presence of Planned (Re)development Projects [yes/no]
- Planned Works [categories]
- Green Spaces to be Redeveloped [yes/no]
- Integrated Urban Revitalization Area [yes/no]

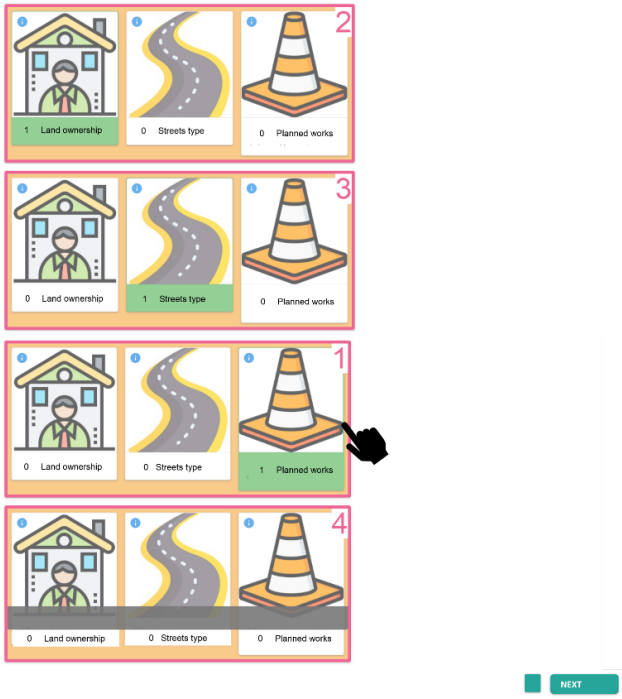
Best case: The BGI is planned for a site where works are scheduled or where there is an urban development or redevelopment project.

Worst case: The BGI is planned for a site where no works or development/redevelopment projects are planned.

OK

Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Ranking step



Scoring step

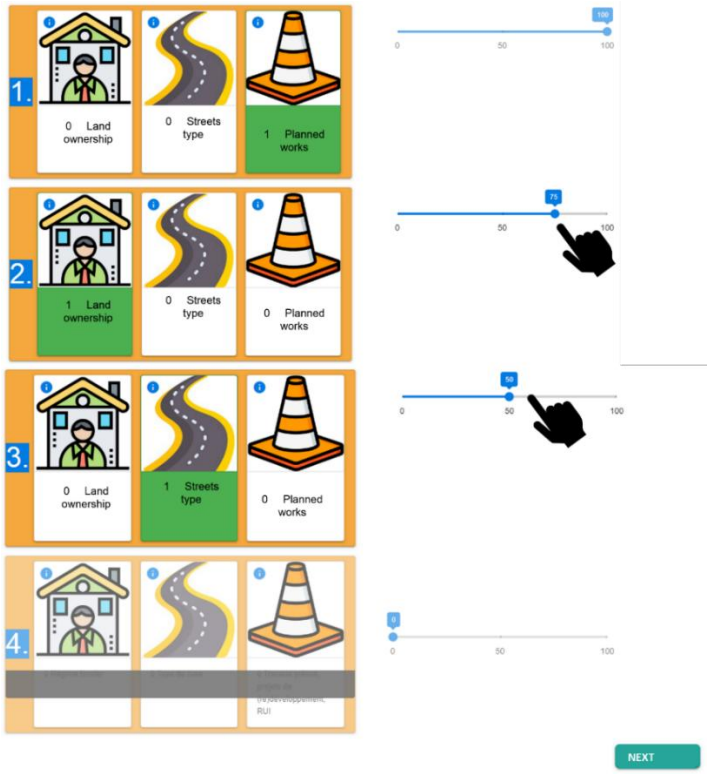


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Opportunities suitability perspective

The next sub-objectives to rank and score are related to the following main objective:

4. Minimize conflicts with the built environment

NEXT





Main Objective: Minimize Conflicts with the Built Environment

Minimize Conflicts with Building Foundations

To protect the structure of a building, especially its foundations, BGIs should be installed at a sufficient distance from the building. A buffer zone is defined around the building footprint, which represents the ground area covered by the building.

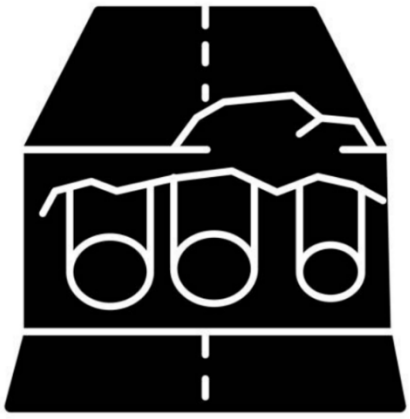
Attribute Used:

•Distance from the Building Footprint [m]

Best case: The BGI is planned for a site well away from a building (e.g., more than 4 meters).

Worst case: The BGI is planned for a site very close to a building (e.g., less than 1 meter).

OK



Main Objective: Minimize Conflicts with the Built Environment

Minimizing conflicts with existing infrastructure

Buried or suspended public utilities (such as gas pipelines, sewer and water mains, electrical cables, etc.) can pose constraints on the placement of BGIs (e.g., clearance distances must be respected in certain cases). For instance, placing a BGI above a water pipeline could accelerate corrosion by facilitating water infiltration. A BGI could also restrict access to underground infrastructure during repair work.

Attributes Used:

- Presence of public utility [yes/no] Distance to underground infrastructure [m]

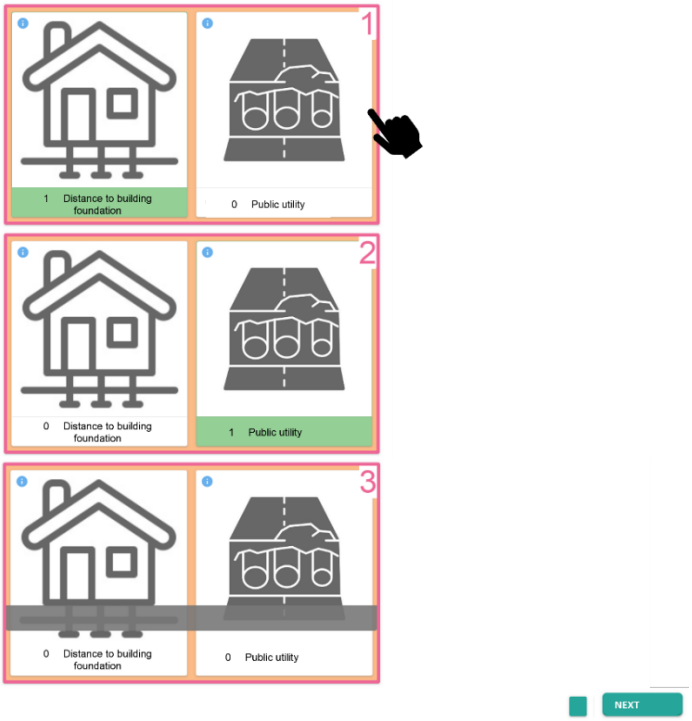
Best case: The BGI is planned at a site far away (e.g., more than 1.5 meters) from underground infrastructure or is not directly above a public utility.

Worst case: The BGI is planned at a site close (e.g., less than 1.5 meters) to underground infrastructure or directly above a public utility (e.g., gas pipeline).

OK

Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Ranking step



Scoring step

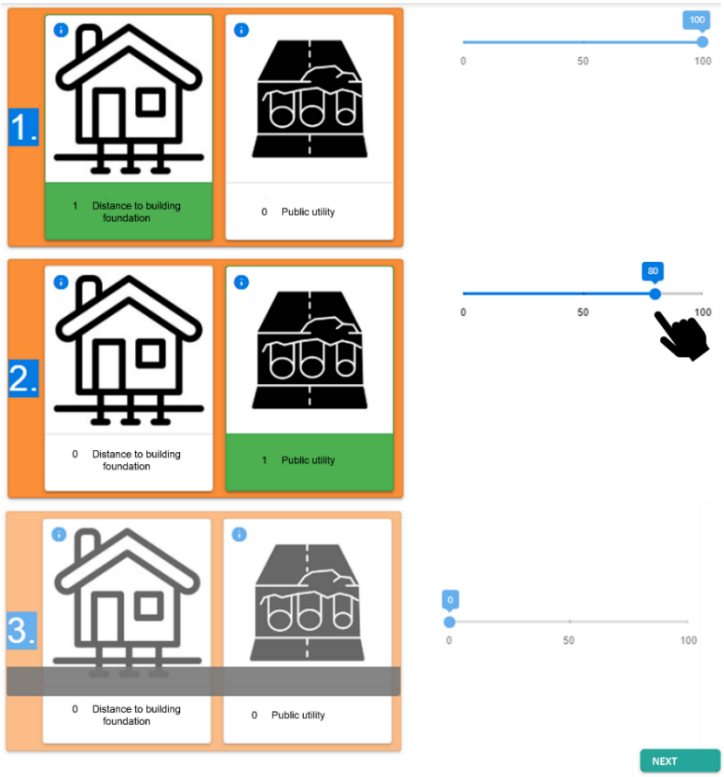


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Swing weights exercise for higher-level objectives (i.e. between the most preferred lower-level objective of each branch)

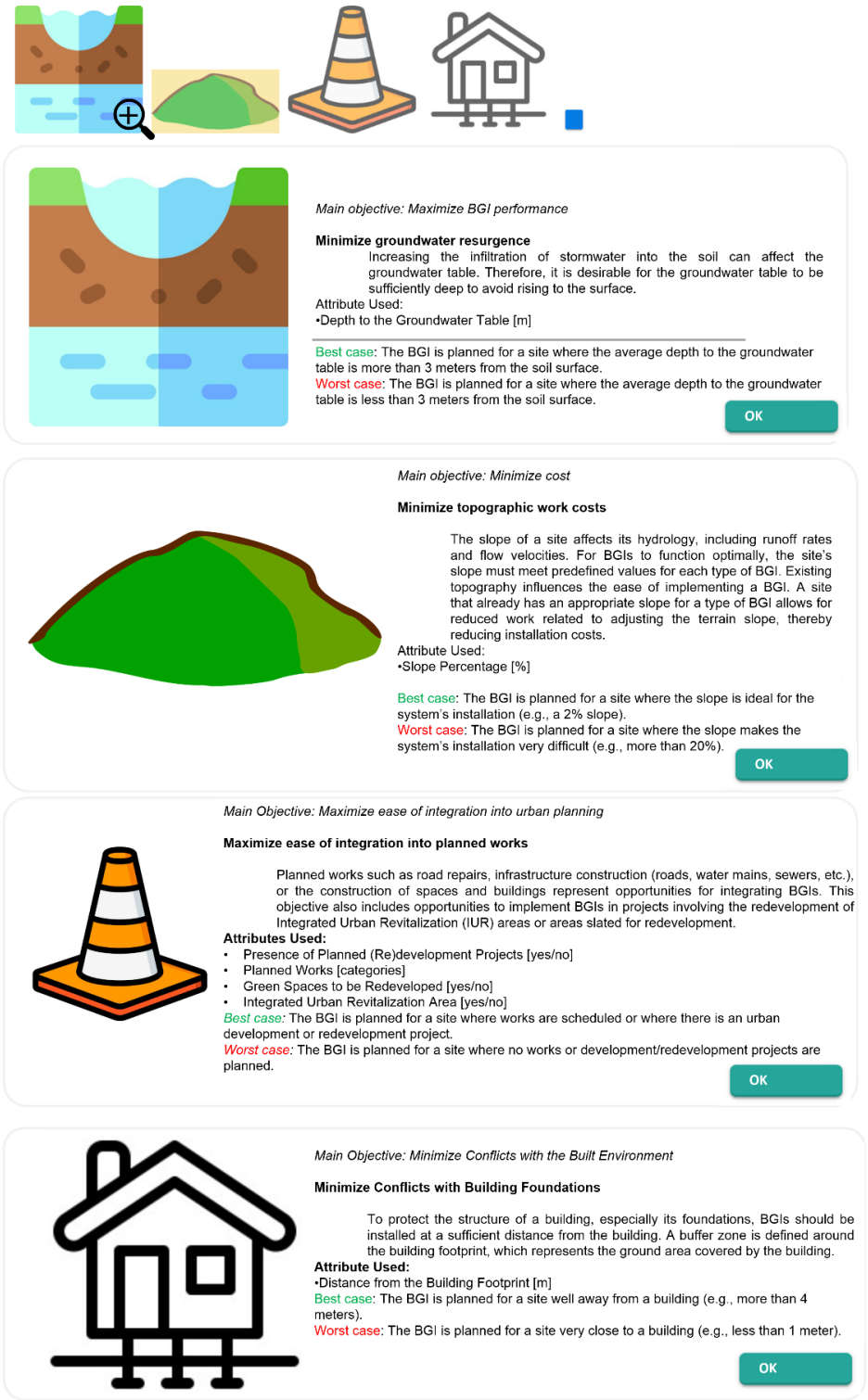


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Ranking step

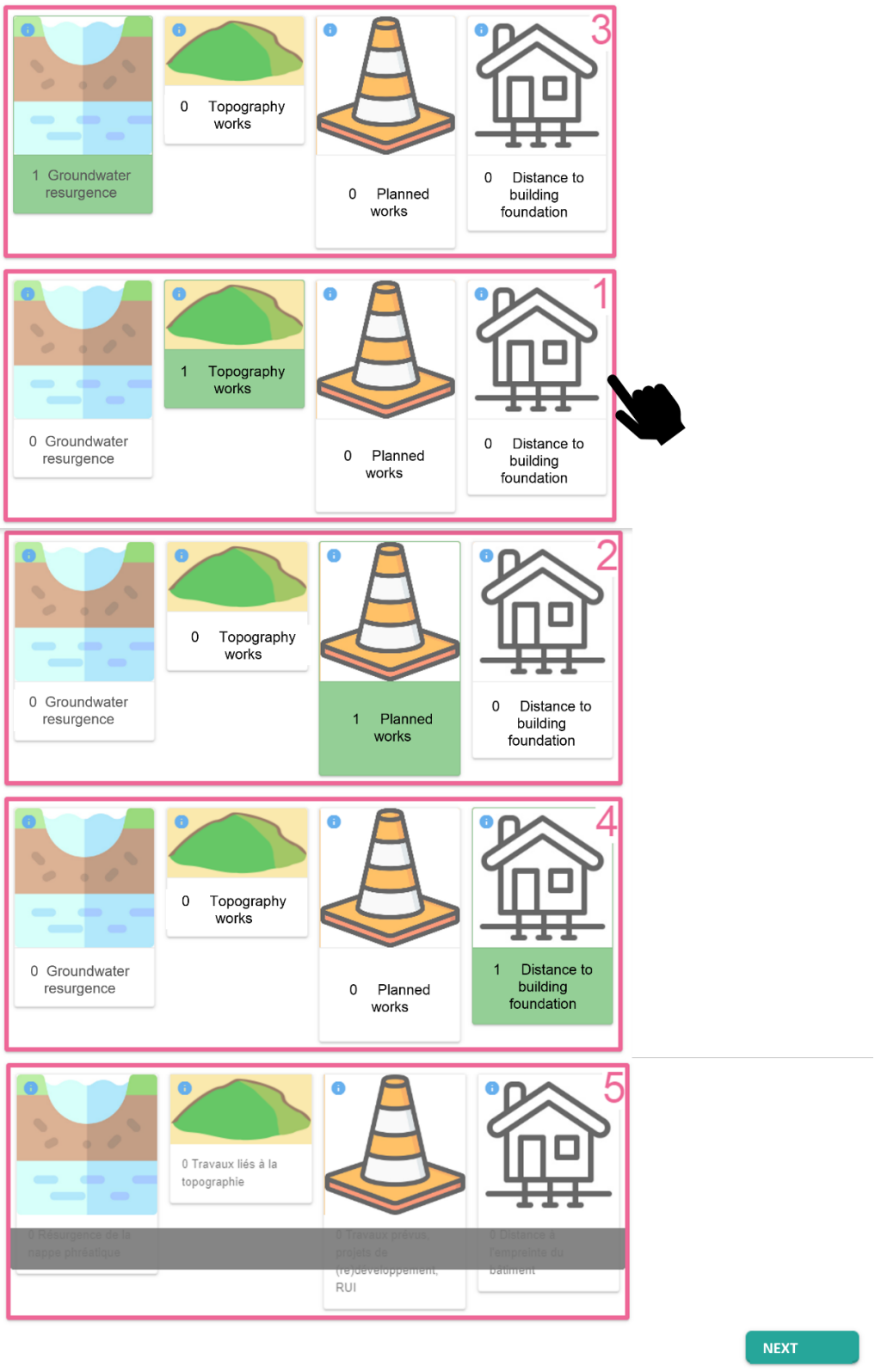


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Scoring step

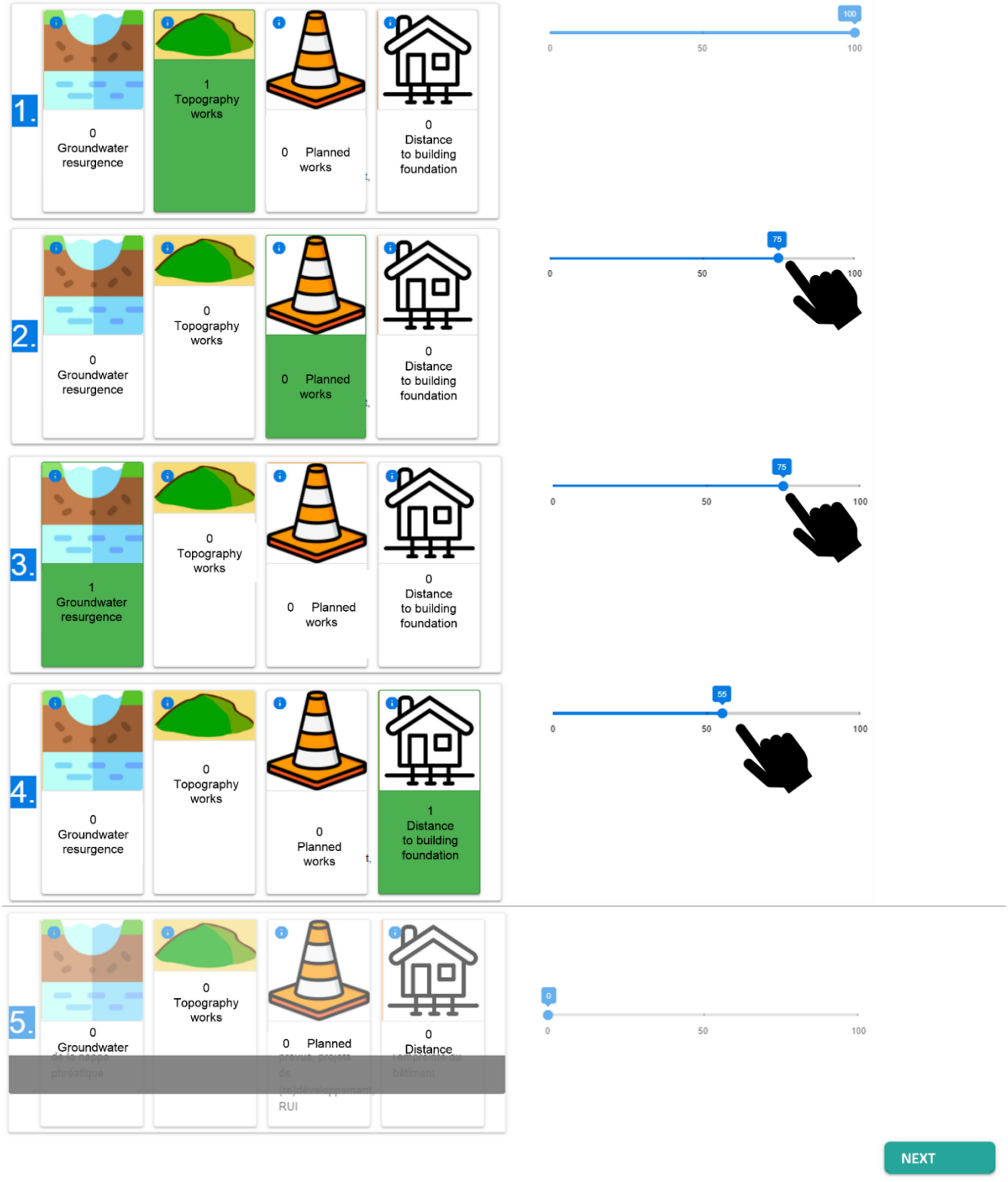


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

Display of calculated swing weights for each lower-level objective

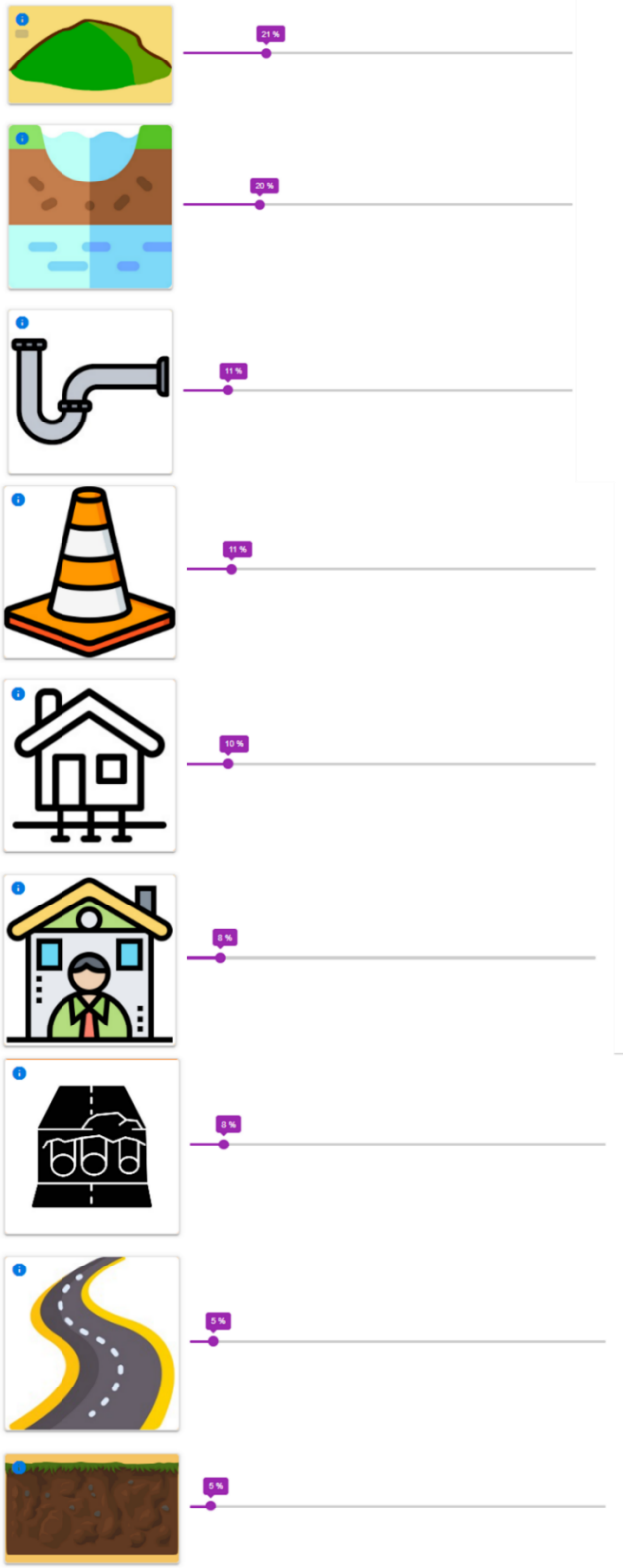


Figure E.9.1 Swing weight questionnaire for BGI group A and opportunities-related objectives (continued)

E.9.3.2 Questionnaire excerpt for BGI group A and needs-related objectives

The steps and their order are the same as in the questionnaire for BGI goup A and opportunities-related objectives (section SI-2.2.1). For this reason, only the descriptions of the various objectives are shown here.

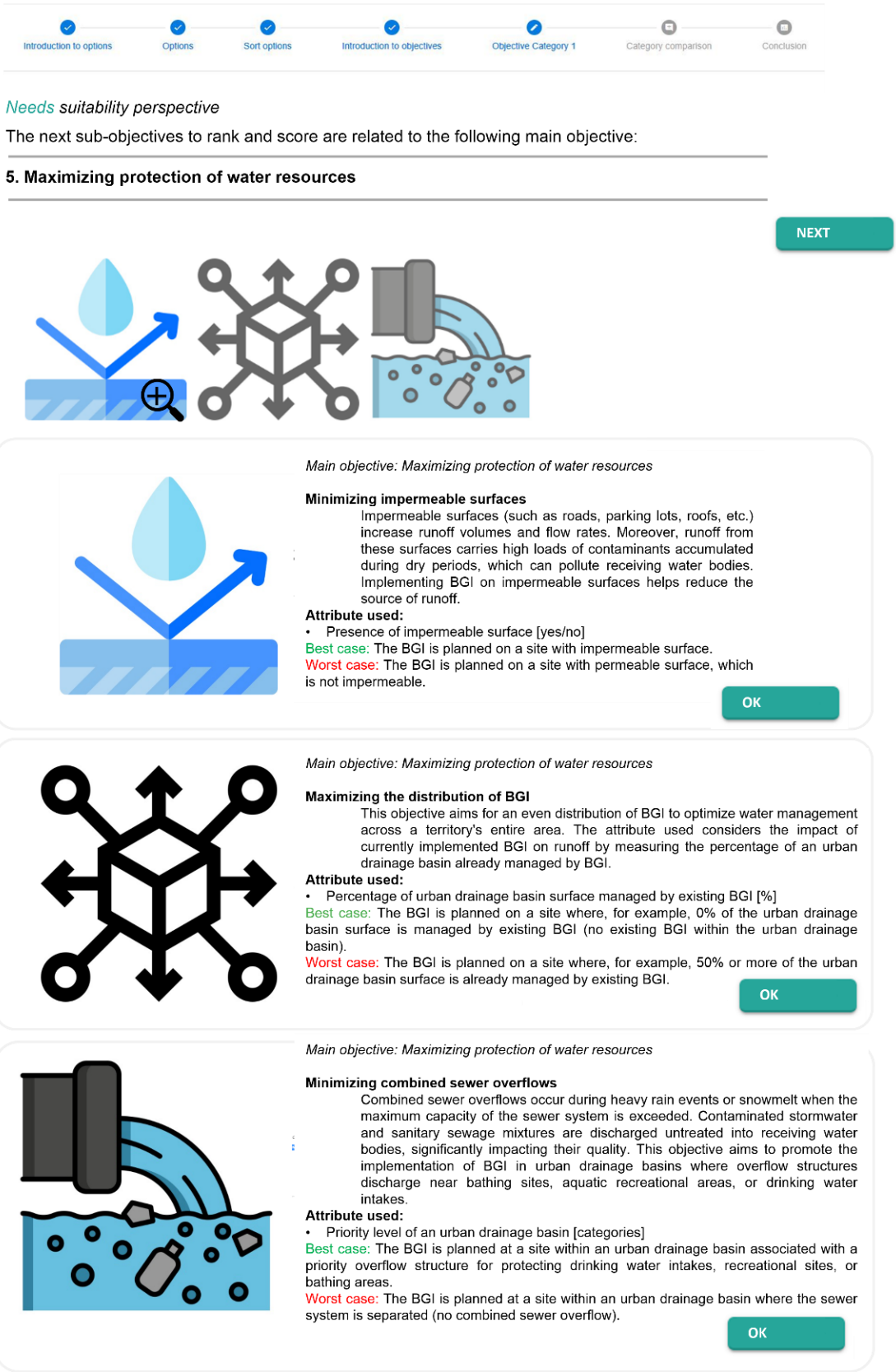


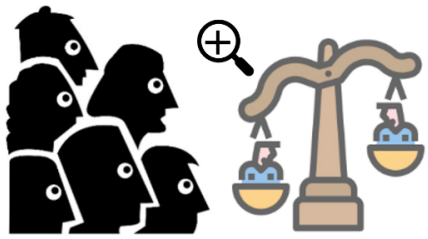
Figure E.9.2 Swing weight questionnaire excerpt for BGI group A and needs-related objectives

Needs suitability perspective

The next sub-objectives to rank and score are related to the following main objective:

6. Maximizing environmental justice

NEXT



Main objective: Maximizing enviornmental justice



Maximizing visibility of BGI

This objective aims to promote the implementation of BGI so that they benefit as many people as possible in terms of educational value or simply for the aesthetic and greenery they bring. It is assumed that visibility of these systems is more important in highly frequented areas where many people pass by and can appreciate them. Attributes used to identify highly frequented spaces include distance to points of interest, land use category, and population density. Implementing BGI near businesses, community spaces, schools, hospitals, tourist attractions, recreational sites, sports, cultural or religious establishments, train stations, bus stops, or in densely populated residential areas is therefore favored.

Attributes used:

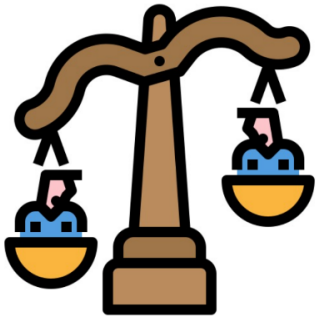
- Distance to a point of interest [m] Land use category [categories] Population density [people/km²]

Best case: The BGI is planned at a site where the distance to a point of interest or highly frequented area is short (e.g., between 0m and 50m), or the land use category encourages foot traffic (e.g., cultural, recreational, leisure, or service zones), or the population density is very high.

Worst case: The BGI is planned at a site far from a point of interest (e.g., more than 300m), or the land use category does not encourage foot traffic (e.g., manufacturing industries), or the population density is very low.

OK

Main objective: Maximizing enviornmental justice



Maximizing greening in economically and socially disadvantaged areas

This objective aims to prioritize the implementation of BGI in economically and socially disadvantaged sectors so that they benefit from the numerous secondary benefits that BGIs bring. The attribute used is the Material and Social Deprivation Index (MSDI), which characterizes the disadvantage of Quebec and Canadian populations at a small geographical unit level. The material dimension reflects deprivation of goods and amenities (assessed by education, employment, and income). The social dimension refers to the fragility of the social network, from family to community (assessed by living alone, being a single parent, and being separated, divorced, or widowed) [1].

[1] INSPQ (2023). Material and Social Deprivation Index. https://www.inspq.qc.ca/defavorisation/indice-de-defavorisation-materielle-et-sociale [accessed July 3, 2023]

Attribute used:

- Material and Social Deprivation Index [categories]

Best case: The BGI is planned at a site within an area that is materially and socially disadvantaged.

Worst case: The BGI is planned at a site within an area that is materially and socially advantaged.

OK

Figure E.9.2 Swing weight questionnaire excerpt for BGI group A and needs-related objectives (continued)

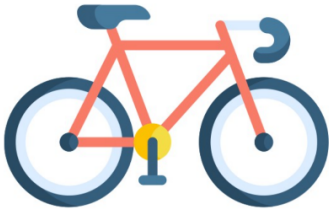
Needs suitability perspective

The next sub-objectives to rank and score are related to the following main objective:

7. Maximizing population health and well-being

NEXT





Main objective: Maximizing population health and well-being

Maximizing the user-friendliness of active and public transport

The implementation of vegetated systems can encourage and facilitate active (walking and cycling) and public (bus and subway) transportation by enhancing safety, comfort, and aesthetics of sidewalks, bike lanes, bus stops, and subway stations.

Attributes used:

- Distance to active transport infrastructure [m] Type of bike lane separator [categories] Distance to public transport infrastructure [m]

Best case: The BGI is planned at a site where active and public transport are utilized, but there are minimal safety measures (i.e., physical separators between bike lanes and roadways).

Worst case: The BGI is planned at a site where active and public transport are utilized, and significant safety measures are already in place (e.g., separators, curb extensions).

OK



Main objective: Maximizing enviornmental justice

Maximizing air quality

BGIs are promising solutions to mitigate air pollution in urban areas across several cities worldwide [1]. Attributes used to identify areas with poor air quality include air quality indices, proximity to factories or industries, and traffic density indicated by the annual average daily traffic (AADT).

[1] Tomson, M., Kumar, P., Barwise, Y., Perez, P., Forehead, H., French, K., Morawska, L. & Watts, J. F. (2021). Green infrastructure for air quality improvement in street canyons. Environment International, 146, 106288. doi:10.1016/j.envint.2020.106288

Attributes used:

- Air quality index [categories] Proximity to factories or industries [m] Traffic density [AADT]

Best case: The BGI is planned at a site where air quality is poor.

Worst case: The BGI is planned at a site where air quality is good.

OK



Main objective: Maximizing enviornmental justice

Maximizing protection of groundwater sources for drinking water

Groundwater, or the water table, is a critical resource to protect as it supplies drinking water to 25% of Quebec's population [1]. Contaminated runoff infiltrating through the soil can affect its quality. To safeguard groundwater sources, it is preferable to place BGIs designed for infiltration away from water sources and potential contamination sources such as septic tanks or contaminated sites.

[1] Government of Quebec (2023). Groundwater. https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/index.htm [accessed July 3, 2023]

Attributes used:

- Buffer zone around water source [m] Buffer zone around septic tanks [m] Presence of contaminated sites [yes/no]

Best case: The BGI is planned at a site identified as high or very high risk for drinking water intakes (DWI).

Worst case: The BGI is planned at a site identified as very low risk or not applicable for DWI.

OK

Figure E.9.2 Swing weight questionnaire excerpt for BGI group A and needs-related objectives (continued)

Needs suitability perspective

The next sub-objectives to rank and score are related to the following main objective:

8. Maximizing biodiversity

NEXT







Main objective: Maximizing biodiversity

Maximizing green cover

Vegetation cover represents the proportion of the surface covered by plants and can be measured using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which ranges from -1 (no vegetation) to 1 (complete vegetation cover). Vegetation cover can provide shelter and food for a wide variety of species.

Attribute used:

- Vegetation cover [threshold with NDVI]

Best case: The BGI is planned at a site where vegetation cover is low (NDVI < 0.3 and MNH < 3.0m = Low mineral (road, parking lot, etc.)).

Worst case: The BGI is planned at a site where vegetation cover is high (NDVI ≥ 0.3 and MNH ≥ 3.0m = High vegetation (canopy)).

OK



Main objective: Maximizing biodiversity

Maximizing ecological connectivity

Ecological connectivity is defined as the degree of connection between various natural environments within the same landscape, encompassing their components, spatial distribution, and ecological functions [1]. Ecological connectivity helps establish necessary links to conserve biodiversity, by maintaining species movement and protecting habitat corridors [2].

[1] Appalachian Corridor. Ecological connectivity. Available at: https://connectiviteecologique.com/connectivite [Accessed July 4, 2023].

[2] Government of Canada (2022). What is ecological connectivity? Available at: https://parcs.canada.ca/nature/science/conservation/connectivite-connectivity [Accessed July 4, 2023].

Attributes used:

- Priority for conservation of ecological corridors [categories] Priority for conservation of habitats [categories]

Best case: BGI is planned at a site where the priority for conservation of ecological corridors and habitats is very strong.

Worst case: BGI is planned at a site where the priority for conservation of ecological corridors and habitats is very low.

OK

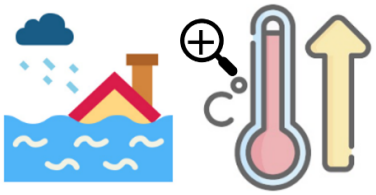
Figure E.9.2 Swing weight questionnaire excerpt for BGI group A and needs-related objectives (continued)

Needs suitability perspective

The next sub-objectives to rank and score are related to the following main objective:

9. Maximizing adaptation to climate change

NEXT





Main objective: Maximizing adaptation to climate change

Minimizing exposure to urban flooding

Urban flooding, characterized by rapid water rise during intense rainfall events, can cause material and physical damage. Implementing BGI promotes rainwater infiltration and retention, thus potentially reducing the extent of flooding. Attributes used include the index of vulnerability to hydrometeorological hazards [1] or the index of vulnerability to heavy rainfall [2].

[1] Université Laval. Atlas of vulnerability of the Quebec population to climatic hazards. https://atlas-vulnerabilite.ulaval.ca [Accessed July 4, 2023]

[2] Données Québec (2023). Vulnerability to heavy rainfall 2022 (simplified polygons). https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vmtl-vulnerabilite-changements-climatiques/resource/bbaac1eb-c902-47b6-a372-2cf7a4fcb0fb [Accessed July 4, 2023]

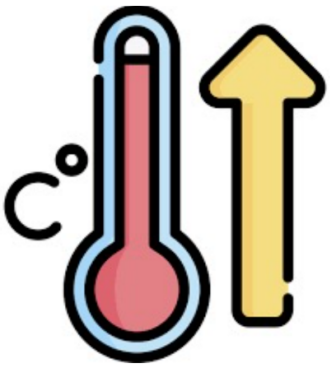
Attributes used:

- Raw index of vulnerability to hydrometeorological hazards [Categories] Index of vulnerability to heavy rainfall [Categories]

Best case: BGI is planned at a site vulnerable to urban flooding: "Very high vulnerability" or "Major"

Worst case: BGI is planned at a site not vulnerable to urban flooding: "Very low vulnerability" or "Not significant"

OK



Main objective: Maximizing adaptation to climate change

Minimizing exposure to heat islands

Heat islands refer to intra-urban areas where the air or surface temperature is higher than in surrounding urban areas. Impermeable surfaces in densely populated cities contribute to the formation of heat islands, impacting thermal comfort, human health, energy consumption, air pollution, and the quality of surface water. Implementing vegetated systems can help cool urban spaces [1]. The attribute used is the vulnerability index to heat waves, which considers factors such as distance to health facilities or public pools, or the percentage of elderly people per dissemination area [2].

[1] Stache, E., Schilperoort, B., Ottelé, M. & Jonkers, H.M. (2022). Comparative analysis in thermal behaviour of common urban building materials and vegetation and consequences for urban heat island effect, 213, 108489, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108489.

[2] Université Laval. Atlas of vulnerability of the Quebec population to climatic hazards. https://atlas-vulnerabilite.ulaval.ca [Accessed July 4, 2023]

Attributes used:

- Relative temperature deviation class [Categories] Level of vulnerability to heat waves [Categories]

Best case: BGI is planned at a site vulnerable to heat: "Very high vulnerability" or "Major"

Worst case: BGI is planned at a site not vulnerable to heat: "Very low vulnerability" or "Not significant"

OK

Figure E.9.2 Swing weight questionnaire excerpt for BGI group A and needs-related objectives (continued)

E.9.4 Feedback questionnaire

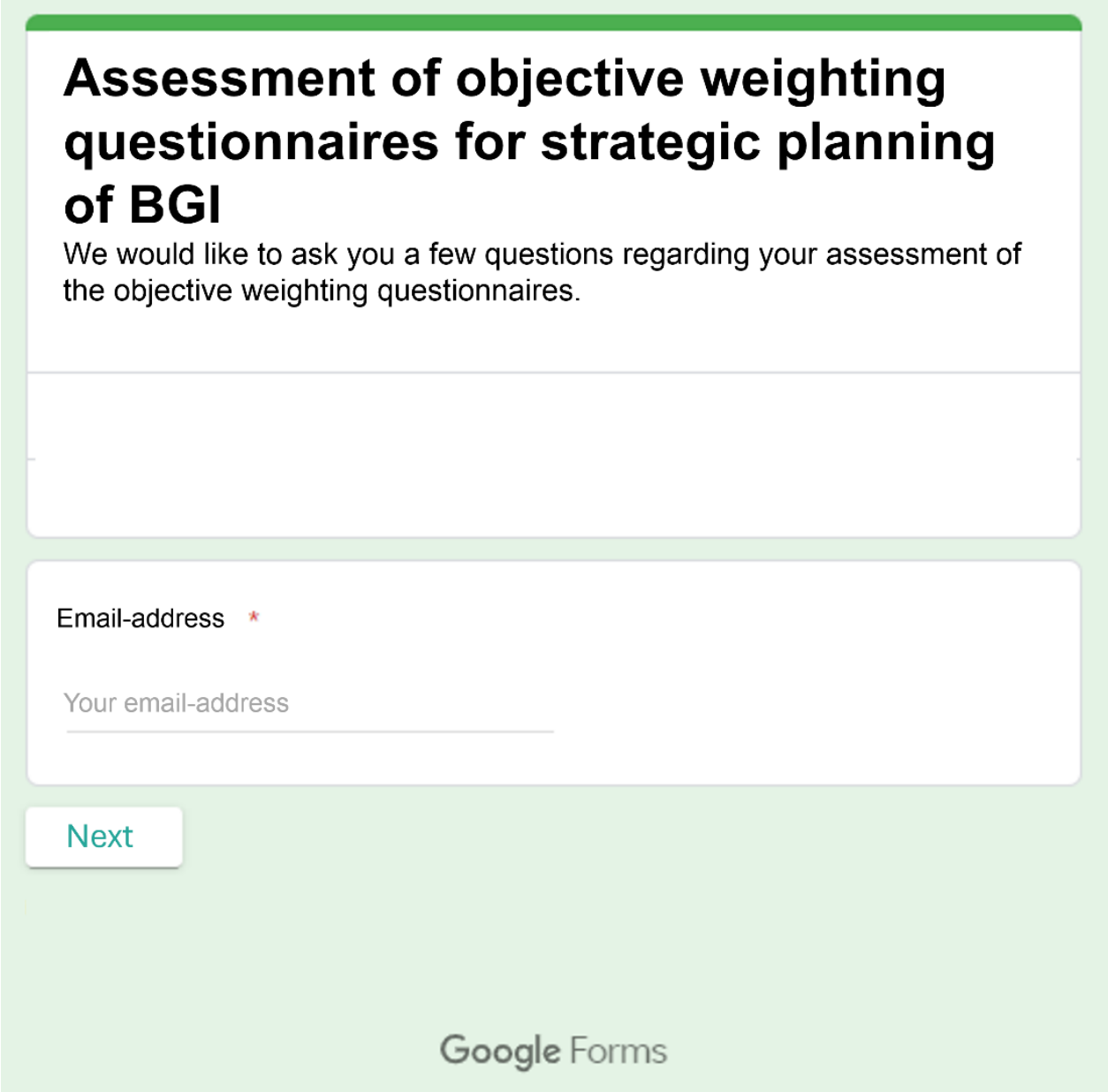
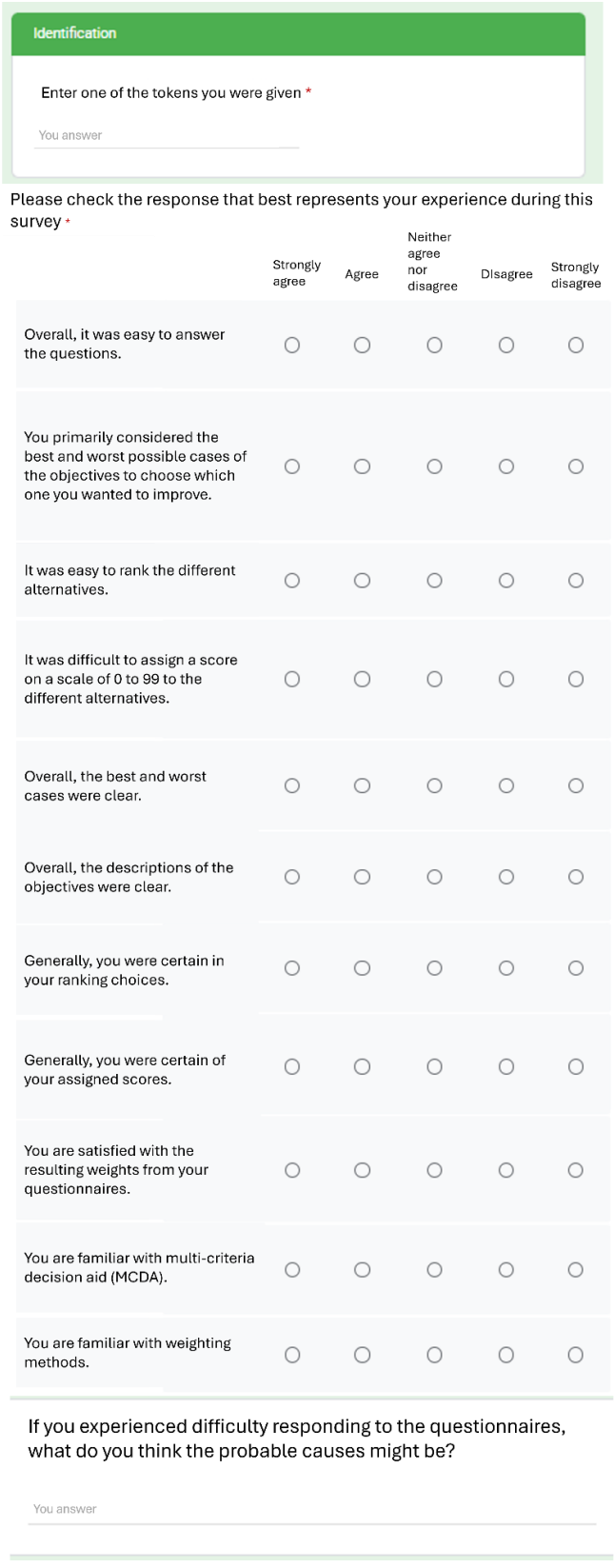


Figure E.9.3 Feedback questionnaire



Identification

Enter one of the tokens you were given *

You answer

Please check the response that best represents your experience during this survey *

	Strongly agree	Agree	Neither agree nor disagree	Disagree	Strongly disagree
Overall, it was easy to answer the questions.	○	○	○	○	○
You primarily considered the best and worst possible cases of the objectives to choose which one you wanted to improve.	○	○	○	○	○
It was easy to rank the different alternatives.	○	○	○	○	○
It was difficult to assign a score on a scale of 0 to 99 to the different alternatives.	○	○	○	○	○
Overall, the best and worst cases were clear.	○	○	○	○	○
Overall, the descriptions of the objectives were clear.	○	○	○	○	○
Generally, you were certain in your ranking choices.	○	○	○	○	○
Generally, you were certain of your assigned scores.	○	○	○	○	○
You are satisfied with the resulting weights from your questionnaires.	○	○	○	○	○
You are familiar with multi-criteria decision aid (MCDA).	○	○	○	○	○
You are familiar with weighting methods.	○	○	○	○	○

If you experienced difficulty responding to the questionnaires, what do you think the probable causes might be?

You answer

Figure E.9.3 Feedback questionnaire (continued)

Suggestions

We would like to gather your suggestions and comments regarding the process or the framework of the tool.

Are there any objectives that you believe are important for guiding the selection of BGI implementation sites that are not currently considered in the questionnaire above?

- ◯ Yes
- ◯ No

If yes, how do you think these objectives could be measured spatially?

You answer

Comments

Please feel free to add any additional comments about the research activity or the current research project in the box below.

You answer

End

We thank you for your participation in this research activity!

If you have any further questions or additional comments, please do not hesitate to contact the project lead: sandrine.lacroix@polymtl.ca

Figure E.9.3 Feedback questionnaire (continued)

E.10 SI-Results

E.10.1 Preliminary case study

E.10.1.1 Importance of higher-level objectives

Opportunities

The higher-level objective of *maximizing performance* (w_{mean}= 0.274, SD=0.059) receives the highest mean weight, unlike the main case study where it was the lowest for BGI types (A) and (B). Conversely, *maximizing the ease of integration into the urban form* (w_{mean}= 0.237, SD=0.08) remains a priority for stakeholders in the preliminary case study. With nearly equal mean weights, *maximizing public acceptance* (w_{mean}= 0.130, SD=0.077) and *minimizing conflict with the built environment* (w_{mean}= 0.130, SD=0.077) appear to be of lesser importance.

Needs

The difference in mean weights among the objectives is smaller for the needs objectives, indicating less distinct priorities for the benefits provided by BGIs. Similar to the main case study, the *protection of water resources* (w_{mean}= 0.235, SD=0.061) emerges as the most important higher-level objective, closely followed by *maximizing the security of water supply* (w_{mean}= 0.233, SD=0.051). This is not surprising since the potable water supply in the City of Trois-Rivières is primarily sourced from groundwater, making it a concern for this urban context. Interestingly, there is a wide range of opinions regarding *maximizing climate adaptation* (w_{mean}= 0.114, SD=0.058), resulting in a lower mean weight. Social benefits appear to be the least important.

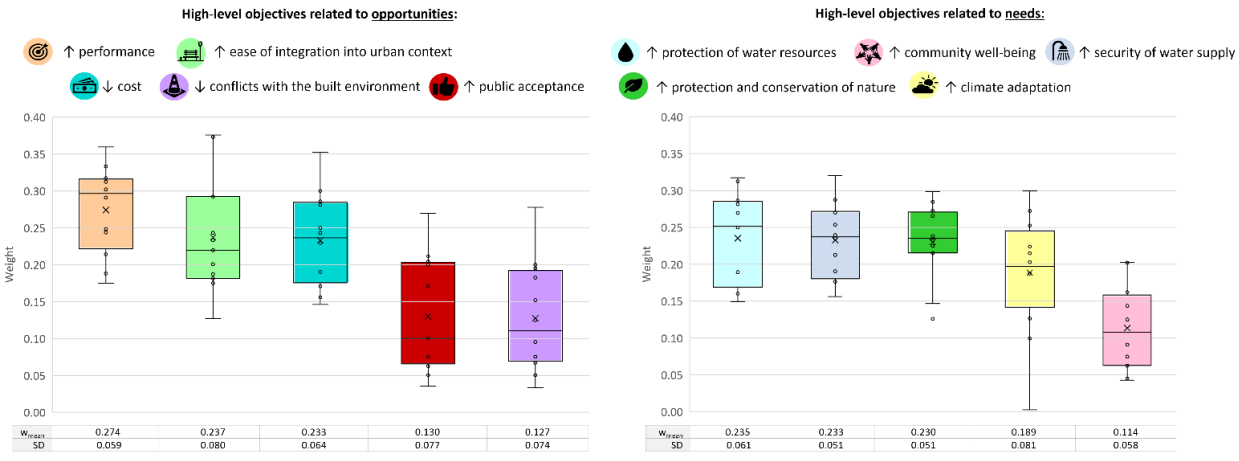


Figure E.10.1 Preliminary case study resulting weights for higher-level objectives for each suitability perspective; opportunities (left) and needs (right)

E.10.1.2 Importance lower-level objectives

Opportunities

The highest mean weight observed is *prioritizing implementation of BGI in areas where public awareness of environmental issues is high* (w_{mean}= 0.101), i.e. an objective aimed at maximizing the social acceptability of the projects (and avoiding opposition). It is also the most important objective among all objectives weighted across both suitability perspectives. However, this lower-level objective is the most divergent objective according to stakeholder preferences (SD= 0.084). This objective was based on the original SSANTO framework of Kuller et al. (2017), but was removed of the objectives-based hierarchies framework of the main case study (Lacroix et al., 2024) because of strong prejudice implied. It should also be noted that this is the only branch of the objective hierarchy with only two objectives, which can create a bias.

As observed for the main case study, *maximizing soils with optimal characteristics* is a priority for stakeholders (w_{mean}= 0.076, SD= 0.029).

The three lower-level objectives related to *minimizing costs* are in the top priorities. *Minimizing cost of land purchase*, however has more varied preferences (SD= 0.042). Again, this could suggest a challenge of eco-gentrification. This objective was moreover removed form the framework for that purpose, but this choice is support by this divergence of ideas.

Both objectives introduced to consider cold climate challenges were low weighted, namely *protecting systems from de-icings salts* (w_{mean}= 0.042, SD= 0.021) and *protecting systems from used snow* (w_{mean}= 0.026, SD= 0.020). This result is in line with the results of the co-creation and validation workshops of (Lacroix et al., 2024), where the stakeholders votes for the exclusion of the de-icings salts objective was more than 50%, because of the prohibit nature it implies.

The second lower-level objective aimed at *maximizing social acceptability of projects*, i.e. *prioritising implementation of BGI in areas where the population is highly educated*, received the lowest average weight, with a high degree of consensus among stakeholders. Again, this objective was removed for the frameworks.

Needs

As observed in the main case study and consistent with our hypothesis, *reducing exposure of vulnerable populations to heat* (w_{mean}= 0.107, SD=0.055) emerges as a top priority for stakeholders. Following closely, *reducing the vulnerability of the water table* ranks second-highest in mean weight (w_{mean}= 0.103, SD=0.030), with a strong consensus. This result was expected, considering that all the stakeholders involved in this preliminary case study are affiliated with a city, which primarily relies on groundwater for its drinking water supply. Similarly, the *vulnerability of drinking water intakes* ranks prominently in the priority list, potentially linked to the importance of water sourcing methods. In contrast, this objective received among the lowest weights in the main case study city, where surface water is utilized for drinking purposes. As we expected, lower-level objectives related to water resources protection emerged as priorities: *reducing combined sewer overflows* (w_{mean}= 0.103, SD=0.046) and *reducing impervious surfaces* (w_{mean}= 0.086, SD=0.032). The agreement between among different stakeholders is however low.

All the five lower-level objectives related to *improving community well-being* received the lowest weights (w_{mean} from 0.017 to 0.027). *Improving the usability of active and public transport* is the lowest mean weight and emerged as the more consensual objective for stakeholders.

Table E.10.1 Preliminary case study weights statistics for BGI planning objectives through swing elicitation method (n=12)

		Participants' identification												Descriptive Statistics				
Main objective	**Sub-objective**	**A**	**H**	**I**	**J**	**K**	**E**	**F**	**B**	**D**	**C**	**L**	**G**	**Mean**	**Median**	**Min**	**Max**	**SD**
1. ↑ performance	Minimize exposure to potential sites of contamination	0.109	0.088	0.073	0.045	0.053	0.086	0.104	0.059	0.069	0.056	0.109	0.095	0.079	0.079	0.045	0.109	0.023
	Maximize placement on soils of optimal characteristics	0.099	0.098	0.104	0.059	0.042	0.122	0.052	0.053	0.092	0.045	0.100	0.047	0.076	0.075	0.042	0.122	0.029
	Maximize placement in areas receiving adequate precipitation quantity	0.044	0.049	0.046	0.052	0.034	0.049	0.042	0.035	0.060	0.017	0.086	0.074	0.049	0.047	0.017	0.086	0.018
	Minimize placement in areas with high exposure to de-icing salts	0.055	0.059	0.023	0.049	0.034	0.043	0.083	0.035	0.024	0.023	0.064	0.009	0.042	0.039	0.009	0.083	0.021
	Minimize placement in areas with used snow	0.011	0.039	0.057	0.040	0.052	0.002	0.031	0.006	0.046	0.034	0.001	0.024	0.029	0.033	0.001	0.057	0.020
2. ↓ costs	Maximize placement on appropriate slopes	0.064	0.104	0.104	0.056	0.058	0.063	0.073	0.103	0.048	0.119	0.214	0.018	0.085	0.068	0.018	0.214	0.050
	Maximize ease of integration with existing drainage infrastructure	0.095	0.065	0.077	0.063	0.036	0.052	0.181	0.037	0.048	0.042	0.122	0.085	0.075	0.064	0.036	0.181	0.042
	Minimize the cost of land purchase	0.031	0.130	0.062	0.051	0.063	0.115	0.027	0.147	0.095	0.089	0.017	0.043	0.073	0.062	0.017	0.147	0.042
3. ↑ ease of integration into urban planning	Maximize placement on land that is easy to acquire or to set up	0.028	0.056	0.053	0.030	0.038	0.037	0.061	0.117	0.099	0.063	0.021	0.069	0.056	0.055	0.021	0.117	0.029
	Maximize placement on suitable size lands	0.035	0.039	0.045	0.056	0.066	0.031	0.072	0.123	0.124	0.050	0.021	0.099	0.063	0.053	0.021	0.124	0.035
	Maximize ease of integration into the road network	0.028	0.066	0.034	0.044	0.064	0.036	0.047	0.031	0.032	0.031	0.021	0.074	0.042	0.035	0.021	0.074	0.017
	Maximize opportunities from planned projects and work	0.016	0.046	0.041	0.046	0.059	0.041	0.014	0.099	0.062	0.031	0.021	0.025	0.042	0.041	0.014	0.099	0.024
	Maximize integration with existing sites that support BGI implementation	0.021	0.026	0.027	0.044	0.017	0.036	0.025	0.006	0.056	0.025	0.104	0.025	0.034	0.026	0.006	0.104	0.025
4. ↓ conflicts with the built environment	Consider heritage sites	0.045	0.023	0.029	0.048	0.074	0.043	0.029	0.024	0.041	0.048	0.016	0.026	0.037	0.035	0.016	0.074	0.016
	Minimize attraction of birds in the vicinity of air traffic	0.041	0.002	0.051	0.087	0.078	0.011	0.074	0.049	0.015	0.080	0.026	0.132	0.054	0.050	0.002	0.132	0.038
	Consider public utility easement sites	0.009	0.008	0.072	0.061	0.030	0.022	0.022	0.002	0.010	0.048	0.008	0.119	0.034	0.022	0.002	0.119	0.035
5. ↑ implementation of BGI at sites with high potential social acceptability	Maximize placement in areas where the population is highly educated	0.013	0.044	0.059	0.049	0.006	0.000	0.018	0.036	0.034	0.046	0.025	0.018	0.029	0.030	0.000	0.059	0.019
	Maximize placement in areas where public awareness of environmental issues is high	0.257	0.056	0.041	0.122	0.198	0.211	0.045	0.039	0.045	0.154	0.025	0.018	0.101	0.050	0.018	0.257	0.084
6. ↑ protection of water resources	Reduce combined sewer overflows	0.098	0.109	0.059	0.046	0.083	0.191	0.071	0.159	0.079	0.063	0.156	0.121	0.103	0.091	0.046	0.191	0.046
	Reduce impervious surfaces	0.078	0.136	0.078	0.050	0.063	0.048	0.053	0.119	0.071	0.105	0.097	0.135	0.086	0.078	0.048	0.136	0.032
	Improve distribution of BGI across the urban area	0.074	0.068	0.023	0.066	0.045	0.048	0.025	0.040	0.039	0.084	0.028	0.013	0.046	0.042	0.013	0.084	0.022
7. ↑ adaptation to climate change	Reduce exposure of vulnerable populations to heat	0.125	0.068	0.050	0.115	0.163	0.091	0.132	0.095	0.168	0.079	0.001	0.200	0.107	0.105	0.001	0.200	0.055
	Reduce exposure of vulnerable populations to flooding	0.063	0.135	0.050	0.075	0.052	0.181	0.092	0.095	0.084	0.047	0.001	0.100	0.081	0.079	0.001	0.181	0.046
8. ↑ security of water supply	Reduce vulnerability of drinking water intakes	0.097	0.069	0.128	0.102	0.070	0.118	0.085	0.080	0.091	0.077	0.137	0.060	0.093	0.088	0.060	0.137	0.024
	Reduce vulnerability of the water table	0.087	0.063	0.128	0.091	0.070	0.147	0.141	0.100	0.105	0.062	0.126	0.120	0.103	0.103	0.062	0.147	0.030
	Improve access to irrigation water demand	0.029	0.024	0.064	0.077	0.037	0.007	0.028	0.010	0.039	0.039	0.025	0.060	0.037	0.033	0.007	0.077	0.021
9. ↑ population health and well-being	Improve the usability of active and public	0.011	0.003	0.029	0.032	0.036	0.007	0.005	0.012	0.040	0.018	0.001	0.014	0.017	0.013	0.001	0.040	0.014
	Improve impoverished areas	0.023	0.009	0.054	0.045	0.034	0.007	0.020	0.014	0.024	0.031	0.051	0.016	0.027	0.023	0.007	0.054	0.016
	Improve social cohesion Improve impoverished areas	0.032	0.022	0.022	0.026	0.045	0.007	0.008	0.012	0.002	0.043	0.041	0.002	0.022	0.022	0.002	0.045	0.016
	transport Improve access to recreational green spaces	0.035	0.013	0.028	0.036	0.041	0.014	0.026	0.012	0.001	0.061	0.010	0.012	0.024	0.020	0.001	0.061	0.017
	Improve BGI visibility	0.025	0.015	0.015	0.023	0.046	0.007	0.016	0.012	0.024	0.049	0.041	0.002	0.023	0.019	0.002	0.049	0.015
10. ↑ biodiversity	Improve greening	0.063	0.084	0.103	0.066	0.060	0.042	0.041	0.108	0.108	0.083	0.033	0.035	0.069	0.064	0.033	0.108	0.028
	Improve biodiversity	0.057	0.067	0.041	0.059	0.054	0.021	0.062	0.054	0.021	0.075	0.094	0.036	0.053	0.056	0.021	0.094	0.021
	Improve ecological connectivity	0.054	0.072	0.051	0.042	0.057	0.032	0.093	0.022	0.017	0.033	0.081	0.034	0.049	0.047	0.017	0.093	0.024
	Improve wildlife habitat	0.051	0.042	0.077	0.050	0.045	0.032	0.103	0.054	0.086	0.050	0.077	0.042	0.059	0.050	0.032	0.103	0.022

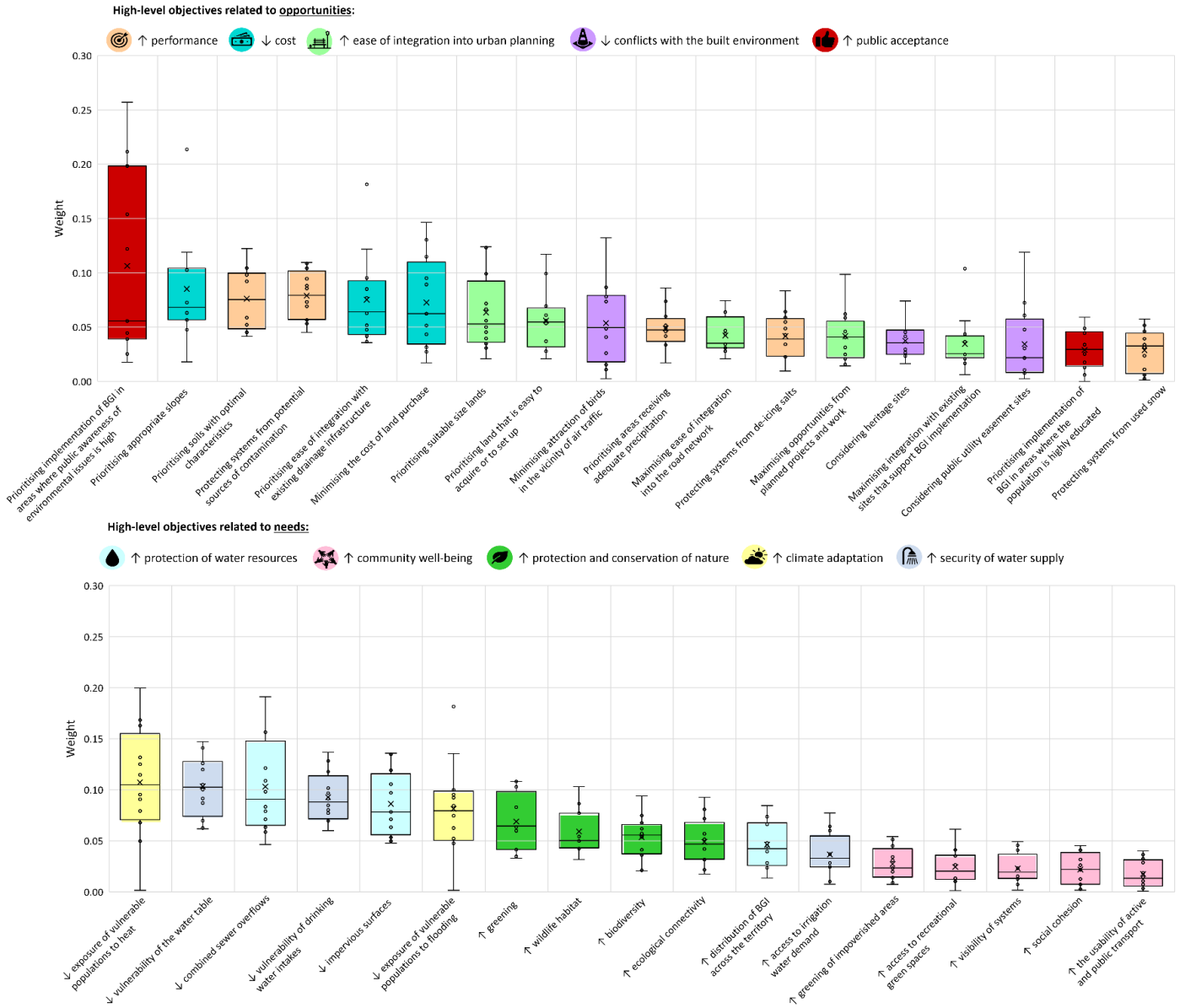


Figure E.10.2 Preliminary case study resulting weights by higher-level objectives for each suitability perspective; opportunities (top) and needs (bottom)

E.10.2 Main case study: Individual weights by stakeholder

Table E.10.2 Main case study individual stakeholder weights of objectives, BGI group A

		Participant identification														Descriptive statistic				
Main objective	**Sub-objective**	**B**	**C**	**G**	**H**	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**	**O**	**P**	**Q**	**R**	**S**	**Mean**	**Median**	**Min**	**Max**	**SD**
1. ↑ performance	↑ water infiltration into soils	0.297	0.481	0.164	0.117	0.177	0.130	0.085	0.149	0.005	0.062	0.102	0.121	0.078	0.138	0.150	0.126	0.005	0.481	0.116
	↓ groundwater resurgence	0.059	0.019	0.082	0.158	0.124	0.066	0.076	0.076	0.019	0.015	0.081	0.061	0.023	0.124	0.070	0.071	0.015	0.158	0.043
2. ↓ costs	↓ construction costs related to topography	0.181	0.208	0.112	0.157	0.116	0.128	0.183	0.095	0.322	0.110	0.081	0.121	0.099	0.171	0.149	0.124	0.081	0.322	0.063
	↓ sewer connection costs	0.036	0.042	0.150	0.106	0.094	0.069	0.091	0.158	0.032	0.082	0.135	0.242	0.168	0.137	0.110	0.100	0.032	0.242	0.059
3. ↑ ease of integration into urban planning	↑ ease of integration into the land tenure system	0.166	0.063	0.099	0.050	0.108	0.023	0.068	0.040	0.236	0.047	0.152	0.079	0.078	0.075	0.092	0.076	0.023	0.236	0.058
	↑ ease of integration into the road network	0.017	0.025	0.097	0.053	0.086	0.087	0.085	0.080	0.224	0.150	0.076	0.039	0.129	0.096	0.089	0.086	0.017	0.224	0.053
	↑ ease of integration into planned works	0.151	0.013	0.132	0.053	0.049	0.087	0.170	0.161	0.012	0.188	0.106	0.155	0.154	0.107	0.110	0.119	0.012	0.188	0.059
4. ↓ conflicts with the built environment	↓conflicts with building foundations	0.084	0.100	0.089	0.201	0.101	0.205	0.069	0.113	0.121	0.086	0.110	0.036	0.135	0.088	0.110	0.101	0.036	0.205	0.046
	↓ conflicts with existing infrastructures	0.008	0.050	0.075	0.105	0.145	0.205	0.173	0.126	0.030	0.260	0.157	0.145	0.135	0.066	0.120	0.131	0.008	0.260	0.070
5. ↑ protection of water resources	↓ impervious surfaces	0.084	-	0.116	0.073	0.086	0.078	0.119	0.025	0.152	0.083	0.064	0.125	0.150	0.082	0.095	0.084	0.025	0.152	0.043
	↑ BGI distribution	0.113	-	0.014	0.052	0.071	0.078	0.048	0.100	0.050	0.032	0.048	0.031	0.107	0.091	0.064	0.052	0.014	0.113	0.035
	↓ combined sewer overflows	0.056	-	0.137	0.073	0.094	0.078	0.107	0.095	0.152	0.126	0.080	0.094	0.045	0.068	0.093	0.094	0.045	0.152	0.039
6. ↑ enviornmental justice	↑ visibility of BGI	0.062	-	0.044	0.099	0.110	0.004	0.039	0.063	0.010	0.035	0.084	0.082	0.091	0.094	0.063	0.063	0.004	0.110	0.037
	↑ greening of materially and socially disadvantaged areas	0.127	-	0.089	0.085	0.084	0.060	0.098	0.059	0.001	0.053	0.121	0.168	0.181	0.111	0.095	0.089	0.001	0.181	0.053
7. ↑ population health and well-being	↑ user-friendliness of active and public transportation	0.038	-	0.069	0.079	0.071	0.077	0.035	0.081	0.010	0.059	0.081	0.063	0.069	0.104	0.064	0.069	0.010	0.104	0.029
	↑ air quality	0.047	-	0.061	0.075	0.062	0.151	0.031	0.054	0.040	0.089	0.057	0.031	0.034	0.063	0.061	0.057	0.031	0.151	0.035
	↑ protection of underground drinking water sources	0.042	-	0.136	0.075	0.041	0.006	0.044	0.108	0.198	0.067	0.041	0.031	0.048	0.026	0.066	0.044	0.006	0.198	0.054
8. ↑ biodiversity	↑ green cover	0.108	-	0.053	0.108	0.087	0.230	0.126	0.122	0.034	0.063	0.055	0.094	0.066	0.104	0.096	0.094	0.034	0.230	0.054
	↑ ecological connectivity	0.108	-	0.040	0.103	0.072	0.005	0.107	0.061	0.002	0.125	0.112	0.094	0.088	0.078	0.076	0.088	0.002	0.125	0.043
9. ↑ adaptation to climate change	↓ exposure to urban flooding	0.108	-	0.133	0.089	0.126	0.117	0.070	0.122	0.283	0.202	0.142	0.094	0.059	0.074	0.125	0.117	0.059	0.283	0.067
	↓ exposure to heat islands	0.108	-	0.107	0.089	0.096	0.117	0.176	0.110	0.071	0.067	0.114	0.094	0.062	0.105	0.101	0.105	0.062	0.176	0.039

Table E.10.3 Main case study individual stakeholder weights of objectives, BGI group B

		Participant identification														Descriptive statistic				
Main objective	**Sub-objective**	**A**	**B**	**D**	**E**	**F**	**H**	**I**	**K**	**M**	**N**	**P**	**R**	**S**	**T**	**Mean**	**Median**	**Min**	**Max**	**SD**
1. ↑ mance	↓ water flow	0.094	0.263	0.095	0.155	0.093	0.129	0.182	0.190	0.000	0.188	0.157	0.478	0.195	0.134	0.168	0.156	0.000	0.478	0.109
	↓ groundwater resurgence	0.188	0.066	0.048	0.081	0.134	0.083	0.133	0.180	0.095	0.112	0.126	0.110	0.156	0.192	0.122	0.119	0.048	0.192	0.046
2. ↑ ease of integration into urban planning	↑ ease of integration into the land tenure system	0.035	0.139	0.327	0.106	0.143	0.098	0.155	0.111	0.122	0.104	0.172	0.090	0.116	0.113	0.131	0.114	0.035	0.327	0.065
	↑ location on sites with sufficient space	0.174	0.167	0.163	0.159	0.128	0.150	0.204	0.072	0.245	0.065	0.086	0.112	0.145	0.120	0.142	0.148	0.065	0.245	0.050
	↑ ease of integration into planned works	0.087	0.139	0.082	0.207	0.183	0.160	0.084	0.094	0.061	0.130	0.120	0.034	0.072	0.150	0.115	0.107	0.034	0.207	0.049
3. ↓ conflicts with the built environment	↓ conflicts with building foundations	0.117	0.167	0.163	0.120	0.068	0.133	0.082	0.122	0.128	0.154	0.071	0.044	0.090	0.089	0.111	0.119	0.044	0.167	0.038
	↓ conflicts with existing infrastructures	0.234	0.018	0.082	0.084	0.227	0.103	0.061	0.128	0.183	0.138	0.179	0.044	0.076	0.127	0.120	0.115	0.018	0.234	0.066
	↓ conflicts between air traffic and birds	0.070	0.042	0.041	0.089	0.023	0.143	0.100	0.102	0.165	0.108	0.089	0.088	0.150	0.076	0.092	0.089	0.023	0.165	0.041
5. ↑ protection of water resources	↓ impervious surfaces	0.077	0.095	0.054	0.107	0.069	0.108	0.103	0.074	0.302	0.068	0.051	0.089	0.081	0.054	0.095	0.079	0.051	0.302	0.063
	↑ BGI distribution	0.015	0.090	0.013	0.033	0.104	0.081	0.081	0.090	0.075	0.043	0.069	0.038	0.040	0.072	0.060	0.070	0.013	0.104	0.029
	↓ combined sewer overflows	0.099	0.060	0.027	0.127	0.139	0.054	0.121	0.106	0.000	0.085	0.086	0.127	0.077	0.065	0.084	0.086	0.000	0.139	0.040
6. ↑ environmental justice	↑ access to green spaces	0.098	0.131	0.121	0.053	0.069	0.098	0.096	0.045	0.172	0.074	0.100	0.115	0.061	0.103	0.095	0.098	0.045	0.172	0.034
	↑ greening of materially and socially disadvantaged areas	0.080	0.065	0.242	0.107	0.087	0.098	0.083	0.090	0.017	0.106	0.167	0.057	0.081	0.083	0.097	0.085	0.017	0.242	0.053
7. ↑ population health and well-being	↑ air quality	0.066	0.057	0.145	0.045	0.026	0.095	0.162	0.094	0.004	0.137	0.045	0.034	0.087	0.115	0.079	0.076	0.004	0.162	0.048
	↑ visibility of BGI	0.073	0.114	0.036	0.061	0.052	0.076	0.096	0.028	0.072	0.070	0.091	0.034	0.052	0.069	0.066	0.069	0.028	0.114	0.025
8. ↑ biodiversity	↑ green cover	0.182	0.098	0.179	0.133	0.134	0.139	0.059	0.121	0.025	0.093	0.071	0.097	0.116	0.109	0.111	0.113	0.025	0.182	0.043
	↑ ecological connectivity	0.091	0.123	0.090	0.081	0.100	0.105	0.053	0.109	0.126	0.048	0.143	0.072	0.166	0.129	0.102	0.102	0.048	0.166	0.033
9. ↑ adaptation to climate change	↓ exposure to urban flooding	0.146	0.069	0.030	0.169	0.044	0.073	0.063	0.131	0.002	0.145	0.088	0.250	0.107	0.099	0.101	0.093	0.002	0.250	0.064
	↓ exposure to heat islands	0.073	0.098	0.061	0.084	0.175	0.073	0.083	0.112	0.205	0.131	0.088	0.088	0.133	0.104	0.108	0.093	0.061	0.205	0.041

Table E.10.4 Main case study individual stakeholder weights of objectives, BGI group B

		Participant identification											Descriptive statistic				
Main objective	**Sub-objective**	**B**	**D**	**E**	**F**	**G**	**J**	**L**	**N**	**O**	**Q**	**T**	**Mean**	**Median**	**Min**	**Max**	**SD**
1. ↑ performance	↑ water infiltration into soils	0.123	0.251	0.127	0.150	0.129	0.087	0.086	0.175	0.020	0.267	0.128	0.140	0.128	0.020	0.267	0.071
	↑ space available for roots	0.089	0.065	0.103	0.077	0.058	0.087	0.064	0.088	0.059	0.133	0.096	0.083	0.087	0.058	0.133	0.022
	↑ tree growth	0.100	0.128	0.092	0.113	0.066	0.087	0.107	0.070	0.078	0.000	0.128	0.088	0.092	0.000	0.128	0.036
2. ↓ costs	↓ cost of demineralization work	0.043	0.074	0.061	0.081	0.086	0.247	0.128	0.156	0.143	0.067	0.088	0.107	0.086	0.043	0.247	0.058
	↓ land acquisition	0.206	0.038	0.152	0.107	0.168	0.010	0.159	0.078	0.107	0.133	0.053	0.110	0.107	0.010	0.206	0.061
3. ↑ ease of integration into urban planning	↑ ease of integration into the road network	0.047	0.074	0.065	0.126	0.127	0.007	0.134	0.056	0.134	0.067	0.155	0.090	0.074	0.007	0.155	0.047
	↑ ease of integration into planned works	0.234	0.148	0.128	0.252	0.155	0.240	0.168	0.110	0.179	0.133	0.108	0.169	0.155	0.108	0.252	0.052
4. ↓ conflicts with the built environment	↓ conflicts with building foundations	0.099	0.147	0.182	0.040	0.091	0.007	0.128	0.148	0.047	0.086	0.082	0.096	0.091	0.007	0.182	0.053
	↓ conflicts with existing infrastructures	0.060	0.075	0.091	0.054	0.121	0.229	0.026	0.119	0.234	0.114	0.164	0.117	0.114	0.026	0.234	0.068
5. ↑ protection of water resources	↓ impervious surfaces	0.206	0.061	0.102	0.108	0.121	0.124	0.099	0.148	0.110	0.189	0.061	0.121	0.110	0.061	0.206	0.046
	↓ combined sewer overflows	0.052	0.030	0.148	0.145	0.173	0.123	0.025	0.074	0.137	0.094	0.122	0.102	0.122	0.025	0.173	0.051
6. ↑ environmental justice	↑ visibility of BGI	0.031	0.073	0.030	0.065	0.042	0.067	0.117	0.088	0.055	0.000	0.073	0.058	0.065	0.000	0.117	0.032
	↑ greening of materially and socially disadvantaged areas	0.124	0.291	0.073	0.087	0.105	0.066	0.130	0.097	0.036	0.283	0.121	0.129	0.105	0.036	0.291	0.083
7. ↑ population health and well-being	↑ user-friendliness of active and public transportation	0.035	0.050	0.052	0.050	0.025	0.033	0.061	0.052	0.067	0.064	0.043	0.048	0.050	0.025	0.067	0.013
	↑ air quality	0.044	0.075	0.080	0.062	0.038	0.033	0.056	0.058	0.084	0.048	0.053	0.057	0.056	0.033	0.084	0.017
	↑ protection of underground drinking water sources	0.027	0.050	0.102	0.083	0.054	0.033	0.018	0.050	0.050	0.000	0.067	0.049	0.050	0.000	0.102	0.029
	↓ noise pollution	0.023	0.102	0.025	0.033	0.031	0.033	0.050	0.038	0.004	0.032	0.042	0.038	0.033	0.004	0.102	0.024
8. ↑ biodiversity	↑ green cover	0.047	0.088	0.113	0.060	0.057	0.082	0.082	0.037	0.040	0.062	0.071	0.067	0.062	0.037	0.113	0.023
	↑ ecological connectivity	0.084	0.045	0.051	0.050	0.030	0.081	0.062	0.049	0.081	0.083	0.074	0.063	0.062	0.030	0.084	0.019
	↑ functional diversity	0.093	0.045	0.030	0.067	0.060	0.081	0.066	0.062	0.060	0.000	0.083	0.059	0.062	0.000	0.093	0.026
9. ↑ adaptation to climate change	↓ exposure to urban flooding	0.089	0.061	0.129	0.081	0.143	0.121	0.078	0.130	0.183	0.072	0.090	0.107	0.090	0.061	0.183	0.037
	↓ exposure to heat islands	0.146	0.030	0.065	0.108	0.122	0.123	0.156	0.117	0.092	0.072	0.100	0.103	0.108	0.030	0.156	0.037

E.10.3 Main case study: Hypothesis of spearman correlation test

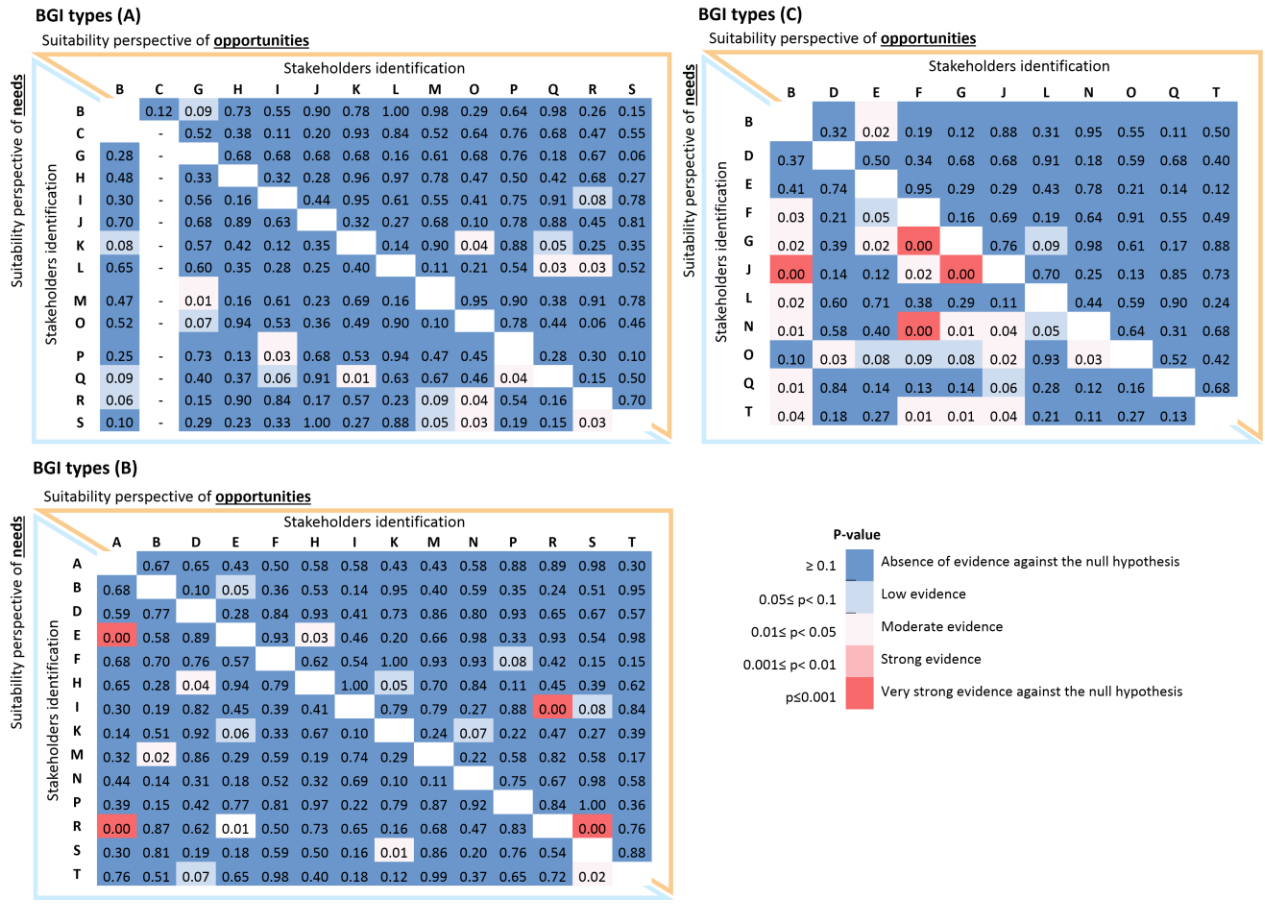
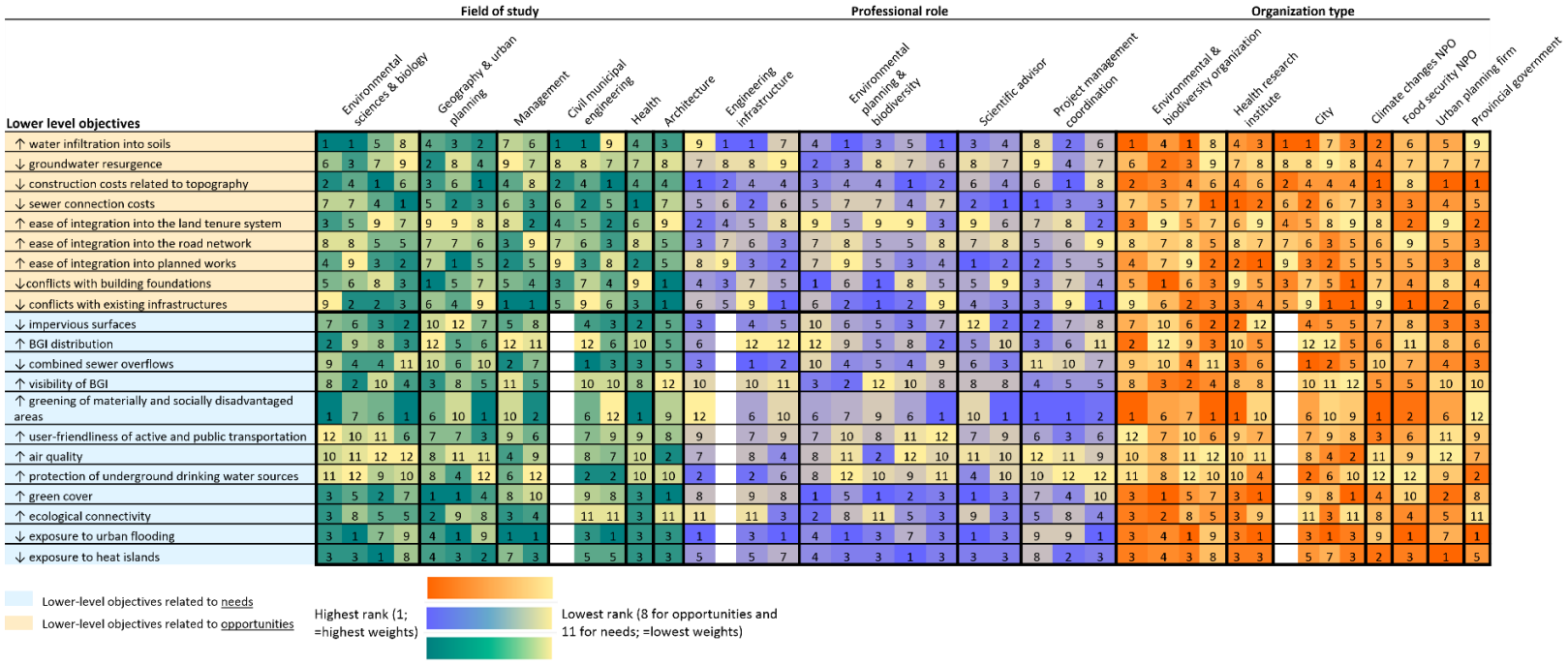


Figure E.10.2 P-values resulting from hypothesis testing between pairs of stakeholders. P-values help to understand if the Spearman correlation is statistically significant. It varies between 0 and 1, with values close to 1 suggesting no significant relationship and close to 0 more unlikely due to chance and that there is a significant relationship.

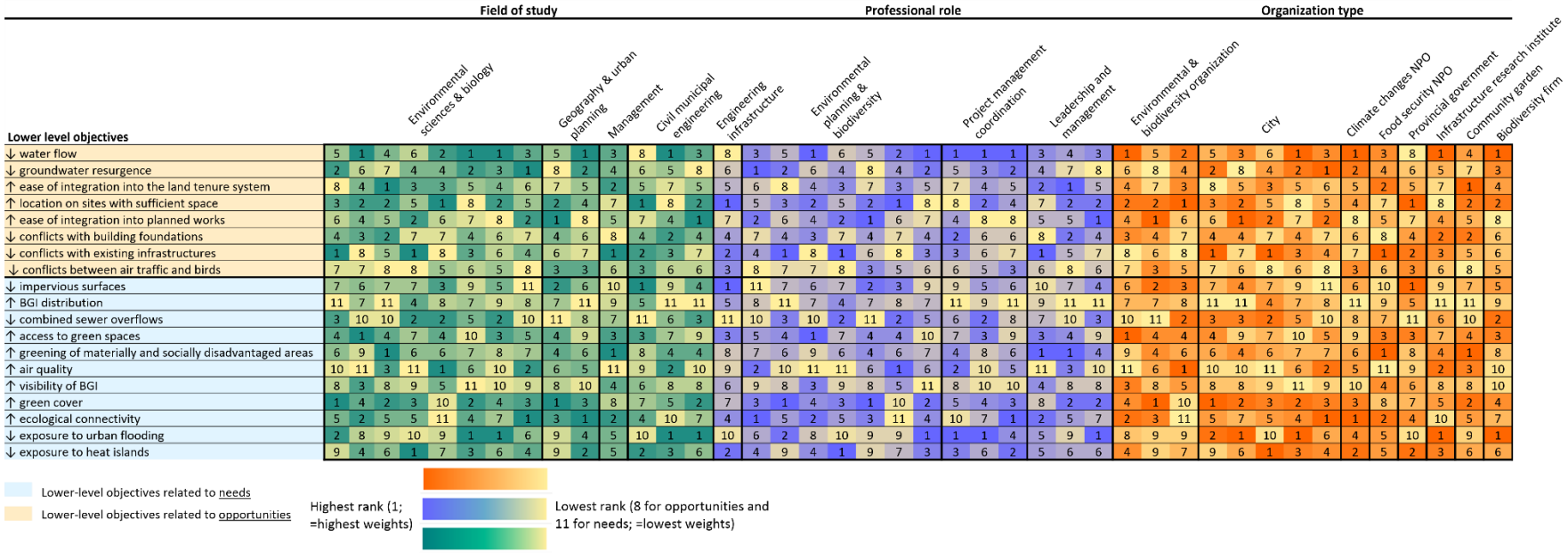
E.10.4 Stakeholder's agreement on the general set of objectives

Due to the small sample size, we cannot conclude that one of the independent variables influences the preferences of stakeholders. However, we can raise some observations (Figure E.10.3, Figure E.10.4 and Figure E.10.5).



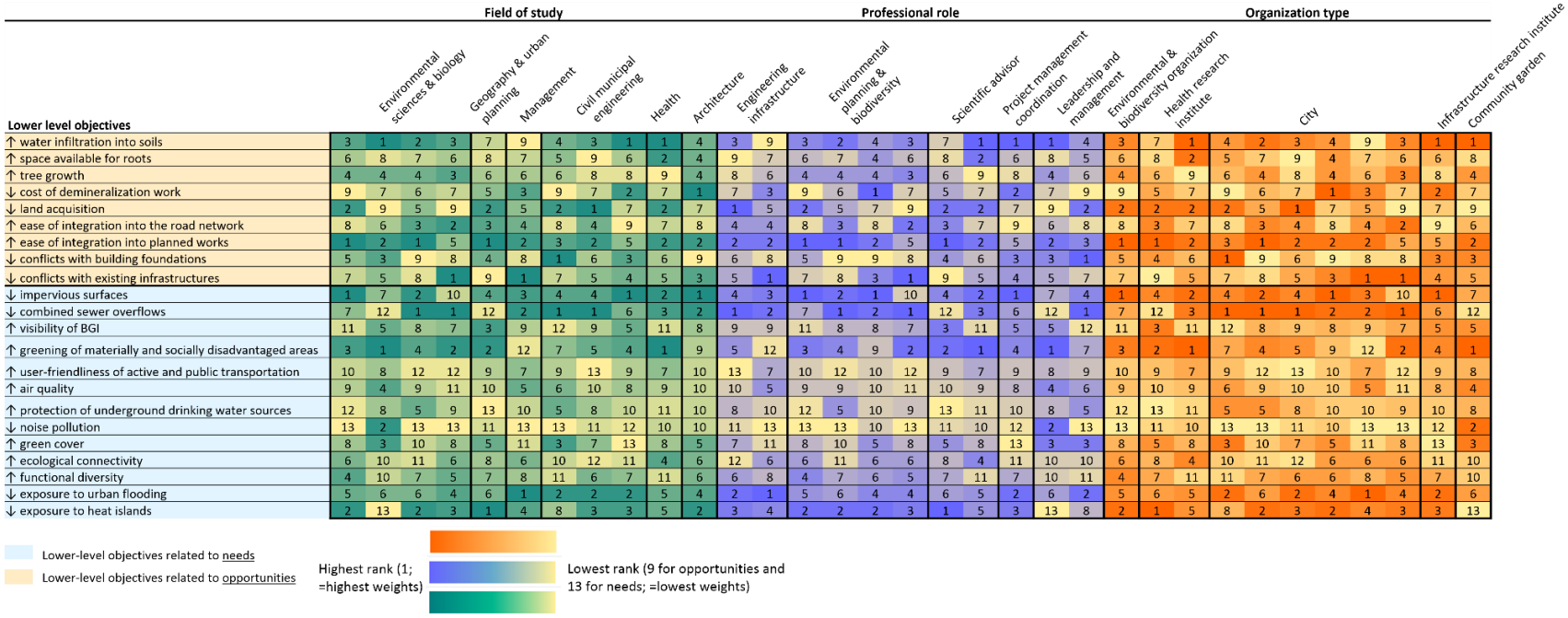
	Suitability perspective of opportunities	***Suitability perspective of needs***
Field of study	• Stakeholders from *environmental science & biology* fields showed diverse rankings for opportunities-related objectives. • Stakeholders that studied in *geography and urban planning* have more similar rankings for the objective of *maximizing ease of integration into land tenure* and *road network*. • *Civil engineers* have only one objective with similar rankings: *minimizing groundwater resurgence* (ranks 7 or 8).	• Stakeholders who studied *civil engineering* displayed more consistent rankings for multiple objectives, with four objectives with the exact same rank. • Stakeholders who studied *environmental sciences and biodiversity* have for health-related objectives, like *maximizing user-friendliness of active and public transportation* (with 3 at rank higher than 10; low weights), *maximizing air quality* (ranks 10 to 12; low weights), *maximizing protection of underground drinking water sources* (ranks 9 to 12; low weights).
Professional role	• *Environmental planners and biodiversity experts* showed similar rankings for *minimizing costs related to topography works* (below rank 4; high weights). • *Scientific advisors* displayed consistent rankings across most objectives, with only one or two ranks differences for six objectives out of nine.	• *Engineers* had aligned preferences for *maximizing BGI visibility* (ranks 10 or 11; low weights) and *transportation user-friendliness* (ranks 7 or 9; moderate weights). • Stakeholders working as *environmental planners or biodiversity expert* have all the objective of *minimizing heat islands* at a rank below 4 (high weights). It is the same for *scientific advisors*.
Organization type	• Stakeholders from a *city* have similar rankings for *minimizing groundwater resurgence* (low weights) and *minimizing topography costs* (high weights), with three out of four with the same ranking.	• Again, *health research institute* shows similar rankings for objectives like *maximizing air quality* (low weights), *BGI visibility* (moderate weights), *green cover* (high weights), and *minimizing urban flooding* (high weights) and *heat islands* (high weights). • *Cities* are aligned for objectives like *minimizing impervious surfaces*, *maximizing user-friendliness of active and public transportation* and *minimizing exposure to urban flooding*.

Figure E.10.3 Lower-level objectives rankings from stakeholders grouped according to the categories of independent variables (field of study, professional role and organization type) for BGI group A (bioretention, infiltration system and swale)



	Suitability perspective of opportunities	***Suitability perspective of needs***
Field of study	• Stakeholders from *environmental science and biology* fields seemed to agree on *minimizing conflicts with air traffic and birds* as a lower priority objective, with 5 out of 8 stakeholders ranking it 7th or 8th (low weights), and the others placing it no higher than 5th. This contrasts with those who studied *geography and urban planning*, both of whom ranked it at 3 (high weights). They also agree on the high priority (high weights) of *maximizing location on sites with sufficient space objective*, with 5 out of 8 stakeholders ranking it within the top 3 priorities. • Stakeholders who studied in *geography and urban planning* have varied rankings for the objectives. For instance, the objective of *maximizing the ease of integration with planned works* is ranked 1st by one stakeholder and last (8th) by another.	• Stakeholders who studied *environmental science and biology* all but one have the objective of *maximizing green cover* in their top 4 rankings (high weights). • Stakeholders who studied in *geography and urban planning* have the objectives of *maximizing green cover* and *ecological connectivity* ranked below the 3th (high weights).
Professional role	• *Environmental planners and biodiversity experts* showed similar rankings for *minimizing conflicts with air traffic and birds*. Still largely ranked in the lower positions, which is not surprising since some of these stakeholders have backgrounds in *environmental science and biology* (see field of study). • All three stakeholders working as *project management coordinator* have the same objective ranked first (high weights): *minimizing water flow*.	• Stakeholders working in *project management coordination* and *leadership and management* have all the objective of *maximizing BGI distribution* at rank 9 or 11 (low weights).
Organization type	• The lowest (8; low weights) and highest ranks (1; high weights) are fairly distributed across objectives for those working in a *city*.	• *Cities* are aligned for objective the objective of *maximizing BGI visibility*, with all of them having it between rank 8 to 11 (low weights). They also all have the objective of *maximizing green cover* below rank 3 (high weights).

Figure E.10.4 Lower-level objectives rankings from stakeholders grouped according to the categories of independent variables (field of study, professional role and organization type) for BGI group B (constructed wetland and pond & lake)



	Suitability perspective of opportunities	***Suitability perspective of needs***
Field of study	• Stakeholders who studied *environmental science and biology* have the objective of *maximizing infiltration into soils* ranked below 3 (high weights). They also agree on the priority of *maximizing tree growth* (all ranks below 4; high weights), which is less the case for those who studied *civil engineering* (ranks 6 and 8).	• Stakeholders who studied *environmental science and biology* have all the objective of *greening materially and socially disadvantage areas* below rank 4th (high weights). *Minimizing noise pollution* is at the 13th (low weights) for 3 out of 4 stakeholders. • All stakeholders who studied *civil engineering* have the objective of urban floods at the 2nd rank (high weights). Maximizing e*cological connectivity* objective is among their least important objective (ranked from 10 to 11; low weights).
Professional role	• Stakeholders working as engineers prioritized *maximizing the ease of integration with planned works* (both rank 2; high weights). • Both stakeholders working *as scientific advisors* have the objective of *minimizing land acquisition* at rank 2 (high weights). • *Minimizing conflict with the built environment* is of low priority for stakeholders working as *environmental planners or biodiversity experts* (rank 8 or 9 for 3 out of 4 stakeholders).	• Stakeholders working as *environmental planners or biodiversity experts* all have the objective of *minimizing exposure to heat islands* at ranks 2 or 3 (high weights). They also didn't prioritize *maximizing user-friendliness of active and public transportation* and *air quality* and *minimizing noise pollution* (all ranked between 9 and 13; low weights). • Stakeholders working as *infrastructure engineers* have the objective of *maximizing protection of drinking water* sources at ranks 11 and 13 (low weights).
Organization type	• Both stakeholders working in a *health institute* have given high importance to *minimizing land acquisition* and *maximizing easy integration into planned works* (ranks below 2; high weights). • Stakeholders working in a *city* seemed to agree on *maximizing easy integration into planned works,* with 5 out of 6 stakeholders having it at a rank below 3 (high weights).	• Stakeholders working in a *city* all prioritized, except 1, *minimizing exposure to heat islands* and all of them prioritized *minimizing combined sewer overflows* (high weights). They all don't have *minimizing noise pollution* in their priorities (ranks from 10 to 13; low weights).

Figure E.10.5 Lower-level objectives rankings from stakeholders grouped according to the categories of independent variables (field of study, professional role and organization type) for BGI group C (urban trees)

E.11 SI-Feedback

E.11.1 Main case study

The stakeholders found in general it was easy to answer the questionnaires (eight totally agree or agree out of 18; Figure E.11.1). For swing weights elicitation, best and worst levels were mostly used by stakeholders (14 out of 18 answered totally agree or agree), and they found their description easily understandable (11 out of 18 answered totally agree or agree). The ranking part of the swing exercises was easier for stakeholders (six out of 18 answered agreed it was difficult) than the weighting part (11 out of 18 agreed it was difficult). Stakeholders were thus more certain of their ranking (seven out of 18 totally agree or agree), than their assigned scores (only 3 out of 18 totally agree or agree). Participants were generally quite familiar with MCDA (12 out of 18 totally agree or agree) and weighting methods (16 out of 18 totally agree or agree).

Among the written comments received, one stakeholder raised the fact that the best and worst levels of the objectives were often counter-intuitive, as the best level of objectives under the need category represented the worst situation (e.g. a 100% impermeable site). Some stakeholders raised the point that the final results from the swing process did not necessarily reflect their intuitive order of preferences and that they would have liked to modulate their results at the end.

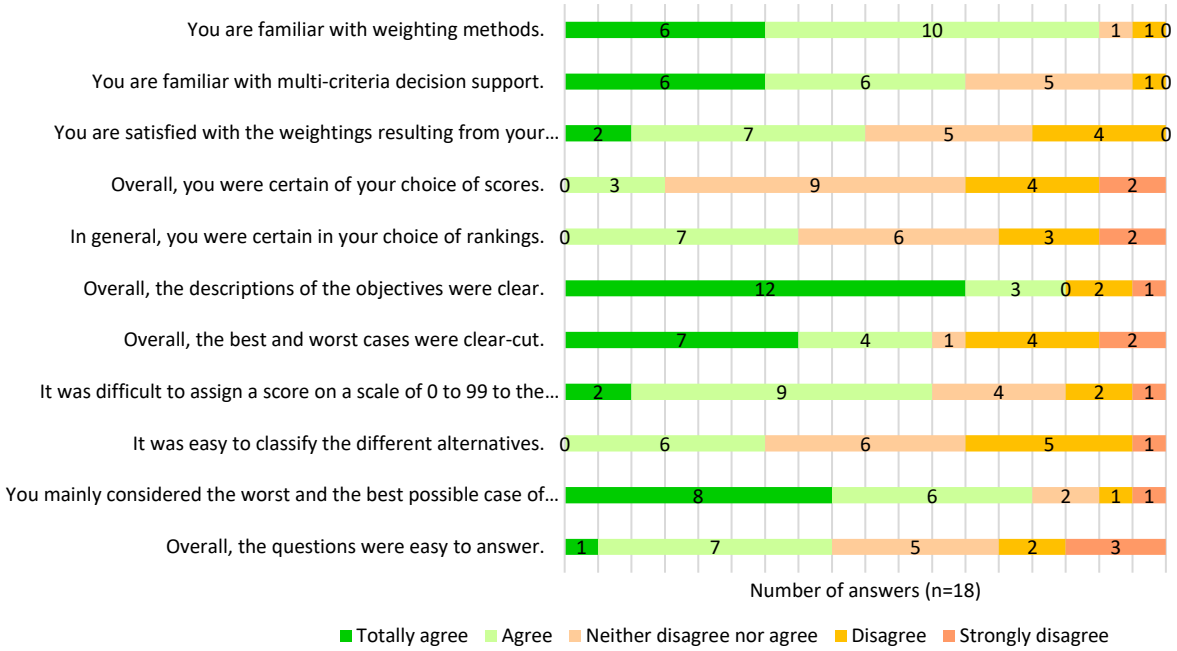


Figure E.11.1 Stakeholder feedback compiled form the Google forms questionnaire on the main case study weight elicitation workshop

E.11.2 Preliminary case study

Stakeholder responses for the preliminary case study regarding their feedback on the online swing elicitation exercise are shown at Figure E.11.2. Most stakeholders found it easy to answer the questionnaires (8 totally agree or agree out of 12). One participant found it difficult to complete the questionnaires. For the ranking step, most participants found it neither easy nor difficult to rank the alternatives and only one participant found it difficult. For the weighting step, six of the participants found it difficult to assign a score of 0 to 100 to the alternatives. The best and worst levels were however mainly considered to rank the different objectives (8 participants). In general, the descriptions of the best and worst levels and the descriptions of the objectives were found to be clear by the stakeholders.

Two stakeholders raised the point that the results from the swing process did not necessarily reflect their intuitive preferences. One recommendation concerned adding qualitative terms to the numerical scale such as "low, medium, very important".

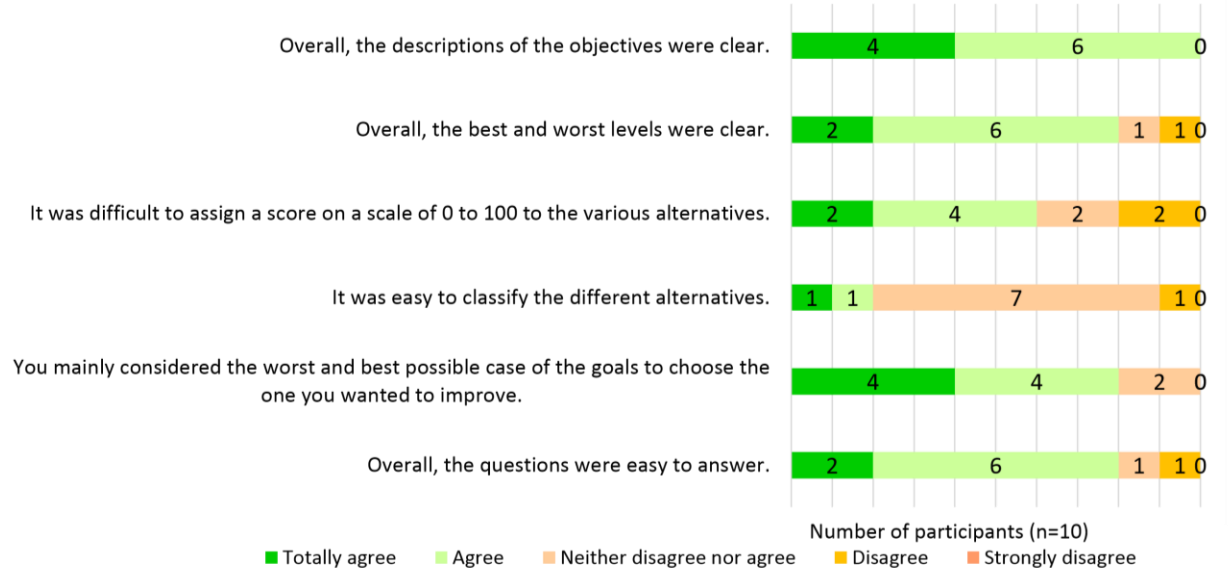


Figure E.11.2 Stakeholder feedback compiled form the Google forms questionnaire on the preliminary case study weight elicitation workshop

E.11.3 General feedback

Our findings highlight the complex nature of stakeholder experiences and perceptions during the decision-making process, emphasizing the need for continuous improvement and refinement of the elicitation tools and methodologies. Table E.11.1 summarizes possible benefits and challenges of the online swing elicitation workshop.

Table E.11.1 Examples of qualitative feedback from stakeholders on the potential causes of their difficulties

Possible causes of difficulty in responding
Main case study: • "To answer the questions, one must adopt the perspective and vision of the city, rather than solely focusing on personal preferences." • "There is a lack of knowledge regarding the impact of each type of BGI on different components (e.g. trees and biodiversity vs. bioretention basins and biodiversity)." • "The objectives related to opportunities were also more challenging to assess since I don't work on projects and thus have no insights into the costs." • Technical difficulties. • "Multiple scenarios (sectors, socio-economic context, way of living/occupying the area, etc.) that could have been represented with different answers." • "I often forgot the BGI or lower-level objective in question and had to go back to the information document to validate." • "Also, once on the weighting page, it was no longer easy to go back and change my priority choices – which was sometimes frustrating." • "I feel I lack the information (application context, BGI performance, etc.) to make informed choices." • "[…] In future, I'll suggest doing the exercise with the group, giving explanations as we go along, rather than letting participants do the exercise on their own, as we can easily enter random answers"
Preliminary case study: • "[...] comparing them [weights] at the end, I might modulate the results." • "The difficulty of establishing the absolute priority of a criterion [objective], as all the elements cited are relevant." • "Additional popularization work to be done before implementation in the municipal world, on everything if you want to address non-experts."

ANNEXE F SUPPLEMENTARY MATERIAL, ARTICLE 3: ARE WE ELICITING THE RIGHT PREFERENCES? INSIGHTS FROM SPATIAL MCDA SENSITIVITY AND UNCERTAINTY ANALYSIS

Journal: Computers, Environment and Urban Sytems (submitted to the journal)

Title: Beyond the surface: how do preferences really impact spatial suitability of blue-green infrastructure?

Authors : Sandrine Lacroix[a], Martijn Kuller[b,*], Jonathan Jalbert[c], Danielle Dagenais[d], Françoise Bichai[a]

[a] *Department of Civil Engineering, Polytechnique Montréal, 2900, boul. Édouard-Montpetit, Montréal, QC, Canada*

[b] *Copernicus Institute of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands*

[c] *Department of Mathematics and Industrial Engineering, Polytechnique Montréal, 2900, boul. Édouard-Montpetit, Montréal, QC, Canada*

[d] *Faculté de l'Aménagement, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada*

**Corresponding author email address: sandrine.lacroix@etud.polymtl.ca*

F.1 SI-Methodology

F.1.1 Study area selection

Entropy indices are often used to assess the spatial variability of data (Altieri et al., 2023). Shannon's entropy is the most useful and commonly used diversity index (Altieri et al., 2021). It quantifies the average level of heterogeneity present in a variable across different observations (Altieri et al., 2023). We used this method beyond its traditional use to calculate the effective number of categories (analogous to the effective number of functional groups) as a mean to establish the level of entropic diversity of our geospatial datasets across five potential boroughs of the city. The Shannon index (Shannon, 1948) captures the richness (number of categories present) and evenness (relative distribution of individuals among these categories), without considering configurational information (Wang & Zhao, 2018). It has been used in diverse domains applied to spatial heterogeneity, including in biology to measure the diversity of an ecological community (Roach, 2020), in landscape ecology to measure spatial patterns of organisms, in spatio-temporal rainfall variability (Choobeh et al., 2024),

in hydrology, flood and water resources management (Haghizadeh et al., 2017).

We used the Shannon Index in terms of p_i (Jost, 2006), as applied in functional diversity index (Aquilué et al., 2021).

$$Shannon\ Index = e^{(-\sum_{i=1}^{n} p_i \ln(p_i))} \quad (F.1)$$

where n is the total number of "categories" and p_i is the relative abundance of observations in category i to the total number of observations. Shannon Index ranged from 1 (least diverse) to n (most diverse). To be able to aggregate indices across all geospatial layers, we have normalized it from 0 (least diverse) to 1 (most diverse).

F.1.2 Sampling strategy for input parameters

F.1.2.1 Weights of objectives

The mean weights and standard deviation used for each objective are presented in Table F.1.1.

Table F.1.1 Mean weights and standard deviation for each objective based on Lacroix et al. (2025)

#	Sub-objective	Mean weight	SD
1.Floods	Minimizing exposure to urban flooding	0.1634	0.08123
2.Heat	Minimizing exposure to heat islands	0.1317	0.03855
3.Transport	Maximizing user-friendliness of active and public transportation	0.0839	0.04343
4.Water	Maximizing protection of underground drinking water sources	0.0862	0.05907
5.Visibility	Maximizing the visibility of BGI	0.0814	0.03832
6.Disadvantage	Maximizing greening of socially and materially disadvantaged areas	0.1230	0.04361
7.Impervious	Minimizing impervious surfaces	0.1233	0.06627
8.Green	Maximizing green cover	0.1248	0.03167
9.Distribution	Maximizing BGI distribution	0.0824	0.06424

F.1.2.2 Shape of value scales

Table F.1.2 presents the characteristics used to vary each normal distribution for each attribute, specifically the best-fitting curvature parameter (c*) around which the distributions vary and the range of variation. Figure F.1.2 presents the value scales of the 12 attributes measuring the objectives from the needs perspective, including the value scale elicited from experts, the best approximates the expert-elicited value and the range of variation in the shape of the value scales dictated by the parameter "c".

Table F.1.2 Best-fitting "c" parameter value for each attribute and the range of variation of the normal distribution

Identification	Attribute	*c**	Range
1.Floods_Vulnerability	Level of vulnerability to flooding due to runoff	2.26	[-1.24, 5.76]
2.Heat_Vulnerability	Level of vulnerability to heat waves	0.36	[-3.14, 3.86]
2.Heat_Temperature classes	Relative temperature difference classes	0	[-3.5, 3.5]
3.Transport_Active	Distance to active transportation infrastructure depth (m)	0.55	[-2.95, 4.05]
3.Transport_Public	Distance from public transit infrastructure depth (m)	0.24	[-3.26, 3.74]
4.Visibility_Point of interest	Distance to a point of interest (m)	0.94	[-2.56, 4.44]
4.Visibility_Land use type	Land use type	-4.46	[-7.96, -0.96]
4.Visibility_Population density	Population density (population/km^2)	0	[-3.5, 3.5]
5.Disadvantage_Index of disadvantage	Index of material and social disadvantage	-0.43	[-3.93, 3.07]
6.Impervious_Percentage of imperviousness	Percentage of impervious surfaces per urban drainage basin (%)	6.13	[-3.5, 3.5]
7.Green_NDVI	Vegetation cover [threshold with NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)]	-3.60	[-7.1, -0.1]
8.Distribution _Percentage of BGI deficit	Percentage of deficit of non-street drainage infrastructure area per drainage basin (%)	0	[-3.5, 3.5]
9.Water	Presence of contaminated sites	NA	NA

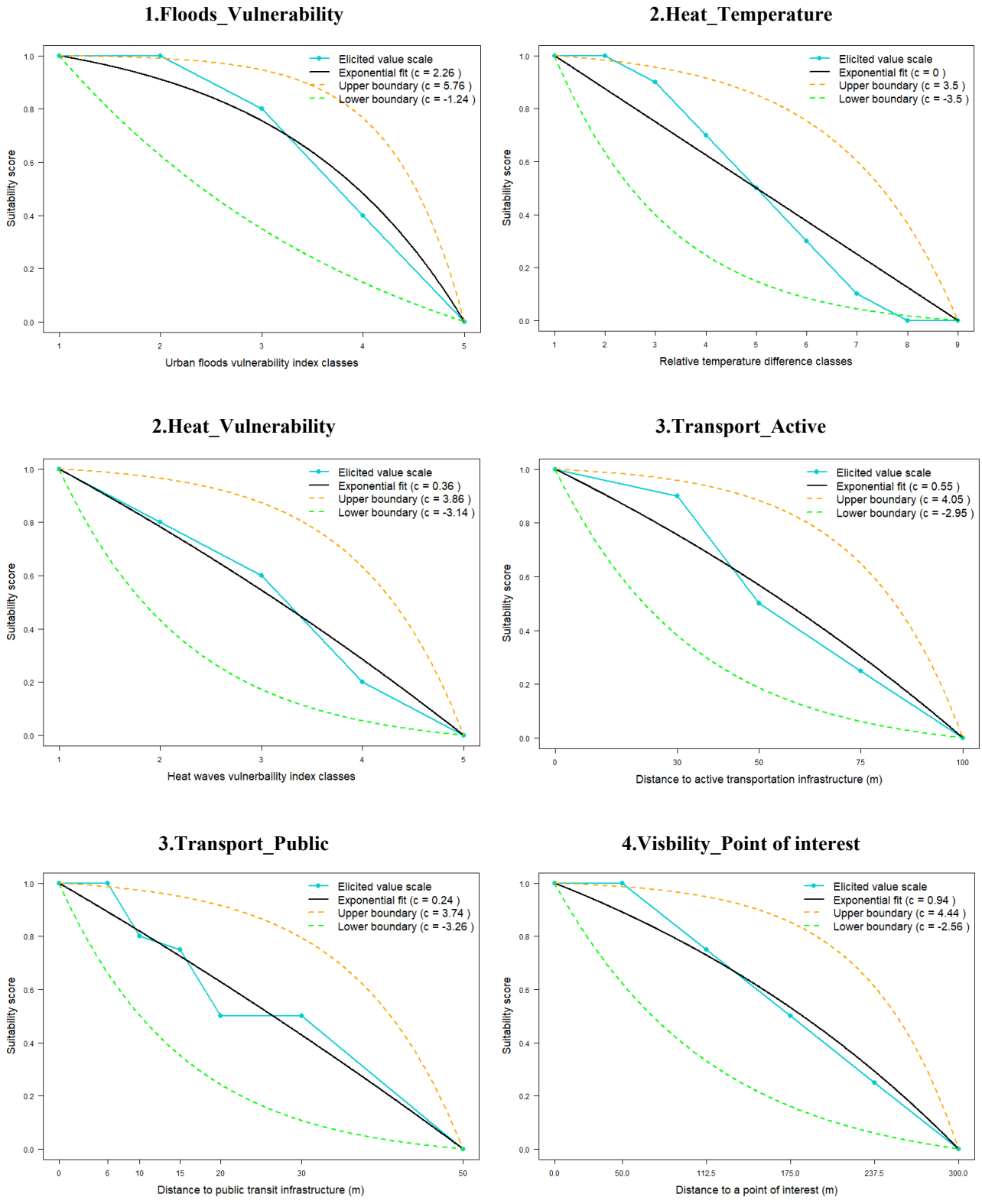


Figure F.1.1 Representation of the value scales elicited by experts in Lacroix et al. (2024), along with the best exponential function fit and the maximum and minimum variation range of each attribute

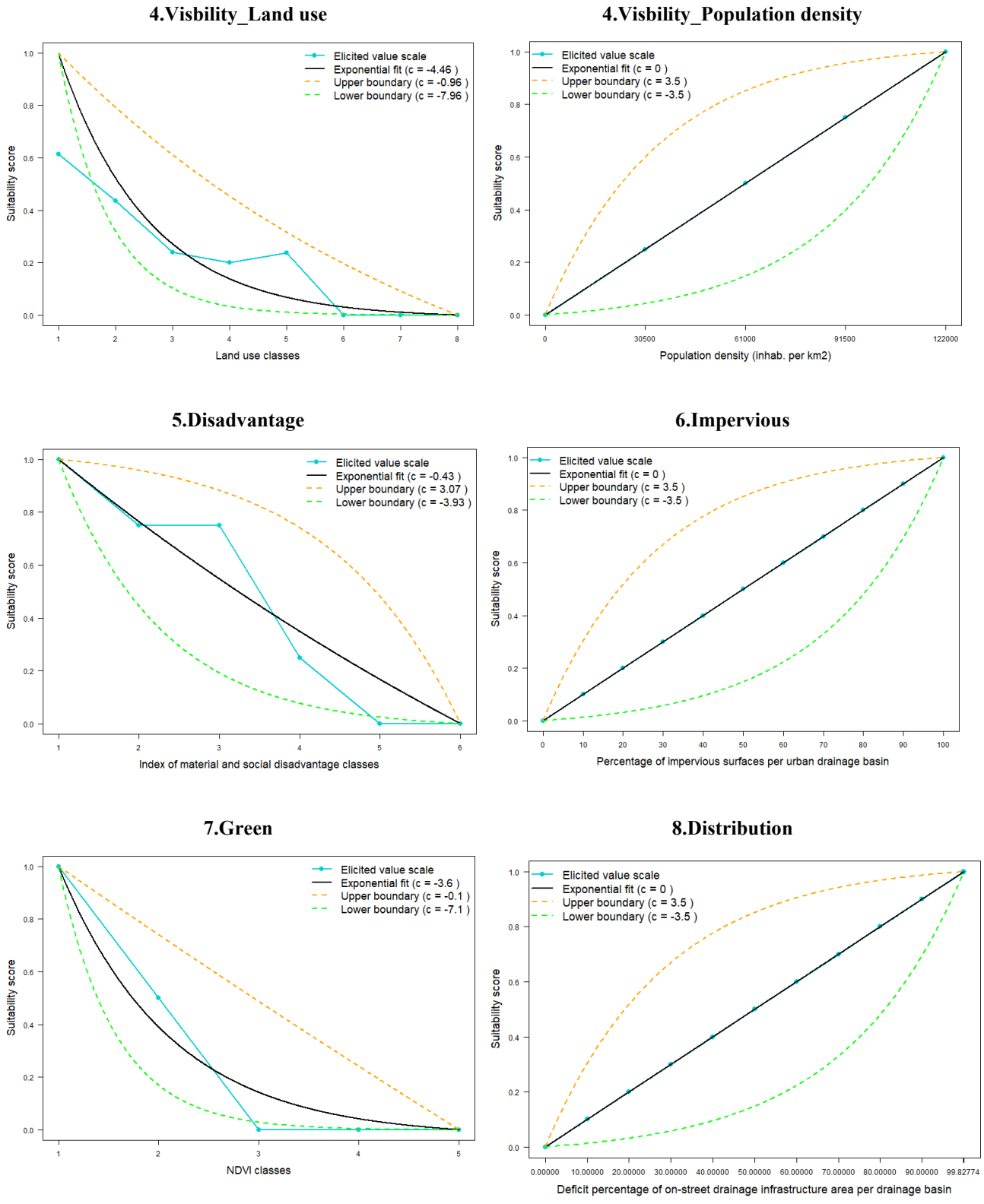


Figure F.1.1 Representation of the value scales elicited by experts in Lacroix et al. (2024), along with the best exponential function fit and the maximum and minimum variation range of each attribute (continued)

F.1.2.3 Indices calculation

We used the *sobol_indices()* function with its default estimators, following best practices in SA (Puy, Piano, et al., 2022; Saltelli et al., 2010b). According to best practices in SA (Puy, Becker, et al., 2022), the first-order sensitivity index (S_i) was computed using the estimator from Saltelli et al. (2010b), while the total-order sensitivity index (S_{Ti}) was estimated using Jansen (1999) equation. Table F.1.3 shows the input characteristics of the *sobol_indices()* function selected.

Table F.1.3 Selected input characteristics of the sobol_indices() function from the R package *sensobol*

Confidence level	0.95
Number of replicates	10^3
Type	QRN
Equation of the first-order index	saltelli
Equation of the total-effect index	jansen

F.1.3 Convergence and performance measures of the global sensitivity indices

The performance of GSA is influenced by factors such as sampling methods, sample size, and convergence evaluation (Sun et al., 2024). Sample size has the greatest impact, making it crucial to achieve sufficient confidence in input parameter space sampling. Different sampling methods affect convergence of sensitivity indices and the exploration quality of the parameter space (Janssen, 2013). However, there is inconsistency in literature regarding convergence evaluation, with unclarity on convergence criteria and varying sample sizes used across models (Sarrazin et al., 2016). Methods for evaluating GSA performance and convergence include confidence interval thresholds, empirical sensitivity measures, addition of dummy parameters, sequential approaches, concordance coefficients and convergence equations (Sarrazin et al., 2016; Vanrolleghem et al., 2015). The sequential approach is commonly used, as it visually tracks trends in sensitivity indices to determine convergence as sample size increases (Sun et al., 2024). It is a way to check whether the sensitivity indices stabilize as we increase the number of simulations. Vanrolleghem et al. (2015) applied this approach to quantify the variability of the indices using the following equation:

$$Variability\ (\%) = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{NF} SC_{ij}\right)_{n_{MCk-1}} - \left(\sum_{i=1}^{NF} SC_{ij}\right)_{n_{MCk}}}{NF}\right] \cdot 100 \quad \text{, where}$$

$$SC_j = \frac{\sum_{i=1}^{NF} SC_{ij}}{NF} \qquad (F.2)$$

Where NF represents the number of parameters, n_{MCk} is the number of Monte Carlo simulations, and SC_{ij} corresponds to the sum of the sensitivity indices normalized by the number of parameters. The variable j denotes the model output. If the variability (%) in sensitivity indices ranges between ±0.5% and ±3.5%, the indices can be considered stable and convergence may be assumed (Vanrolleghem et al., 2015).

The confidence interval (CI) is also a popular measure of convergence, with a 95% CI being the most used (Sun et al., 2024). The CI gives a range of sensitivity index values that is likely to contain the "true" sensitivity index value we are estimating. Different threshold values have been applied: an upper bound of the CI lower than 0.1 (Baroni et al., 2018), a CI width representing less than 10% of the sensitivity index value of the most influential parameters (Herman et al., 2013) or a CI width lower than 0.05 (Sarrazin et al., 2016).

Other verification measures can be used, like (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; X. Y. Zhang et al., 2015):

- The sum of the first-order indices should be equal to or less than 1.
- The sum of the total effect sensitivity indices should be greater than the sum of the first-order indices.
- Indices should be positive. If there are highly negative first-order indices, then the sample size *N* is too small, leading to erroneous approximations.

We applied several methods to verify the convergence of our sensitivity indices across the *J* simulations, namely: the percentage variability, the CI threshold, the verification of the summation of first-order sensitivity indices and the pixel count of negative values. We calculated the CI based on the standard errors of the sensitivity indices.

F.1.4 Individual attribute performance maps

The maps translated attribute value in each pixel to a suitability score between 0 and 1, using the value scale.



Figure F.1.2 Individual attribute suitability maps

F.2 SI-Results

F.2.1 Evaluation of the convergence of sensitivity indices

Table F.2.1 presents the convergence checks performed on the sensitivity indices to confirm that the number of simulations (J = 90,000) was sufficient. Based on these validation criteria, we concluded that 90,000 model runs were sufficient to ensure confidence in the results.

Table F.2.1 Summary of convergence and validity checks for Sobol sensitivity indices

Criterion	Results	Validation
Sum of first-order indices (S_i) ≤ 1 (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; X. Y. Zhang et al., 2015)	• Sum of mean S_i across all pixels per parameter: 96% • Sum of S_i per pixel ranges from 86% to 115%	**Validated** ✓ Although the sum of S_i for some pixels across the 22 parameters occasionally exceeds 1, the sums are generally close to 100. The sum of the mean indices across all pixels is less than 100.
Sum of total-order indices (S_{Ti}) > sum first-order indices (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; X. Y. Zhang et al., 2015)	• Sum of mean S_{Ti} across all pixels per parameter: 105% • Sum of S_{Ti} per pixel ranges from 101% to 114%	**Validated** ✓ The sum of the mean indices across all pixels and the sum of S_{Ti} per pixel are both greater than 100.
Indices should be positive (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2014b; X. Y. Zhang et al., 2015)	• The presence of slightly negative S_i values in some pixels is an expected numerical artifact from Monte Carlo sampling and should be interpreted as values close to zero, i.e. negligible influence in those locations. We observed that 10.43% of the indices, including S_i and S_{Ti}, had negative values. Therefore, we checked whether the value 0 was always included within the confidence intervals of these indices. We found that 100% of the confidence intervals for the negative indices included 0. Hence, these negative values can be considered non-concerning.	**Validated** ✓ Although some pixels still show negative indices after 90,000 simulations, 100% of the confidence intervals for the negative indices included. Moreover, these negative values are very small, typically less than -0.001. If we consider values smaller than -0.005 as 0, 1.4% of the pixels remain with negative Si values, which aligns with the 1.5% threshold used by Ligmann-Zielinska and Jankowski (2014b).
Confidence Interval (CI) ≤0.05 (Sarrazin et al., 2016)	• Percentage of pixels with a CI for Si or Ti ≤ 0.05: 88.47%	**Validated** ✓
Upper bound of the confidence Interval (CI) ≤0.1 (Baroni et al., 2018)	• Percentage of pixels with an CI upper bound ≤0.1: 91.11%	**Validated** ✓
Confidence Interval (CI) ≤ 10% of the non-additivity parameter sensitivity index value (Herman et al., 2013)	• Percentage of pixels with a CI for Si or Ti ≤ 10% of the non-additivity parameter sensitivity index value: 92.42%	**Validated** ✓
Percentage of variability of sensitivity indices between two blocks of model runs≤ 0.5% (Vanrolleghem et al., 2015)	• Percentage of variability of sensitivity indices Si and Ti between J=30,240 runs and J=90,000 runs ≤ 0.5%: 100% • Mean percentage of variability of sensitivity indices Si and Ti between J=30,240 runs and J=90,000 runs: 0.00059%	**Validated** ✓ Increasing our sample size from N=1,260 (J=30,240 runs) to N=3,750 (J=90,000 runs) leads to a mean percentage of Si and Ti variability between the two blocks lower than 0.00059%.

F.2.2 Spatial correlation

We assessed the spatial correlation, through pairwise Pearson correlation, between the value scale maps, i.e. maps obtained by converting each geospatial dataset into its individual performance map using the best exponential approximation of the expert-elicited value scales ($\gamma = 1$). This analysis helped to identify any potential duplication of information and to evaluate whether input parameters showing a combined sensitivity effect (i.e. a high S_T index) were spatially correlated with those parameters. Figure F.2.1 shows the spatial correlation. The Pearson correlation coefficients range from -1 to +1, where values close to +1 indicate strong positive correlation and values close to -1 indicate strong negative correlation.

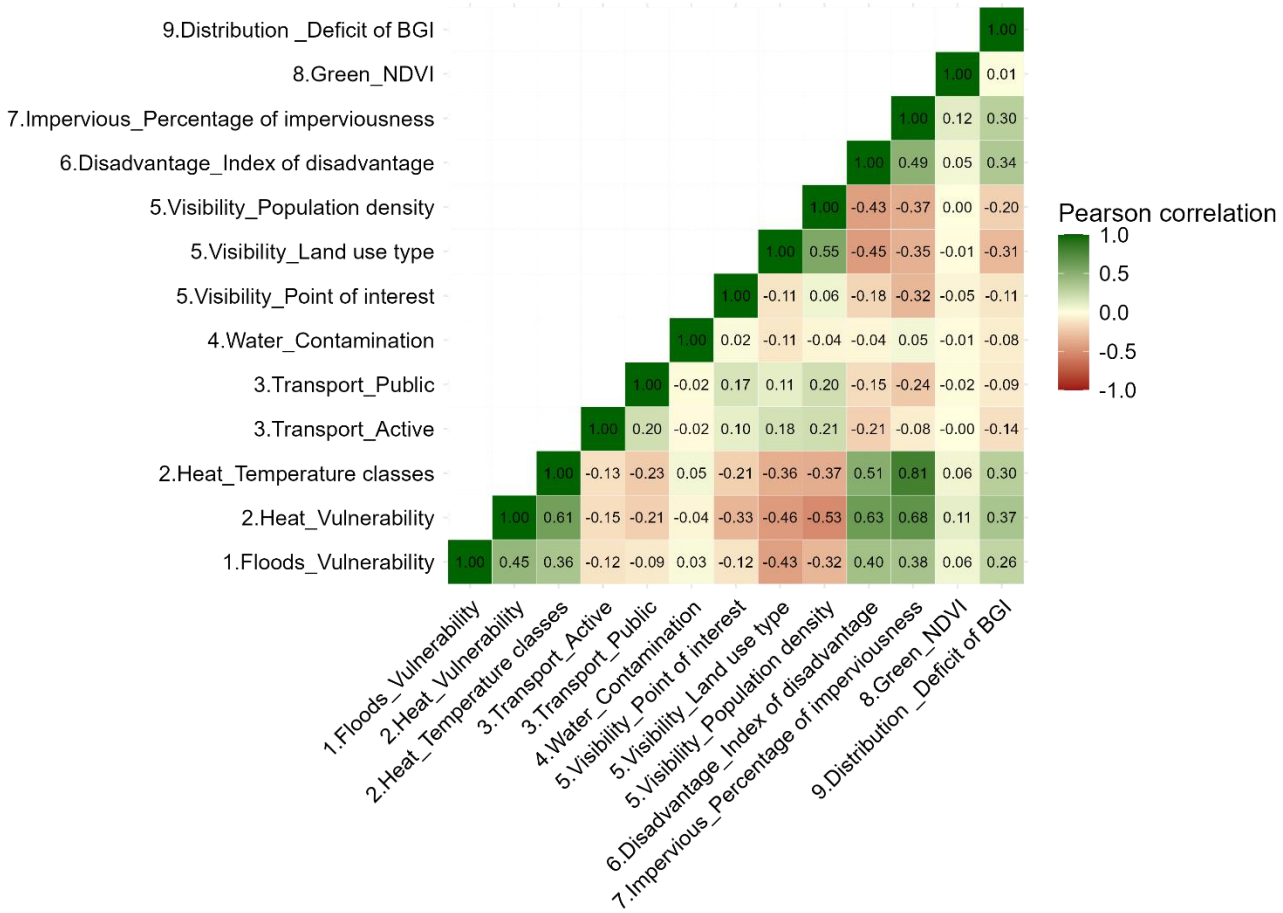


Figure F.2.1 Spatial correlation of value scales maps (i.e. geospatial dataset translated into its individual performance map using the best exponential approximation of the expert-elicited value scales; $\gamma = 1$)

F.2.3 Global sensitivity results

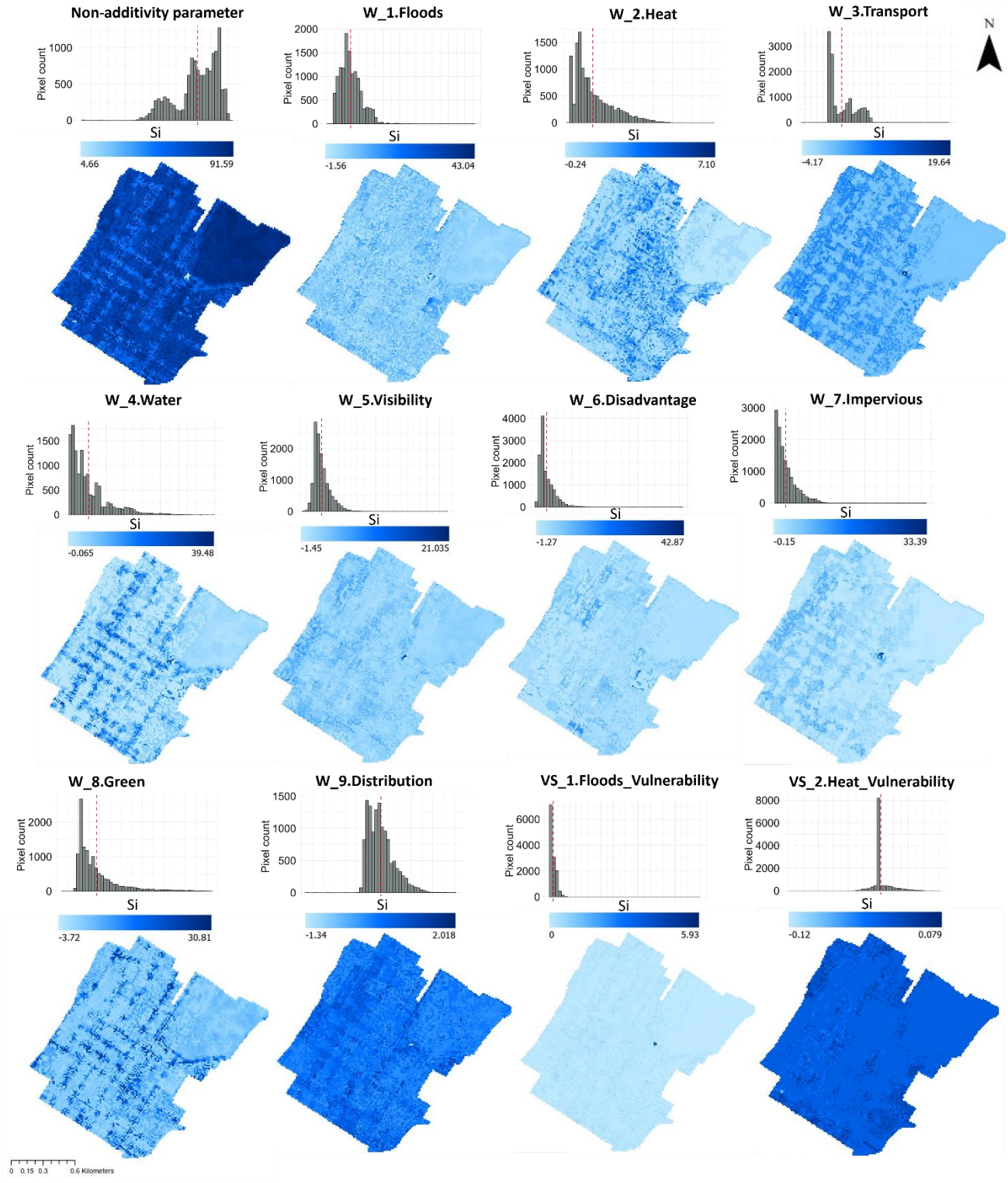


Figure F.2.2 Sensitivity maps of first-order index S_i

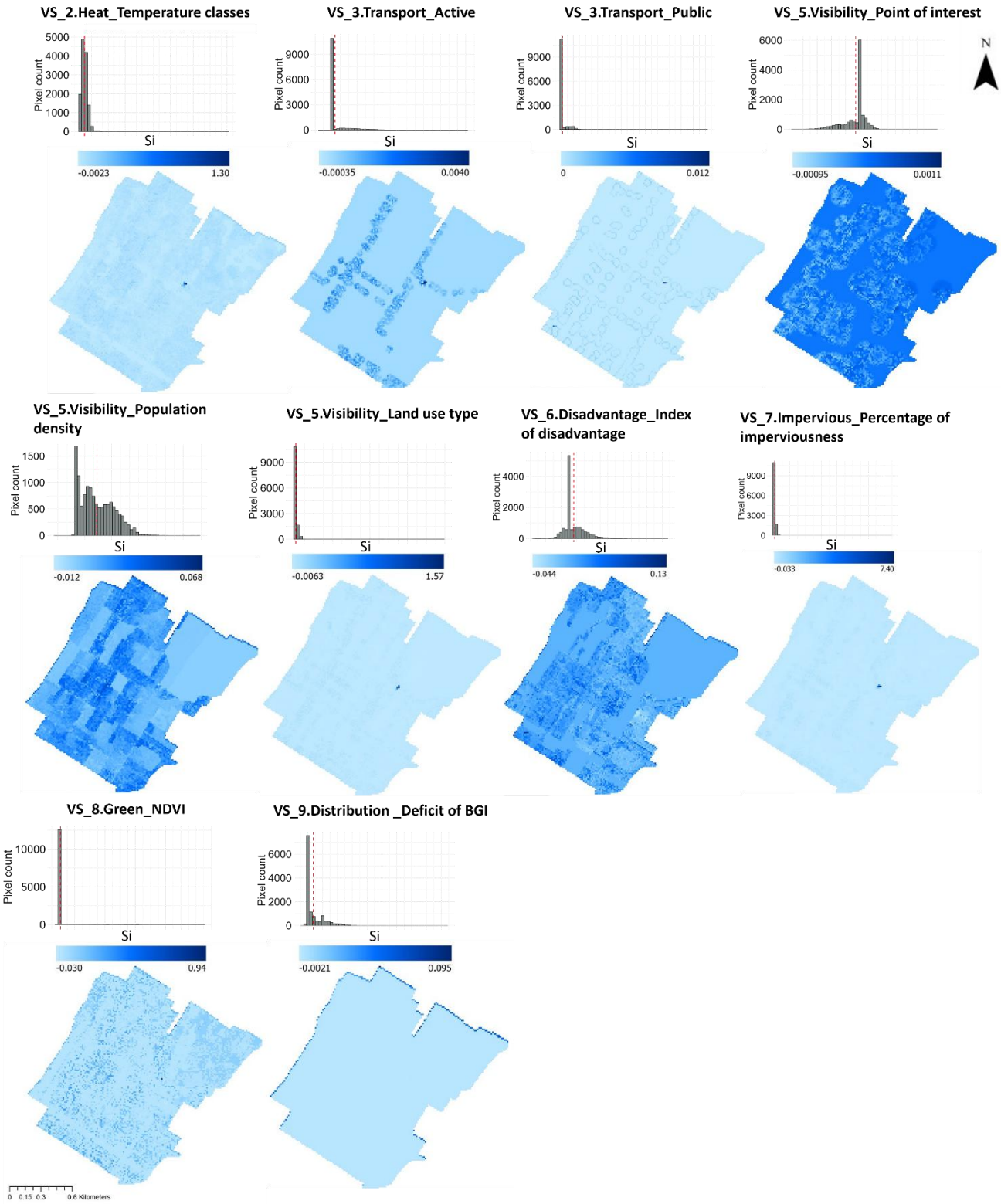


Figure F.2.2 Sensitivity maps of first-order index S_i (continued)

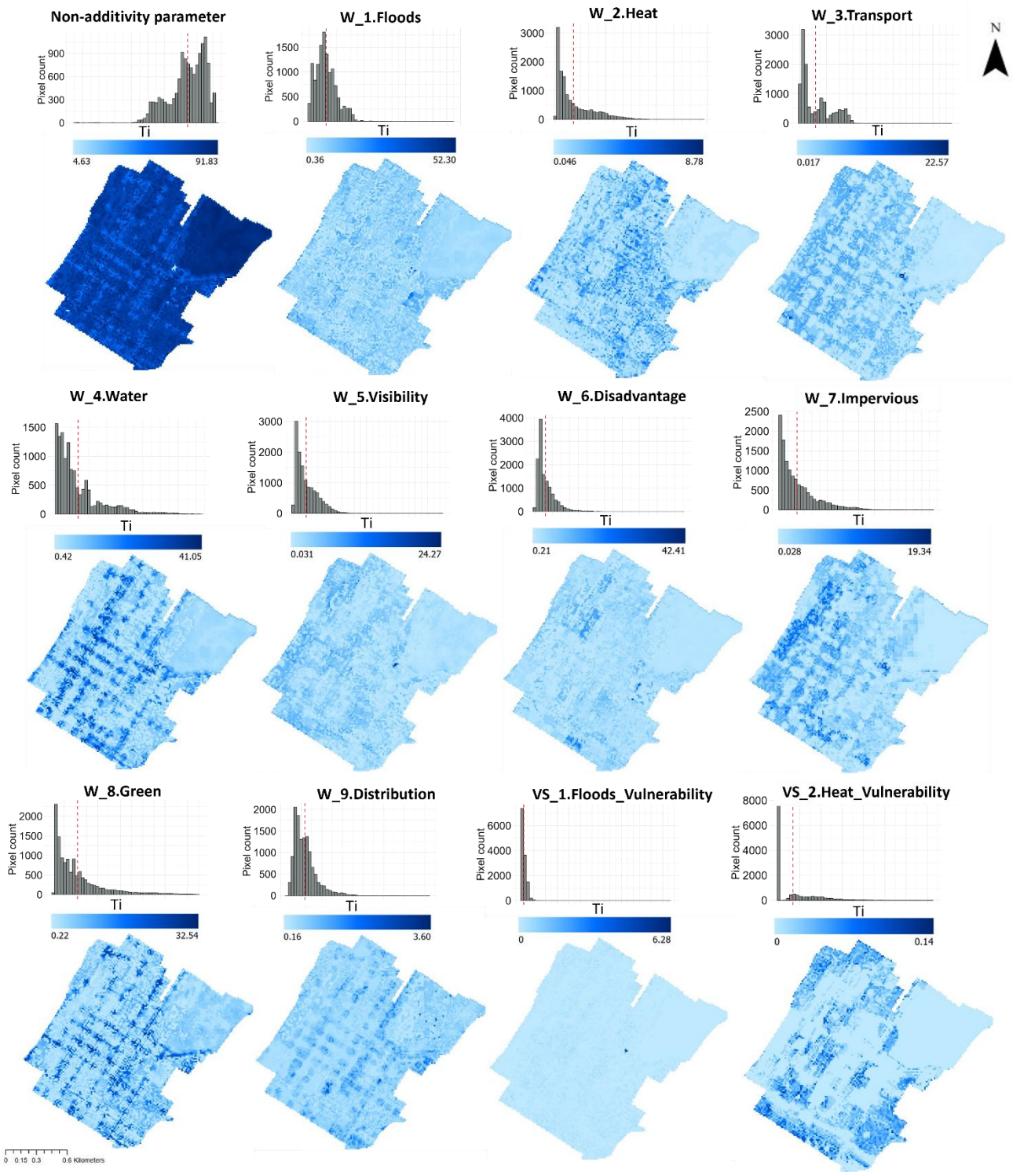


Figure F.2.3 Sensitivity maps of Total effect index S_{Ti}

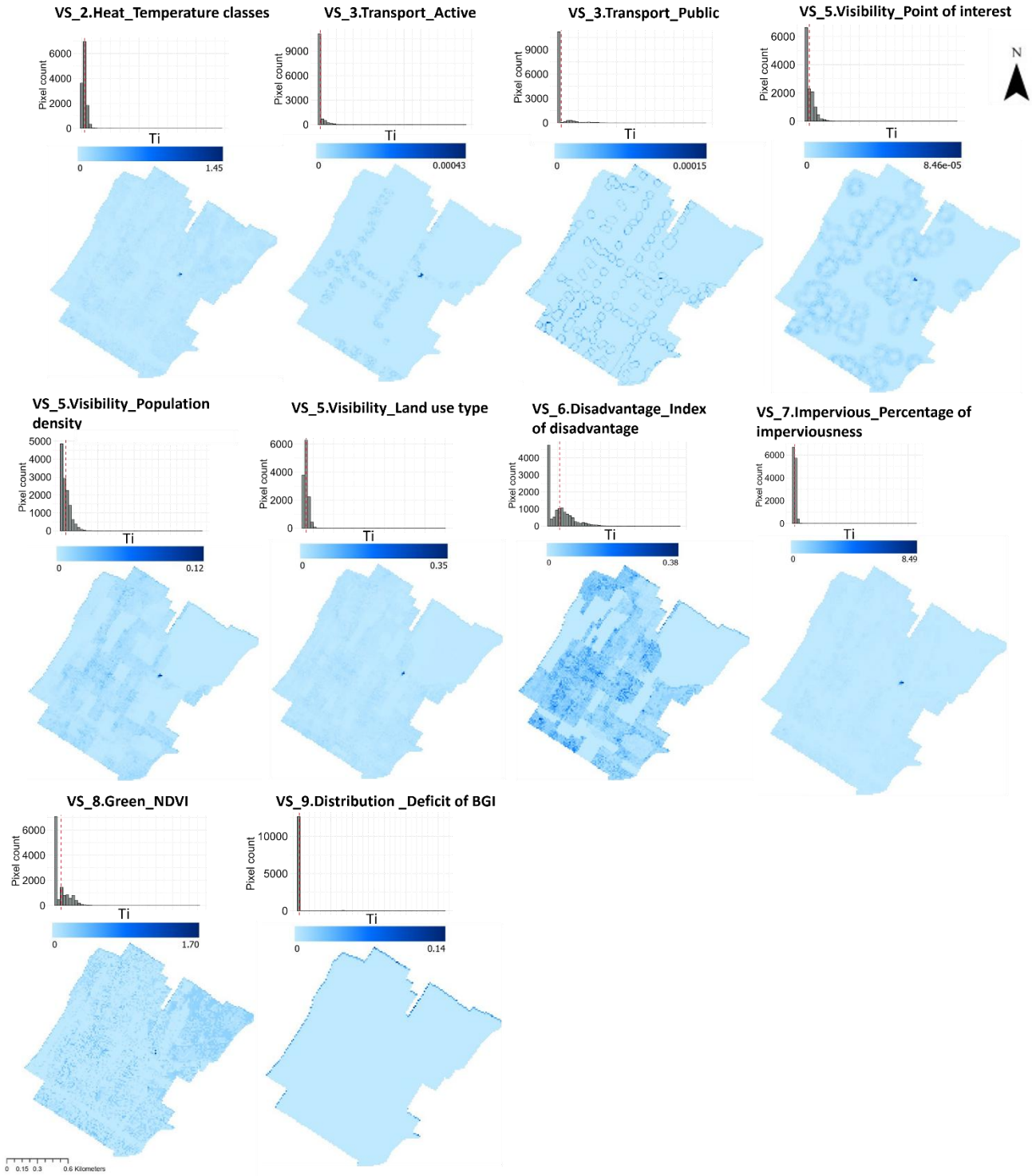


Figure F.2.3 Sensitivity maps of Total effect index S_{Ti} (continued)