

Titre: Intégration de sources énergétiques non conventionnelles : cas de la Ville de Montréal
Title: la Ville de Montréal

Auteur: Vincent Laroche
Author:

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Laroche, V. (2021). Intégration de sources énergétiques non conventionnelles : cas de la Ville de Montréal [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/6323/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6323/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Benoit Courcelles, & Philippe Pasquier
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

**Intégration de sources énergétiques non conventionnelles : cas de la Ville de
Montréal**

VINCENT LAROCHE
Département de génie civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie minéral

avril 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Intégration de sources énergétiques non conventionnelles : cas de la Ville de
Montréal**

présenté par **Vincent LAROCHE**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Denis MARCOTTE, président

Benoît COURCELLES, membre et directeur de recherche

Philippe PASQUIER, membre et codirecteur de recherche

Louise MILLETTE, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, Benoît Courcelles, et mon codirecteur de recherche, Philippe Pasquier, pour leur implication et leur support tout au long de ces années de maîtrise. Un grand merci de m'avoir fait confiance pour la réalisation de ce projet !

Merci à mes camarades à la maîtrise et du doctorat : Pier-Luc, Gabrielle, Léo, Bernard et tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à ce projet. Je remercie aussi tous les collègues de la chaire de recherche avec qui j'ai eu la chance de partager notre beau bureau, les pauses-café, les apéros et les 5@7 pré-pandémie.

Merci à mon amoureuse, Chloé, pour son support et son écoute hors pair qui m'ont permis de terminer ce projet. C'est grandement grâce à ce support que j'en suis aujourd'hui à la fin. Mentions spéciales aux gens qui ont cru en moi et qui m'ont également soutenu lors des moments moins facile. Je vous aime !

RÉSUMÉ

En 2013, la Ville de Montréal a identifié certaines actions à entreprendre afin de réduire ses émissions de gaz à effet de serre, dont le remplacement des systèmes de chauffage et de climatisation au mazout et au gaz naturel de son parc immobilier par une énergie moins polluante. Dans cette perspective, l'idée de chauffer ou climatiser les bâtiments à l'aide de la géothermie a été énoncée. Cependant, les systèmes géothermiques conventionnels (puits en boucles fermées ou ouvertes) ne sont pas adaptés au contexte urbain particulièrement dense ou aux paramètres hydrogéologiques de l'île de Montréal. Il a donc été proposé d'identifier différentes sources d'énergie non conventionnelles propices aux conditions de la région de Montréal. Grâce à la réalisation d'une revue de littérature, les sources énergétiques choisies étaient : les eaux usées ; les lignes de métro ; les eaux de surface et les puits à colonne permanente.

L'objectif principal de cette recherche était donc de caractériser et de quantifier le potentiel d'implantation dans le parc immobilier existant de la Ville de Montréal des différentes sources d'énergie non conventionnelles identifiées. Cependant, un aspect communément négligé lors de la conception de systèmes géothermiques concerne l'interférence entre les structures souterraines. À long terme, celle-ci peut entraîner une perte de durabilité et d'efficacité des systèmes géothermiques et très peu d'analyses ont été effectuées afin de quantifier les risques d'interférences. Afin d'optimiser la caractérisation du potentiel d'implantation, il était également nécessaire d'examiner l'influence à long terme de l'exploitation des différentes technologies et, plus spécifiquement, celle avec le meilleur potentiel d'implantation dans la municipalité. Ainsi, les objectifs spécifiques de ce travail étaient donc d'identifier les sources énergétiques, de caractériser les bâtiments potentiels, de déterminer les conséquences et les risques d'interférences thermique et hydraulique de l'exploitation des technologies et, enfin, de mettre en place des lignes directrices pour la réalisation de projets pilotes.

Suite à la revue de littérature sur les technologies non conventionnelles, les caractéristiques énergétiques des bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal ont été établies. Sur l'ensemble des immeubles appartenant à la municipalité, 250 bâtiments utilisent une énergie fossile (gaz naturel, mazout, propane, etc.) et bénéficieraient d'une conversion vers une source énergétique moins polluante. Suite à cette identification, l'élaboration d'une vaste cartographie numérique a été réalisée. Celle-ci intègre, entre autres, plusieurs paramètres géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques ainsi que les caractéristiques énergétiques et géographiques des bâtiments identifiés de la Ville. La mise en oeuvre de cette carte a

été conçue pour caractériser les zones potentielles et les bâtiments les plus propices à une conversion énergétique, et ce, afin de quantifier le potentiel de conversion.

Les résultats démontrent que les systèmes de puits à colonne permanente sont les systèmes les plus facilement déployables sur l'île de Montréal, la proximité de la source et le faible espace nécessaire à l'installation augmentant fortement leur potentiel d'implantation. Les systèmes de récupération énergétique depuis les eaux usées présentent également un bon potentiel d'implantation. Cependant, les systèmes de récupération depuis les eaux de surface et dans les tunnels de métro, démontrent un potentiel moindre que les deux autres technologies, expliqués par les larges distances entre les bâtiments et leur source énergétique.

Suite à la cartographie, un modèle tridimensionnel semi-régional par éléments finis a ensuite été construit avec le logiciel *Comsol Multiphysics* afin de simuler le comportement thermique et hydraulique de l'installation d'un système de puits à colonne permanente sur un bâtiment de la municipalité. L'objectif de cet exercice était de caractériser les interférences entre les différents systèmes afin de mieux cartographier les possibilités d'implantation de cette technologie. Le choix du bâtiment s'est arrêté sur le Centre Père-Marquette, situé dans l'arrondissement Rosemont-la-Petite-Patrie, qui présente un fort potentiel de conversion énergétique. Conjointement, quatre autres systèmes ont été ajoutés de façon à augmenter l'interférence sur le domaine régional. Au total, cinq systèmes géothermiques, quatorze puits à colonne permanente et cinq puits d'injection ont été modélisés.

Les résultats ont indiqué la viabilité des cinq systèmes sur dix années de simulation, et ce, sans dégradation notable des performances des puits à colonne permanente. Ils ont également démontré que les modifications thermiques ont une portée plus large et importante que les altérations hydrauliques. En outre, les modifications provoquées par bâtiments étaient significativement plus importantes que celles provenant des puits géothermiques. Les résultats ont aussi démontré que les risques d'interférence entre les systèmes sont possibles, mais restent limités. Il serait toutefois souhaitable de positionner les puits d'injection le plus loin possible des puits à colonne permanente. L'analyse a également confirmé que l'exploitation des systèmes de puits à colonne permanente dans un contexte urbain serait viable à court et à long terme. L'exploitation de systèmes plus petits, tels que les bâtiments résidentiels, entraîne des changements minimes aux régimes thermique et hydraulique, tandis que les systèmes plus larges devraient être dimensionnés et positionnés avec plus de précautions.

Finalement, suite aux conclusions de l'analyse numérique, une cartographie finale présentant les résultats de localisation des bâtiments aux meilleurs potentiels pour chacune des technologies étudiées a été réalisée. La cartographie régionale établie dans le cadre du travail devrait être complétée par des études de précision à l'échelle locale.

ABSTRACT

In 2013, the City of Montreal identified a number of actions to be taken to reduce greenhouse gas emissions, one of which was to replace its buildings' fossil-fuel systems with a cleaner energy source. In this perspective, the idea of heating and cooling buildings with geothermal energy has been suggested. However, conventional geothermal systems (closed and open loop wells) are neither adapted to the particularly dense urban context nor to the hydrogeological parameters of the island of Montreal. It was therefore proposed to identify different non-conventional energy sources suitable to the specific conditions of the Montreal area. Through an extensive literature review, the selected energy sources were: with wastewater heat exchange; with heat exchange in subway lines; with surface water heat exchange; and standing column wells.

The main objective of this research was therefore to characterize and quantify the potential of the non-conventional energy sources identified in the City of Montreal's existing building. However, one aspect that is commonly overlooked in the design of geothermal systems is interference between underground structures. In the long term, interference can lead to a loss of durability and efficiency of systems and very few investigations have been done to quantify the risks. In order to optimize the characterization of the potential, it was required to investigate the long-term influence of the operation of the selected technologies. Thus, the specific objectives of this work were to identify and to characterize the potential buildings, to determine the consequences and the risks of thermal and hydraulic interferences of the exploitation of the selected technologies and, finally, to establish guidelines for the realization of pilot projects.

Following the literature review on the proposed technologies, the energetic characteristics of the City of Montreal's building inventory were established. Of all the buildings owned by the municipality, 250 buildings use fossil fuels (natural gas, oil, propane, etc.) and would benefit from a conversion to a cleaner energy source. Based on this identification, an extensive digital map was developed. Among other things, the map includes a number of geological, hydrological and hydrogeological parameters, as well as the energy and geographical characteristics of the buildings identified in the City. The development of this map was intended to identify the potential areas and buildings that are most suitable for energy conversion, in order to quantify their conversion capabilities.

Of the different systems studied, the results show that standing column wells are the most readily deployed on the island of Montreal. Proximity to the source and the small space

required for their installation greatly increase their potential. Wastewater heat recovery systems also have a good potential for integration into buildings. However, surface water and tunnel energy recovery systems demonstrate a lower potential than the other two technologies, due to the large distances between the buildings and their energy source.

Once the mapping was completed, a large three-dimensional finite element model was built with the software *Comsol Multiphysics* in order to simulate the thermal and hydraulic behaviour of the installation of a standing column wells on a municipal building. The purpose of this process was to characterize the interferences between several systems in order to improve the mapping of this technology. The building chosen was the Centre Père-Marquette, located in the Rosemont-la-Petite-Patrie district, which has a strong potential for energy conversion. Four other systems were added at the same time in order to increase the interference on the surrounding area. In total, five geothermal systems, fourteen standing column wells and five injection wells were modeled.

Results indicated the viability of all five systems over ten years of simulation with no significant degradation in thermal performance. They also showed that thermal changes were larger and more significant than hydraulic changes. In addition, building-induced alterations were significantly larger than those from geothermal wells. Furthermore, the results showed that interference between the systems is possible, but remains superficial. However, it would be beneficial to position the injection wells as far away from the PCPs as possible. The analysis also confirmed that the operation of PCP systems in an urban context would be viable in the short and long term. Operating smaller systems, such as residential buildings, results in minimal changes to the thermal and hydraulic regimes. However, deployment of larger systems should be done with more care, which involves effective positioning of wells to reduce the risk of interference.

In the end, following the conclusions of the numerical analysis showing that the risk of interference between buildings is low, a final cartography displaying the location of the buildings with the highest potential for each of the technologies studied was produced. It should be noted that the regional mapping established in the context of this work should be completed by precision studies at the local scale.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xviii
LISTE DES ANNEXES	xix
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	3
1.2 Objectifs	4
1.3 Plan du mémoire	5
1.4 Mise en garde	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Résumé du principe des pompes à chaleur	6
2.2 Récupération énergétique des eaux usées	8
2.2.1 Pratiques d'installation et d'opération	8
2.2.2 Projets de démonstration récents	12
2.2.3 Contraintes et limitations	13
2.3 Récupération énergétique depuis les réseaux de transports souterrains ou les fondations de bâtiments	14
2.3.1 Pratiques d'installation et d'opération	15
2.3.2 Contraintes et limitations	21
2.4 Récupération énergétique depuis les eaux de surface	22
2.4.1 Pratiques d'installation et d'opération	22
2.4.2 Contraintes et limitations	29
2.5 Puits à Colonne Permanente	30

2.5.1	Pratiques d'installation et d'opération	31
2.5.2	Projets de démonstration récents	35
2.5.3	Contraintes et limitations	36
CHAPITRE 3	CONTEXTE ET POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DE L'ÎLE DE MONT-RÉAL	37
3.1	Localisation et climat	37
3.2	Géologie de l'île de Montréal	38
3.3	Dépôts meubles de l'île de Montréal	41
3.4	Hydrologie de l'île de Montréal	42
3.5	Hydrogéologie de l'île de Montréal	42
3.6	Caractéristiques du transport urbain souterrain de la Ville de Montréal	43
3.7	Caractéristiques du réseau d'égouts de la Ville de Montréal	44
3.8	Milieu naturel protégé et écoterritoires	45
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE DE LA CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE	46
4.1	Données d'information géographique de l'île de Montréal	46
4.2	Caractéristiques énergétiques des bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal	48
4.3	Quantification du potentiel de conversion du parc immobilier de la Ville de Montréal	50
4.3.1	Sélection des configurations de récupération dans les eaux usées	50
4.3.2	Sélection des configurations de récupération dans les réseaux de transports souterrains	54
4.3.3	Sélection des configurations de récupération dans les eaux de surface	55
4.3.4	Puits à Colonne Permanente	56
CHAPITRE 5	RÉSULTATS - CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE	59
5.1	Potentiel d'implantation pour la récupération d'énergie dans les eaux usées	59
5.2	Potentiel d'implantation de la récupération d'énergie depuis les réseaux de transports souterrains	62
5.3	Potentiel d'implantation de la récupération d'énergie depuis les eaux de surface	64
5.4	Potentiel d'implantation des puits à Colonne Permanente	67
CHAPITRE 6	ARTICLE 1 - INTEGRATION OF STANDING COLUMN WELLS IN URBAN CONTEXT : A NUMERICAL INVESTIGATION-CASE OF THE CITY OF MONTREAL	72

6.1	Introduction	73
6.2	Case study and site characteristics	76
6.2.1	Local geological environment	76
6.2.2	Local hydrogeological parameters	78
6.2.3	Local geothermal parameters	79
6.2.4	Ground heat load	80
6.3	Thermo-hydrogeological numerical model	82
6.3.1	Regional thermal and hydraulic conditions	82
6.3.2	Hydraulic boundary conditions	84
6.3.3	Thermal boundary conditions	84
6.3.4	Time dependent analysis and initial conditions	85
6.4	Results	86
6.4.1	Thermal impact associated to SCWs	86
6.4.2	Building thermal impacts	91
6.4.3	SCWs operation temperature	91
6.4.4	SCW hydraulic impacts	94
6.5	Discussion	96
6.6	Conclusion	98
6.7	Acknowledgements	99
CHAPITRE 7 DISCUSSION ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES		100
7.1	Limite d'utilisation des résultats de la cartographie numérique	100
7.2	Analyse de sensibilité des facteurs de pondération de la cartographie	101
7.3	Discussion sur le modèle numérique	105
7.3.1	Choix du Centre Père-Marquette et de la technologie de conversion .	105
7.3.2	Validation du maillage	106
7.3.3	Validation du comportement hydraulique	107
7.3.4	Validation du comportement thermique	107
7.3.5	Limitation du modèle numérique	108
7.4	Cartographie conjointe des quatre technologies étudiées	110
7.5	Lignes directrices pour des projets pilote	113
CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		117
RÉFÉRENCES		120
ANNEXES		137

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Caractéristiques hydrologiques du fleuve Saint-Laurent et de la rivière des Prairies.	42
4.1	Proportions des différents types de systèmes thermiques identifiés dans les bâtiments de la Ville de Montréal	48
4.2	Pondérations des paramètres utilisées pour la classification par pointage du potentiel de la récupération énergétique dans les eaux usées .	54
4.3	Pondérations des paramètres utilisées dans la classification par pointage du potentiel des systèmes PCP	58
5.1	Caractéristiques générales et pointages des 20 bâtiments du parc immobilier de la ville de Montréal dont le potentiel d'implantation de la technique de récupération énergétique avec les eaux usées est le plus élevé.	60
5.2	Caractéristiques générales du bâtiment identifié pour la conversion vers la récupération énergétique dans les transports souterrains.	62
5.3	Caractéristiques générales et pointages des 24 bâtiments de la ville de Montréal avec un potentiel d'implantation de la technique de récupération énergétique depuis les eaux de surface	65
5.4	Caractéristiques générales et pointages des 20 bâtiments de la ville de Montréal dont le potentiel de conversion vers les systèmes PCP est le plus élevé	69
5.5	Caractéristiques générales des bâtiments identifiés pour la conversion vers les systèmes PCP avec systèmes thermiques utilisant une source primaire ou auxiliaire au gaz propane ou au mazout	70
6.1	Physical properties for the different domains used in the numerical model	79
6.2	Annual estimate energy required for Père-Marquette Centre (A), Père-Marquette High School (B), Madeleine-de-Verchères Primary School (C), St-Jean-Berchmans Church (D) and Residential Building (E). . .	80
B.1	Identification et caractéristiques énergétiques générales des bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal	149
C.1	Caractéristiques générales et pointages des 35 autres bâtiments pour la conversion vers la récupération énergétique dans les eaux usées . .	156
C.2	Caractéristiques générales et pointages des 155 autres bâtiments pour la conversion vers les systèmes PCP	158

D.1	Résultats des calculs de pointages et de leur classement associé pour les neuf scénarios utilisé dans l'analyse de sensibilité de la technique de récupération depuis les eaux usées	164
D.2	Résultats des calculs de pointages et de leur classement associé pour les scénarios 1 à 8, utilisé dans l'analyse de sensibilité de la technique de récupération énergétique depuis les eaux usées	166
D.3	Résultats des calculs de pointages et de leur classement associé pour les scénarios 9 à 15, utilisé dans l'analyse de sensibilité de la technique de récupération énergétique avec les PCP	171

LISTE DES FIGURES

<p>1.1 Illustration des systèmes géothermiques traditionnels : (a) puits en boucle(s) fermée(s) et (b) puits en boucle(s) ouverte(s). Tiré d'Eppner (2016).</p> <p>2.1 Cycle de fonctionnement d'une pompe à chaleur. Adapté de Miller (2020).</p> <p>2.2 Cycle de récupération énergétique utilisant les eaux usées comme source énergétique. Adapté de Engie (2013); Culha et al. (2015); Miller (2020).</p> <p>2.3 Positionnement de l'échangeur de chaleur dans les systèmes de récupération énergétique des eaux usées : (a) dans les bâtiments (domestiques), (b) dans ou sur les canalisations des eaux usées et (c) à l'effluent de l'usine de traitements des eaux usées. Tiré de Schmid (2008).</p> <p>2.4 Déperditions thermiques a) d'un tunnel ferroviaire souterrain et b) dans une voiture ferroviaire. Tiré de Ampofo et al. (2004b).</p> <p>2.5 Récupération énergétique par intégration de tubulures dans un géotextile utilisé dans le tunnel de Lainzer, Autriche. Tiré d'Adam & Mankiewicz (2009)</p> <p>2.6 Récupération énergétique par intégration de tubulures aux structures de soutènement segmentées. Tiré de Barla & Di Donna (2018).</p> <p>2.7 Illustration d'un pilier énergétique (à gauche) et d'un mur énergétique (à droite).</p> <p>2.8 Échangeurs de chaleurs dans les systèmes de ventilation d'un tunnel de transport souterrain. Le système démontre un mode en climatisation (à gauche) et un mode en chauffage (à droite).</p> <p>2.9 Influence de la chaleur dissipée d'un tunnel de métro sur un champ de puits géothermique.</p> <p>2.10 Systèmes en boucles ouvertes à refroidissement direct avec eaux de surface. Tiré de Mitchell & Spitzer (2013).</p> <p>2.11 Système de récupération énergétique indirecte avec eaux de surface (structure à boucles ouvertes). Tiré de Mitchell & Spitzer (2013).</p> <p>2.12 Système de récupération énergétique indirecte avec eaux de surface (structure à boucles fermées). Tiré de Mitchell (2014).</p> <p>2.13 Système de récupération énergétique hybride avec eaux de surface. Tiré de Mitchell & Spitzer (2013).</p>	<p style="text-align: right;">2</p> <p style="text-align: right;">7</p> <p style="text-align: right;">9</p> <p style="text-align: right;">11</p> <p style="text-align: right;">15</p> <p style="text-align: right;">16</p> <p style="text-align: right;">17</p> <p style="text-align: right;">18</p> <p style="text-align: right;">19</p> <p style="text-align: right;">21</p> <p style="text-align: right;">23</p> <p style="text-align: right;">25</p> <p style="text-align: right;">26</p> <p style="text-align: right;">27</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.14	Illustration d'un système de puits à colonne permanente. Tiré d'Eppner (2016).	30
3.1	Carte de la région administrative de Montréal, regroupant 15 municipalités (en vert pâle) et les 19 arrondissements de la Ville de Montréal (en vert foncé). Tiré de Ville de Montréal (2013).	38
3.2	Colonne stratigraphique de la séquence géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent. Tiré de Comeau et al. (2012) et adapté de Globensky (1987).	39
4.1	Localisation des 250 bâtiments de la Ville de Montréal ayant un système thermique carburant à l'aide d'énergies fossiles (gaz naturel, mazout, propane ou vapeur). Les émissions de GES calculés annuellement pour chacun des bâtiments sont également présentées.	51
4.2	Localisation des 15 bâtiments de la Ville de Montréal ayant un système thermique carburant partiellement ou complètement à l'aide de mazout ou de gaz propane. Les émissions de GES calculés annuellement pour chacun des bâtiments sont également présentées.	52
5.1	Localisation des 20 bâtiments du parc immobilier de la ville de Montréal dont le potentiel d'implantation de la technique de récupération énergétique avec les eaux usées est le plus élevé.	61
5.2	Localisation du bâtiment du parc urbain de la ville de Montréal situé dans la zone tampon du tracé planifié de l'extension de la ligne bleue.	63
5.3	Localisation des 24 bâtiments de la ville de Montréal avec un potentiel d'implantation de la technique de récupération énergétique avec les eaux de surface	66
5.4	Localisation des 20 bâtiments de la ville de Montréal dont le potentiel de conversion vers les systèmes PCP est le plus élevé	71
6.1	Simplified representation of the thermal plume of several neighboring geothermal systems. An interference is observed between the systems, amplified by the groundwater flow, and modifying their plume.	74

6.2	Geographical location and delimitation of the study site at a) provincial, b) regional and c) local scale in meters. Site boundaries of Père-Marquette Centre (A), Père-Marquette High School (B), Madeleine-de-Verchères Primary School (C), St-Jean-Berchmans Church (D) and Residential Building (E) are represented with their associated geothermal systems. The number of SCWs and IWs were established in correlation with their thermal load, as seen in Fig. 6.4. Satellite maps are recovered from Google. (n.d.)	77
6.3	Unconsolidated deposits and detailed geology used for the numerical case study. Delimitation of the old quarry is shown with the dotted line. Red boundaries outline the territorial boundaries established in Fig. 6.2 for each of the 5 buildings. Direction of the hydraulic flow is indicated by the blue arrow. Local scale is in meters. Satellite maps are recovered from Google. (n.d.).	78
6.4	Distribution of ground load over an extended period of 1 year for Père-Marquette Centre (A), Père-Marquette High School (B), Madeleine-de-Verchères Primary School (C), St-Jean-Berchmans Church (D) and Residential Building (E). Cooling loads are exposed in blue and heating loads in red.	81
6.5	(a) Regional thermal and hydraulic conditions applied to the boundaries of the model (not to scale). (b) Regional thermal and hydraulic conditions applied to the boundaries of the model for SCW geothermal systems and IWs (not to scale). Zero-flux boundary condition is applied if not specified.	83
6.6	Temperature evolution simulated for three different time periods (columns) as a function of three depths (lines). Black boundaries outline the territorial boundaries established in Fig. 6.2 for each of the 5 buildings. The depth of SCWs is 300 m while IW depth is 150 m. Each tile has a size of 500 m × 500 m. Results are recovered in July, when a high cooling demand occurs.	87
6.7	Temperature difference between a simulation with and without SCWs, for three different time periods (columns) as a function of three depths (lines). Black boundaries outline the territorial boundaries established in Fig. 6.2 for each of the 5 systems. The depth of SCWs is 300 m while IW depth is 150 m. Each tile has a size of 500 m × 500 m.	89

6.8	(a) Three-dimensional visualization of temperature difference between a simulation with and without SCWs. Results are presented for a simulation time of 10 years. The two lower figures present a closed caption of (b) building A and (c) buildings D and E. Local scale is in meters.	92
6.9	Monitored inlet and outlet temperature for Père-Marquette Centre (A), Père-Marquette High School (B), Madeleine-de-Verchères Primary School (C), St-Jean-Berchmans Church (D) and Residential Building (E).	93
6.10	(a) Hydraulic head and (b) hydraulic head difference between a model with and without SCWs/IWs. Results are presented for three different depths (columns) for a simulation time of 10 years. Black boundaries correspond to the territorial boundaries established in Fig. 6.2 for each of the five buildings.	95
6.11	Three-dimensional hydraulic head difference between a simulation with and without SCWs. Results are presented after 10 years of simulation. Blue lines represent flow lines while red boundaries display territorials limits. a) Whole simulation domain, b) close view of site A, c) close view of site B, d) close view of sites D and E. Local scale is in meters.	97
7.1	Classements des différentes valeurs de pointages pour les neuf scénarios de l'analyse de sensibilité (eaux usées). Les valeurs de classements sont associées aux numéros d'identification des différents bâtiments.	102
7.2	Classements des différentes valeurs de pointages pour les quinze scénarios de l'analyse de sensibilité (PCP). Les valeurs de classements sont associées aux numéros d'identification des différents bâtiments.	104
7.3	Localisation des 50 bâtiments du parc immobilier de la ville de Montréal dont le potentiel d'implantation pour les sources d'énergie non-conventionnelles identifiés sont les plus élevés.	111
7.4	Localisation des 50 bâtiments du parc immobilier de la ville de Montréal dont le potentiel d'implantation pour les sources d'énergie non-conventionnelles identifiés sont les plus élevés.	112
A.1	Principales formations géologiques affleurantes sur l'île. Les différentes failles présentes (normales et inverse) ainsi que les plis géologiques observables (anticlinal et synclinal) sont également identifié. Adapté de Globensky (1987).	137
A.2	Simulations géostatistique de la conductivité thermique du roc de l'île de Montréal et ses environs. Tiré de Bédard et al. (2018).	138

A.3	Conductivité thermique théorique du roc de l'île de Montréal et ses environs.	139
A.4	Géologie des dépôts meubles de l'île de Montréal et ses environs. Adapté de Prest & Keyser (1982).	140
A.5	Épaisseur des dépôts meubles sur l'île de Montréal et ses environs. Adapté de Prest & Keyser (1982).	141
A.6	Carte piézométrique de l'île de Montréal. Adapté de Bériault & Simard (1978).	142
A.7	Conductivité hydraulique théorique du roc de l'île de Montréal et ses environs.	143
A.8	Conductivité hydraulique théorique des dépôts meubles de l'île de Montréal et ses environs.	144
A.9	Cartographie du réseau de transport souterrain de la Ville de Montréal. Tiré de Société de Transport de Montréal (2021a).	145
A.10	Cartographie de l'extension de la ligne bleue du réseau de transport souterrain de la Ville de Montréal. Tiré de Société de Transport de Montréal (2021b).	146
A.11	Cartographie du réseau d'égouts de la ville de Montréal en fonction de la hiérarchie (I,II et III) des canalisations.	147
A.12	Cartographie des écoterritoires, des espaces verts et des milieux naturels protégés en fonction de leurs hiérarchies associées.	148

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

COP	Coefficient de performance
EC	Échangeur de chaleur
GES	Gaz à effet de serre
PEHD	Polyéthylène à haute densité
PAC	Pompe à chaleur
PBF	Puits en boucle fermée
PBO	Puits en boucle ouverte
PCP	Puits à colonne permanente
PVC	Polychlorure de vinyle

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Données cartographiques	137
Annexe B	Répertoire des bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal .	149
Annexe C	Résultats des matrices décisionnelles	156
Annexe D	Résultats de l'analyse de sensibilité des facteurs de pondérations . . .	164

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

En 2013, la Ville de Montréal a adopté un large plan de réduction de gaz à effet de serre (GES) dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques. Lors de l'état des lieux, les émissions annuelles de GES de l'agglomération de Montréal se chiffraient à 222 kilotonnes d'équivalent CO₂, dont 21% provenaient de la consommation énergétique des bâtiments (Ville de Montréal, 2013). Puisqu'un lien a été établi entre l'augmentation de température et les émissions de gaz à effet de serre causé par l'utilisation d'énergies fossiles (Pachauri et al., 2014), certaines actions ont été identifiées afin de réduire les émissions de GES de la municipalité. Parmi les actions identifiées, le plan de réduction planifie une économie de 781 tonnes d'équivalents CO₂ pour le remplacement des systèmes thermiques au mazout par une énergie faiblement émettrice de GES. Il prévoit également la réalisation de plusieurs projets pilotes liés aux énergies renouvelables. À terme, la Ville de Montréal souhaite aussi réduire sa consommation en gaz naturel, qui représente une part importante des systèmes énergétiques des bâtiments existants.

Dans cette perspective, l'idée de chauffer ou de climatiser les bâtiments à l'aide de la géothermie, un procédé qui tire un gain énergétique de la chaleur du roc et de l'eau souterraine, a été proposée. Ce type de récupération d'énergie se caractérise par le fait d'employer une source renouvelable et locale, de générer une faible quantité de GES et de rester indifférent aux conditions climatiques saisonnières (Rees, 2016). Actuellement, les systèmes les plus exploités sont divisés sous deux grandes catégories : les puits géothermiques en boucle(s) fermée(s) (PBF) et les puits géothermiques en boucle(s) ouverte(s) (PBO). Ces deux systèmes sont présentés dans les figures 1.1a et 1.1b.

Les PBF représentent la majorité des installations du Québec, soit 92,7 % des ouvrages géothermiques (Coalition Canadienne de l'Energie Geothermique, 2012). Ce type de système emploie un fluide caloporteur (réfrigérant, eau, etc.) circulant dans un circuit de tuyaux en forme de «U» à l'intérieur d'un (ou des) ouvrage(s) foré(s). La chaleur calorifique de l'eau souterraine est captée par le fluide caloporteur puis transférée aux bâtiments à l'aide d'une pompe à chaleur. Les PBF sont communément forés à la verticale, mais une variante permet l'installation à l'horizontale (Rees, 2016). Lors de l'opération, le fluide caloporteur demeure isolé du sous-sol, empêchant les échanges directs entre le fluide et l'aquifère. La vaste utilisation de ce type de configuration dans l'industrie repose majoritairement sur la robustesse et la durabilité de ce système (Sachs & Dinse, 2000), ainsi que de sa faible sensibilité aux paramètres hydrogéologiques de l'aquifère (Pasquier et al., 2016). Néanmoins, sa puissance

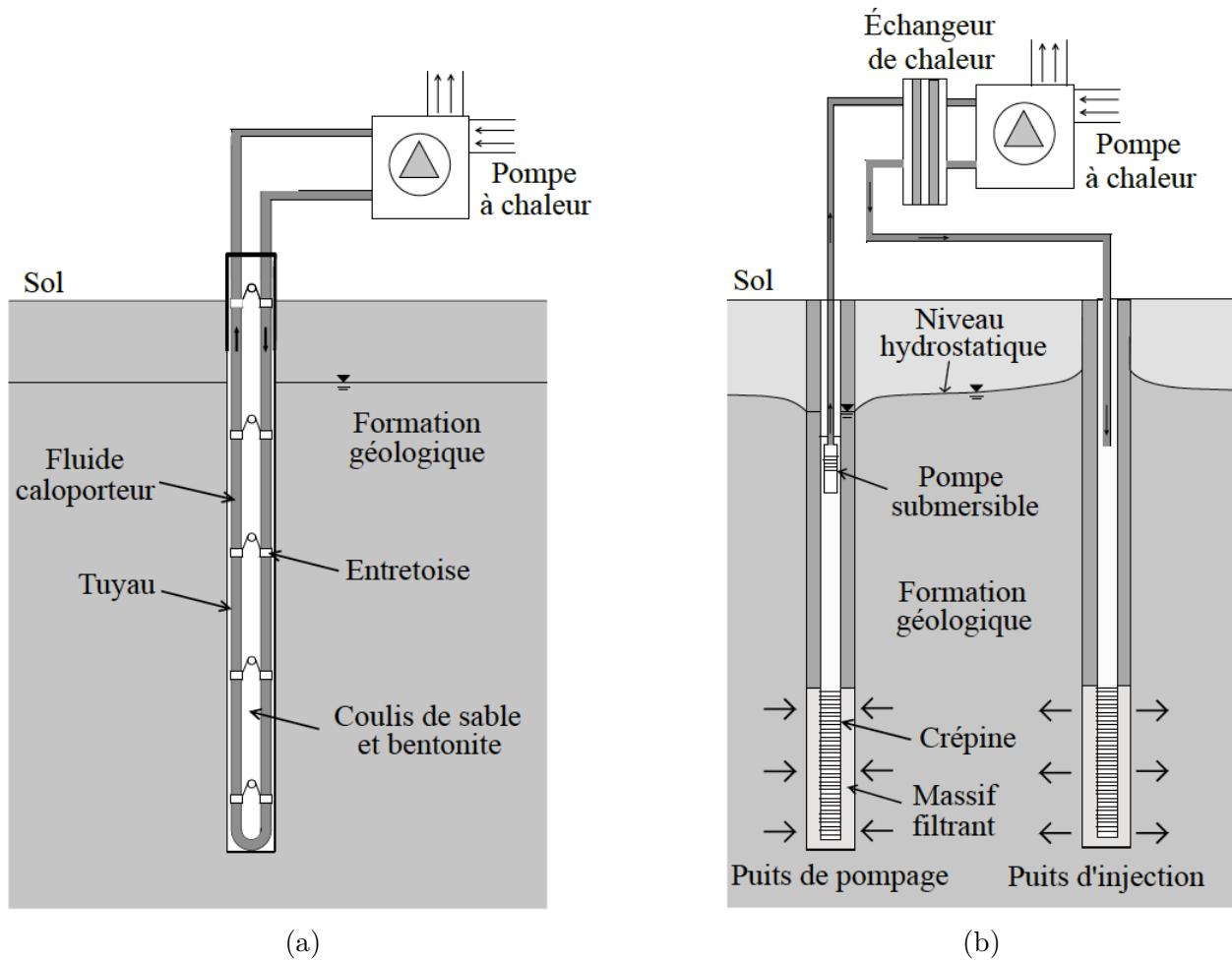


Figure 1.1 Illustration des systèmes géothermiques traditionnels : (a) puits en boucle(s) fermée(s) et (b) puits en boucle(s) ouverte(s). Tiré d'Eppner (2016).

unitaire modérée (50 à 80 W/m) (Banks, 2012), causée par la basse conductivité thermique de la tubulure, contribue à l'installation de système nécessitant plusieurs forages, de grands espaces et des coûts initiaux considérables (Yavuzturk & Chiasson, 2002). Ce type de système n'est donc pas adapté à un contexte urbain, où l'espace est généralement restreint, tel que celui de la Ville de Montréal.

De façon opposée, les PBO utilisent l'eau de l'aquifère comme fluide caloporteur, où l'eau souterraine est pompée du puits et l'énergie y est directement extraite. L'eau pompée est ensuite rejetée, soit dans les égouts ou dans un puits d'injection, en aval de l'installation géothermique, comme démontré à la figure 1.1b. Beaucoup plus efficace thermiquement, sa puissance unitaire pouvant être supérieure à 125 W/m (Pasquier et al., 2016), ce type d'installation a l'avantage de limiter la profondeur et le nombre de forages nécessaires (Coalition

Canadienne de l'Energie Geothermique, 2012). Malheureusement, la présence d'un aquifère fortement productif est indispensable, ce qui rend ce type de système fortement sensible aux paramètres hydrogéologiques (Croteau, 2011; Eppner, 2016; Rees, 2016). La précipitation de minéraux (calcaire, fer, manganèse) et le développement bactérien peuvent aussi considérablement influencer le rendement d'un PBO (Gunnlaugsson, 2012; Eppner, 2016; Wurdemann et al., 2014) en diminuant l'échange de chaleur avec la formation géologique par exemple. Dans le contexte spécifique de la Ville de Montréal, l'absence d'aquifère très productifs sur le territoire et la nature du roc, des calcaires et roches sédimentaires, rencontré sur une large superficie du sous-sol de la région augmente le risque de colmatage et les problèmes opérationnels de ce type de configuration (Eppner, 2016). Les paramètres hydrogéologiques doivent donc faire l'objet d'étude et de recherche antérieures à la réalisation du système géothermique afin de limiter les risques de colmatage et de mauvaise conception, ce qui peut entraîner des délais dans les travaux et une hausse des coûts.

1.1 Problématique

Face au constat que les PBF ne sont pas adaptés à un contexte urbain et que les PBO ne sont pas optimaux pour les paramètres géologiques de l'île de Montréal, il a été proposé d'identifier et d'étudier différentes sources d'énergie non conventionnelles. Idéalement, ces sources pourraient être implantées dans le parc immobilier existant de la ville de Montréal, selon le type de bâtiments et leurs localisations sur le territoire. Dans cette optique, quatre sources alternatives de récupération énergétique ont été proposées soit :

1. les eaux usées, autour des conduites d'égouts les plus importantes ;
2. les lignes de métro, avec l'intégration de tubulures dans les structures de soutènement ou autre ;
3. les échanges thermiques avec les eaux de surface, notamment pour les bâtiments à proximité du fleuve Saint-Laurent ;
4. les aquifères, grâce aux Puits à Colonne Permanente (PCP), une alternative aux systèmes PBF et les systèmes PBO.

En outre, un aspect communément négligé lors de la conception de systèmes géothermiques concerne l'interférence entre les structures souterraines actuelles. Puisque la présence de systèmes géothermiques génère des modifications dans les régimes thermique et hydraulique des eaux souterraines, la concurrence entre les systèmes à proximité est accrue. Cette interférence peut être causée par des forages géothermiques voisins, mais aussi par d'autres structures souterraines à proximité, telles que les tunnels des systèmes de transport public (métro) (Revesz

et al., 2016). À long terme, elle peut même entraîner une perte de durabilité et d'efficacité des systèmes géothermiques (Bayer et al., 2014, 2019) et, ainsi, diminuer la durée de vie des ouvrages. La durabilité des forages géothermiques implique donc que la conception tienne compte de la relation avec les exploitations souterraines aux alentours.

Malheureusement, très peu d'analyses ont été effectuées afin d'évaluer les effets régionaux et les interférences potentielles provoqués par l'utilisation de plusieurs systèmes géothermiques dans un environnement fortement urbanisé. Un manque d'informations est donc observé, tant en ce qui concerne les risques d'interférences que des performances dans le temps. En effet, le pompage d'un volume d'eau souterraine, même faible, entraînera un rabattement hydraulique dans la région et, de la même manière, l'injection ou l'extraction de chaleur générera des changements thermiques à proximité des échangeurs de chaleur souterrains. Il est donc essentiel d'étudier les interférences potentielles entre les systèmes avant leur implantation.

1.2 Objectifs

Suite aux problématiques énumérées, l'objectif général de ce présent mémoire est d'identifier et de quantifier les sources d'énergie non conventionnelles ayant le meilleur potentiel pour une implantation dans le parc immobilier existant de la Ville de Montréal en fonction des bâtiments et de leur localisation sur le territoire. Il se décompose en quatre objectifs spécifiques, qui sont :

1. identifier les sources énergétiques alternatives potentielles sur l'île de Montréal en se basant sur la documentation existante, notamment en ce qui concerne la géologie, l'hydrogéologie, l'hydrologie et les réseaux souterrains ;
2. identifier et cartographier les bâtiments favorables à l'installation de systèmes énergétiques non conventionnels selon le type de sources, leurs consommations énergétiques et leurs localisations ;
3. déterminer les conséquences et les risques d'interférences thermiques et hydrauliques de l'exploitation de l'énergie géothermique dans un contexte urbain dense, tel que celui de la Ville de Montréal ;
4. mettre en place les lignes directrices de la réalisation de projets pilotes.

Examiner l'influence à long terme de l'implantation et de l'exploitation de la ou les technologies identifiées, en se concentrant plus particulièrement sur les conséquences thermiques et hydrauliques du domaine régional permettra à la Ville de Montréal d'émettre des lignes directrices pour la réalisation de projets pilotes ou, le cas échéant, planter des technologies non conventionnelles.

1.3 Plan du mémoire

Pour répondre à l'objectif général, le présent mémoire est séparé en sept chapitres distincts. Tout d'abord, une revue de littérature orientée sur les différentes technologies non conventionnelles est présentée dans le chapitre 2. Le contexte de la Ville de Montréal et son potentiel géothermique est couvert dans le chapitre 3. Par la suite, le chapitre 4 présente la méthodologie liée à la construction d'une cartographie numérique utilisée afin d'identifier les zones et les bâtiments aux meilleurs potentiels d'implantation, et ce, afin d'optimiser le déploiement des systèmes non conventionnels. Le chapitre 5 présente les différents résultats obtenus par la carte. Le chapitre 6 présente ensuite les résultats d'un article traitant des conséquences thermiques et hydrauliques de l'exploitation de l'énergie géothermique dans un contexte urbain établi sur le choix d'une des technologies et d'un des bâtiments du chapitre 5. Le chapitre 7 discutera des résultats complémentaires, dont la mise en place de lignes directrices utiles à la réalisation de projets pilotes. Finalement, le mémoire se termine sur des conclusions et recommandations.

1.4 Mise en garde

En ce qui concerne les résultats et conclusions présentés dans ce présent document, il est important de rappeler que l'objectif de ce travail est exclusivement académique et qu'aucune des observations qu'il contient ne doit être utilisée pour d'autres fins. Une mise en garde au lecteur est donc de mise quant à l'utilisation de ces résultats à des fins de conception ou de dimensionnement de systèmes énergétiques.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue des travaux de recherche disponibles dans la littérature en lien avec les différentes sources géothermiques alternatives identifiées, soit la récupération de chaleur en provenance d'eaux usées, de lignes de métro, d'échanges thermiques avec les eaux de surface ou de PCP. Ce chapitre permet de répondre partiellement au premier objectif du mémoire, soit d'identifier les sources énergétiques alternatives sur l'île de Montréal en se basant sur la documentation existante. Afin de permettre au lecteur de bien comprendre le fonctionnement du cycle de récupération énergétique de ces systèmes, la première section aborde rapidement l'usage et le rôle des pompes à chaleur, élément essentiel aux systèmes géothermiques. Le chapitre se poursuivra en discutant des sources énergétiques alternatives, en spécifiant leurs potentiels, leurs limitations et les différentes avancées observées dans le temps. Quelques données sur les installations existantes seront aussi présentées afin d'illustrer le potentiel d'installation dans les bâtiments de la Ville de Montréal.

2.1 Résumé du principe des pompes à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) est un appareil mécanique permettant de transférer de l'énergie thermique d'un milieu à basse température (source énergétique) vers un milieu à haute température (puits énergétique) (Rees, 2016), selon un cycle de réfrigération par compression (Fig. 2.1). Ces dispositifs sont régulièrement utilisés afin de compléter les techniques d'extraction de chaleur pour augmenter les performances des sources énergétiques (Hepbasli et al., 2014). Une PAC possède quatre composantes principales (Fig. 2.1) : un compresseur, un condenseur, une soupape d'expansion ou détendeur et un évaporateur.

Le cycle de réfrigération d'une PAC est réversible et peut être utilisé autant en mode chauffage qu'en mode climatisation (Rees, 2016). En chauffage, l'énergie expulsée au condenseur est plus grande que l'énergie utilisée pour faire fonctionner le compresseur. Afin de mesurer l'efficacité énergétique du système, le coefficient de performance (COP) est employé (unité sans dimension). La valeur calculée du COP peut varier entre 0 et l'infini, mais ne peut dépasser la valeur maximale théorique du cycle de Carnot. Une valeur de COP supérieur à 1 signifie que la sortie d'énergie est plus grande que l'énergie fournie au système et à l'inverse, un COP inférieur à 1 signifie qu'une plus grande quantité d'énergie est utilisée qu'extraite. Le calcul du COP est déterminé avec les équations 2.1 et 2.2 variant selon le mode d'utilisation (chauffage ou climatisation).

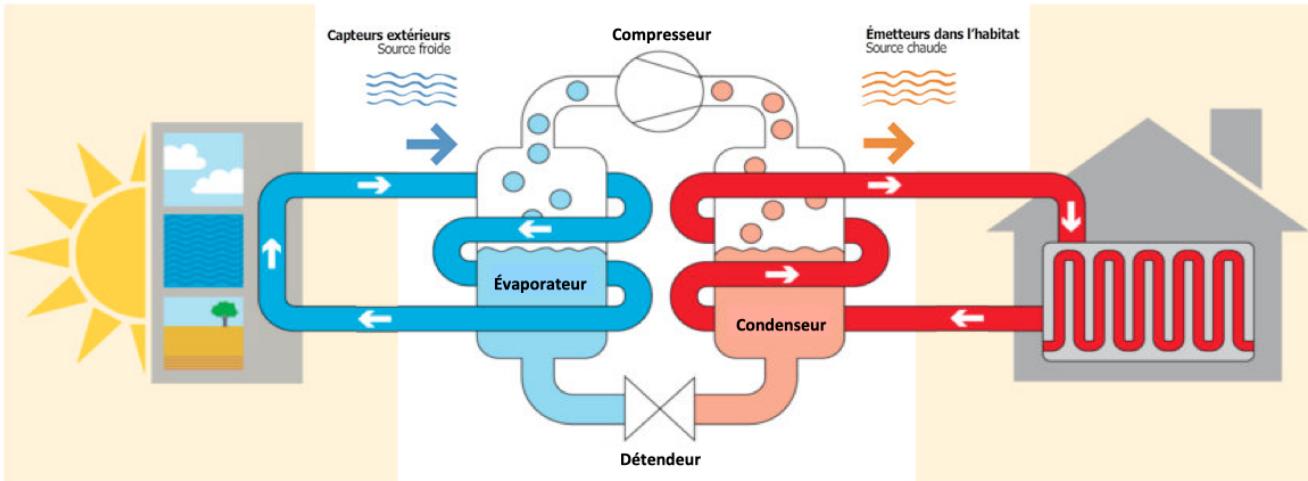


Figure 2.1 Cycle de fonctionnement d'une pompe à chaleur. Adapté de Miller (2020).

$$COP_{chauf.} = \frac{Q_{chauf.}}{W} = \frac{Q_{chauf.}}{Q_{chauf.} - Q_{clim.}} \quad (2.1)$$

$$COP_{clim.} = \frac{Q_{clim.}}{W} = \frac{Q_{clim.}}{Q_{chauf.} - Q_{clim.}} \quad (2.2)$$

où $Q_{chauf.}$ est la chaleur reçue par la source froide, $Q_{clim.}$ est la chaleur fournie par le puits chaud et W est le travail fourni au système pour son fonctionnement. De plus, les équations 2.1 et 2.2 sont reliées selon l'équation 2.3 :

$$COP_{clim.} = COP_{chauf.} - 1 \quad (2.3)$$

Typiquement, un $COP_{chauf.}$ se situe entre 2 et 5, ce qui signifie que 2 à 5 unités de chaleur sont extraites pour chaque unité d'énergie consommée. Cependant, le COP varie largement en fonction de la source énergétique et les rendements plus élevés étant obtenus lorsque les températures des sources chaudes et froides sont rapprochées l'une de l'autre (Rees, 2016), comme le démontre les équations 2.1 et 2.2. En outre, l'appellation change en fonction du type de vecteur de la source (PAC air-air, PAC eau-eau, PAC air-eau, etc.). Les PAC de type «eau-eau» sont généralement les plus performantes, la température dans le temps du puits et de la source variant considérablement moins que celle d'une source utilisant de l'air ambiant (Rees, 2016).

2.2 Récupération énergétique des eaux usées

La première source énergétique non conventionnelle analysée concerne les systèmes de récupération de chaleur des eaux usées. De façon générale, de multiples progrès ont été réalisés dans les dernières décennies afin de diminuer la demande en énergie des bâtiments, tel qu'en optimisant l'efficacité de l'enveloppe énergétique et en perfectionnant les systèmes de climatisation et de chauffage. Toutefois, les progrès pour améliorer la consommation et le chauffage de l'eau domestique sont plus modestes, leurs développements technologiques ayant fait l'objet de peu de recherches et de développement scientifiques. Pourtant, l'utilisation et la consommation d'eau chaude sont essentielles (cuisine, hygiène, etc.). La demande énergétique afin de chauffer l'eau chaude domestique s'élèverait à 23% de la consommation énergétique annuelle moyenne d'un ménage (Frijns et al., 2013), représentant même près de 50% de la consommation de certains bâtiments ultra-performants (Meggers & Leibundgut, 2011). Ce constat implique, qu'en l'absence de système de récupération de chaleur, une quantité importante d'énergie est évacuée dans les égouts. En Suisse, par exemple, 6000 GWh d'énergie thermique seraient perdus tous les ans, une somme pouvant contribuer à 7% de la demande en chauffage du pays (Schmid, 2008). Dès lors, récupérer cette énergie suscite un intérêt grandissant dans la communauté scientifique, et ce, afin de diminuer la consommation d'énergie des bâtiments résidentiels et commerciaux ainsi que de favoriser la baisse des émissions de GES.

2.2.1 Pratiques d'installation et d'opération

Les systèmes de récupération énergétique des eaux usées développés actuellement recourent au processus traditionnel de récupération de chaleur : un échangeur de chaleur (EC) collecte l'énergie calorifique des eaux usées, qui est transférée à une PAC (eau-eau) pouvant ensuite la distribuer dans un bâtiment. L'ensemble du cycle de récupération est présenté à la Fig.2.2. Le potentiel de récupération énergétique des eaux usées se divise sous trois grandes catégories :

1. les eaux usées sont produites et disponibles en quantité importante dans toutes les grandes villes du globe et leurs débits sont constants annuellement (Schmid, 2008; Culha et al., 2015; Bertrand et al., 2017) ;
2. la chaleur de ces eaux est relativement stable au cours d'une année, et invariablement plus élevée que la température ambiante en hiver et plus faible que la température ambiante en été (Meggers & Leibundgut, 2011; Hepbasli et al., 2014; Cipolla & Maglionico, 2014; Bertrand et al., 2017) ;
3. une quantité importante d'énergie est disponible dans ces eaux (Zhou & Li, 2004; Eslami-nejad & Bernier, 2009).

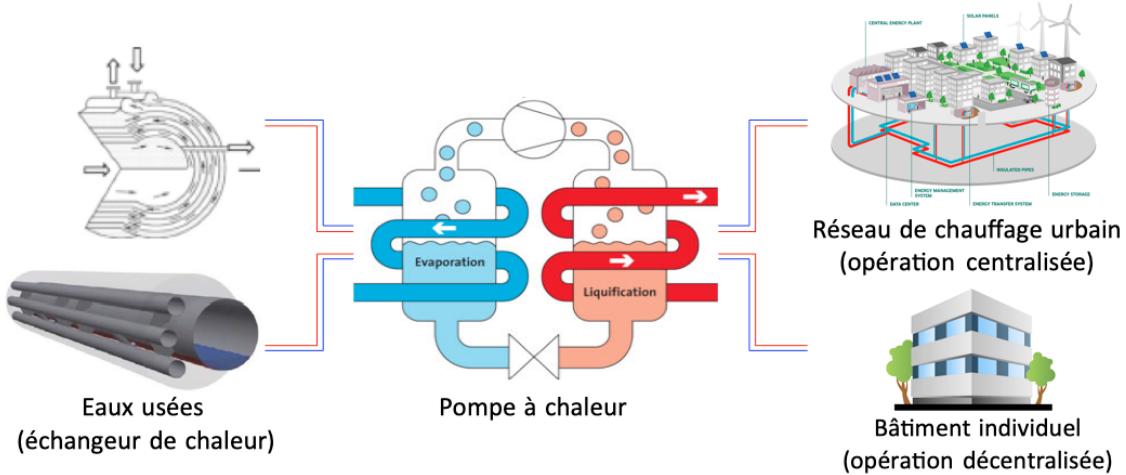


Figure 2.2 Cycle de récupération énergétique utilisant les eaux usées comme source énergétique. Adapté de Engie (2013); Culha et al. (2015); Miller (2020).

Les grands centres urbains utilisent presque toujours des systèmes d'aqueduc et d'égouts dans lesquels les eaux usées circulent vers un centre de traitement collectif. Sachant que les eaux rejetées proviennent en partie de la consommation quotidienne des individus (eau de douche, bain, vaisselle, etc.) et qu'elle peut être considérable, la consommation résidentielle typique d'un montréalais est de 305 L/jour (Québec. Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2018), ces réseaux produisent un débit et une température non négligeable. Plus la température de l'effluent des eaux usées est élevée, plus le COP du système géothermique sera haut, la température de celui-ci étant l'une des contraintes d'application majeures de ces systèmes. Plusieurs études font état d'une température moyenne annuelle au-dessus de 10°C l'hiver et variant entre 20 et 25°C l'été (Schmid, 2008; Sonakiya et al., 2013; Cipolla & Maglionico, 2014). La température restant généralement constante, les COP obtenus ont l'avantage de rester relativement stables annuellement (Weijie et al., 2010). Certains auteurs signalent toutefois la relation entre la variance quotidienne du débit et la consommation des usagers, ainsi que la variance quotidienne de la température et celle de la météo. Une différence de 2 à 3°C peut être observée entre les températures de jour et celle de nuit dans les conduites (Schmid, 2008; Cipolla & Maglionico, 2014) ou lors de grandes périodes de pluie (Cipolla & Maglionico, 2014). Une revue complète des différents systèmes développés a été effectuée par Hepbasli et al. (2014), où les auteurs concluent que les eaux usées peuvent être utilisées comme source de chaleur dans les systèmes de PAC et qu'ils sont généralement plus efficaces que d'autres sources d'énergie traditionnelles (huile, gaz naturel, etc.). Les COP observés varient entre 1,77 et 10,63 en mode chauffage et entre 2,23 et 5,35 en mode climatisation.

Ce type de récupération énergétique a aussi l'avantage de pouvoir conduire à une production centralisée, conjointement associé à un réseau de chauffage urbain, ou décentralisé, fonctionnant individuellement dans chacun des bâtiments (Fig. 2.2). Dans le cas d'un réseau centralisé, une PAC récupère la chaleur de la source et la distribue à un ensemble d'usagers sur le réseau en employant un circuit de liquide réfrigérant. L'intérêt de ce type de configuration permet généralement de réaliser des économies à plus grande échelle et favorise la pleine puissance du système. Une opération centralisée permet aussi de regrouper les différentes opérations d'entretien et d'opération. Toutefois, les productions centralisées ont généralement de plus fortes pertes thermiques que les productions décentralisées, causées par la longueur du réseau. En fonction de l'emplacement de l'échangeur de chaleur, la distance entre la source et les usagers peut s'avérer importante, augmentant les coûts pour la tuyauterie et diminuant l'efficacité énergétique du système. À l'inverse, lors d'une stratégie décentralisée, chacun des bâtiments est responsable de sa propre production de chaleur et doit couvrir ses besoins individuels. Ce type de configuration demande toutefois un investissement total plus grand, provoqué par l'installation de plusieurs petits systèmes.

Le positionnement de l'EC joue un jeu primordial lors de la conception de ce type de récupération énergétique, puisqu'il agit en tant qu'intermédiaire entre la source et la PAC. Trois possibilités d'installation sont généralement employées dans l'industrie (Schmid, 2008; Culha et al., 2015), illustrées dans la Fig. 2.3 :

1. positionnement dans les bâtiments (usage domestique) (Fig. 2.3a) ;
2. positionnement dans les égouts (Fig. 2.3b) ;
3. positionnement dans les usines de traitements des eaux usées (Fig. 2.3c).

Positionnement de l'échangeur de chaleur dans les bâtiments (usage domestique)

L'emplacement le plus courant dans l'industrie consiste à disposer l'EC sur les conduites domestiques d'un bâtiment pour extraire l'énergie de l'eau grise rejetée par les usagers (bain, douche, etc.) (Culha et al., 2015). L'énergie récupérée est utilisée afin de chauffer l'eau froide du chauffe-eau et diminuer la consommation individuelle d'un bâtiment. L'avantage de cette configuration est la courte longueur de transport nécessaire ainsi que les températures relativement élevées de l'eau grise domestique. Toutefois, décentraliser ce type de système demande des dépenses individuelles importantes pour chacun des usagers et les débits observés fluctuent grandement dans le temps, faisant varier les performances de ce type de configuration (Culha et al., 2015). En outre, les gains énergétiques de ce type de configuration sont assez faibles comparativement aux deux autres configurations.

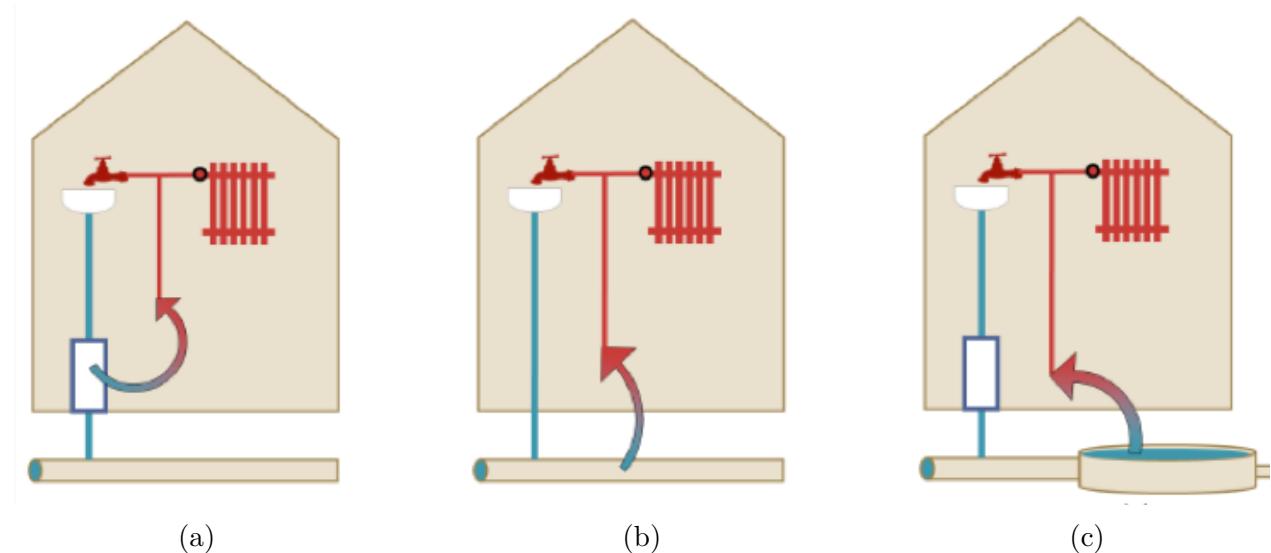


Figure 2.3 Positionnement de l'échangeur de chaleur dans les systèmes de récupération énergétique des eaux usées : (a) dans les bâtiments (domestiques), (b) dans ou sur les canalisations des eaux usées et (c) à l'effluent de l'usine de traitements des eaux usées. Tiré de Schmid (2008).

Positionnement de l'échangeur de chaleur sur les canalisations publiques

Le second positionnement consiste à situer l'EC sur les canalisations publiques, communes à plusieurs bâtiments. Ce positionnement permet une meilleure récupération (~ 1000 kW) afin de fournir de l'énergie à un ou plusieurs bâtiments et édifices. Cette configuration permet d'avoir un débit plus constant et plus important comparativement à l'utilisation domestique (Culha et al., 2015). La distance entre les utilisateurs et la source reste aussi relativement réduite (Culha et al., 2015). Cependant, en abaissant la chaleur de l'eau dans les canalisations, la récupération sur les canaux publics peut nuire à l'efficacité du traitement des eaux à la station d'épuration (Schmid, 2008; Culha et al., 2015).

Ce type d'échangeur peut être installé de deux façons. La première technique consiste à installer l'EC à l'intérieur des tuyaux, en contact direct avec les eaux usées (Zhou & Li, 2004). Les eaux usées sont pompées directement dans le lit d'égout, nettoyées avec un tamis, puis acheminées par un circuit intermédiaire vers l'EC, où le transfert énergétique est effectué (Schmid, 2008). Cette technique nécessite un débit minimum moyen entre 20 et 30 L/s, un diamètre supérieur à 800 mm et un lit de dépôt supérieur à $0.8 \text{ m}^2/\text{m}$ (Schmid, 2008; Niewitecka, 2018) pour une récupération énergétique de 1 à 2 KW/m de canalisation (Niewitecka, 2018). La seconde technique consiste à installer l'EC à l'extérieur de la canalisation, où un

système de tuyauterie est installé à grande proximité des canaux d'égout (Timea et al., 2010). L'EC n'est donc pas en contact direct avec les eaux usées, ce qui diminue les risques d'en-crassement biologique (Culha et al., 2015). Quatre critères importants sont à discerner pour l'utilisation de ce type de configuration : le débit minimum de la canalisation devrait être supérieur à 15 L/s, la température moyenne de l'effluent devrait se situer autour de 10 à 30°C, la distance entre les canalisations devrait être inférieure à 250 m et, finalement, la charge en chauffage du ou des bâtiments devrait être supérieure à 150 kW (Culha et al., 2015).

Positionnement de l'échangeur de chaleur à l'effluent des usines de traitements

Le troisième emplacement consiste à positionner l'EC directement à l'usine d'épuration et, plus précisément, à l'effluent du traitement des eaux. L'énergie de récupération est généralement la plus élevée des trois configurations (jusqu'à 20 MW) et les températures et débits sont plus constants dans le temps que les deux autres positionnements (Hepbasli et al., 2014; Culha et al., 2015). Cette configuration pourrait même être souhaitable, afin d'abaisser la température de l'effluent et diminuer les coûts énergétiques des usines de traitements des eaux usées (Schmid, 2008). Il a été effectivement mis en évidence que la récupération de la chaleur des eaux usées afin de préchauffer les boues de digestion et les boues brutes des stations d'épuration favoriserait une diminution de la consommation énergétique des usines d'épuration (Lines, 1991).

Toutefois, la grande distance entre les usagers et les usines de traitement est généralement la contrainte principale de ce positionnement. Cette distance implique souvent un faible nombre d'usagers pouvant recevoir la chaleur sans un coût énergétique et économique considérable (Schmid, 2008). Dans un contexte où les stations d'épuration seraient près d'un grand centre urbain, positionner l'échangeur de chaleur à l'effluent de l'eau traitée devrait être prioritaire.

2.2.2 Projets de démonstration récents

Positionner l'EC à l'intérieur des bâtiments (Fig. 2.3a) a fait l'objet de plusieurs études, majoritairement dans l'objectif d'optimiser le système (Eslami-nejad & Bernier, 2009; Ni et al., 2012; Liu et al., 2017; Kordana, 2018; Mazur, 2018; Guo & Hendel, 2018). Différents types d'échangeurs ont été proposé afin d'améliorer leur efficacité, tels que l'échangeur hélicoïdal/spiral (Xiaowen & Lee, 2009), à plaques (Kahraman & Celebi, 2009; Chao et al., 2012; Guo et al., 2012; Liu et al., 2013) ou tubulaire (Shen et al., 2012; Wemhoff et al., 2017). La seconde configuration (Fig. 2.3b) a été testée ou utilisée sur plusieurs projets d'envergures, tel qu'à Stockholm, en Suède (Bailer & Pietrucha, 2006), à Oslo en Norvège (Frioetherm, 2007) et à Xi'an en Chine (Gu et al., 2011). Quant à la troisième configuration (Fig. 2.3c),

il existerait environ 500 dispositifs dans le monde permettant la récupération de la chaleur à l'effluent des stations d'épurations, générant entre 10 kW et 20 MW d'énergie (Schmid, 2008), tel qu'à Vladivostok, en Russie (Alekseiko et al., 2014).

2.2.3 Constraintes et limitations

Développement de biofilms

La principale contrainte de récupérer la chaleur des eaux usées provient de l'encrassement biologique des EC causé par les biofilms (Culha et al., 2015; Hepbasli et al., 2014). Les biofilms sont des accumulations de micro-organismes sur les surfaces solides, pouvant être observés dans les milieux humides et aqueux (Costerton et al., 1994). En s'agglutinant à la surface des tuyaux, les micro-organismes créent une enveloppe visqueuse et profitent des nutriments apportés par les eaux usées circulant dans les canalisations (Wanner & Bauchrowitz, 2006). Malheureusement, les biofilms provoquent une baisse considérable de l'efficacité des EC et cette baisse peut varier entre 20 et 50% de l'efficacité originale (Wanner, 2006). La résistance thermique y étant augmentée, la récupération énergétique est grandement réduite (Qu et al., 2011; Culha et al., 2015).

Aucune technologie connue ne peut complètement empêcher la formation des biofilms. Certaines techniques peuvent favoriser la diminution de développement des micro-organismes (augmentation de la vitesse d'écoulement des effluents) (Wanner, 2006), néanmoins, le nettoyage mécanique reste la seule option pour les éliminer complètement. Un nettoyage régulier permet de garder l'efficacité optimale de l'EC. Ce nettoyage nécessite généralement un arrêt complet du système (Wanner & Bauchrowitz, 2006; Schmid, 2008; Culha et al., 2015). Il est possible de surdimensionner le système géothermique afin de tenir compte de la perte d'efficacité due à l'encrassement (Culha et al., 2015), mais une augmentation du coût d'installation et d'opération est provoquée, ce qui n'est généralement pas une approche recommandée.

Abaissement de la température de l'affluent des eaux usées

Une autre problématique s'adresse à l'abaissement éventuel de la température des conduites de l'affluent des centres de traitements des eaux usées. En collectant la chaleur dans les conduites d'eau usée, une baisse de température de l'affluent pourrait être éventuellement observée. Malheureusement, un abaissement thermique peut grandement affecter le traitement biologique des eaux, plus spécifiquement lors du processus de nitrification, qui est fortement dépendant de la température (Wanner et al., 2005; Schmid, 2008; Culha et al., 2015; Niewitecka, 2018). Une baisse de température permanente de 1°C entraîne une réduction de 10% du

taux de croissance des bactéries nitrifiantes et, ainsi, du facteur de sécurité de l'élimination des micro-organismes (Wanner et al., 2005). L'installation de plusieurs systèmes d'échangeurs sur le réseau pourrait affecter radicalement l'épuration des eaux usées et il est primordial de s'assurer d'avoir préalablement l'accord des autorités responsables. Étant donné le caractère névralgique du traitement des eaux usées, celles-ci pourraient refuser toute récupération de chaleur dans les eaux usées ou occasionner des étapes administratives supplémentaires pour les usagers.

2.3 Récupération énergétique depuis les réseaux de transports souterrains ou les fondations de bâtiments

La seconde technologie analysée concerne la récupération énergétique dans les réseaux de transports souterrains, tels que les tunnels de métro. En effet, l'énergie thermique produite quotidiennement dans un réseau de transport souterrain est considérable, puisqu'une différence de 8 à 12 °C entre la température extérieure et celle des tunnels peut être mesurée au cours d'une même journée (Thompson et al., 2006), ce qui peut produire jusqu'à 1 MW de chaleur (Nicholson et al., 2013). Cette énergie est essentiellement diffusée dans le sol, au pourtour du tunnel, sans qu'aucun dispositif n'en tire profit. Avec l'essor mondial des projets de transport souterrains, récupérer cette importante quantité de chaleur latente permettrait de lutter efficacement contre les enjeux climatiques.

Bendelius (1976), l'un des premiers chercheurs à se pencher sur les déperditions thermiques produites dans un tunnel, a établi que les principales pertes d'un réseau de transport souterrain électrique provenaient essentiellement du système de freinage des voitures, des accessoires des wagons, de l'air conditionné ainsi que du rail d'alimentation. Ces observations ont par la suite été rehaussées en y intégrant les passagers, les équipements d'éclairages et la machinerie auxiliaire (Cockram & Birnie, 1976). En 2004, Ampofo et al. (2004a,b,c) ont étudié le confort thermique des passagers et quantifié précisément les charges observées dans le métro de Londres (Fig. 2.4). Leurs calculs subdivisaient les charges de freinage et d'accélération en traînée, les résistances mécaniques, les pertes du moteur, les entrées de résistance et la vitesse de la voiture. Ils conclurent que 85% de la chaleur produite dans le tunnel provenait du système de freinage du train.

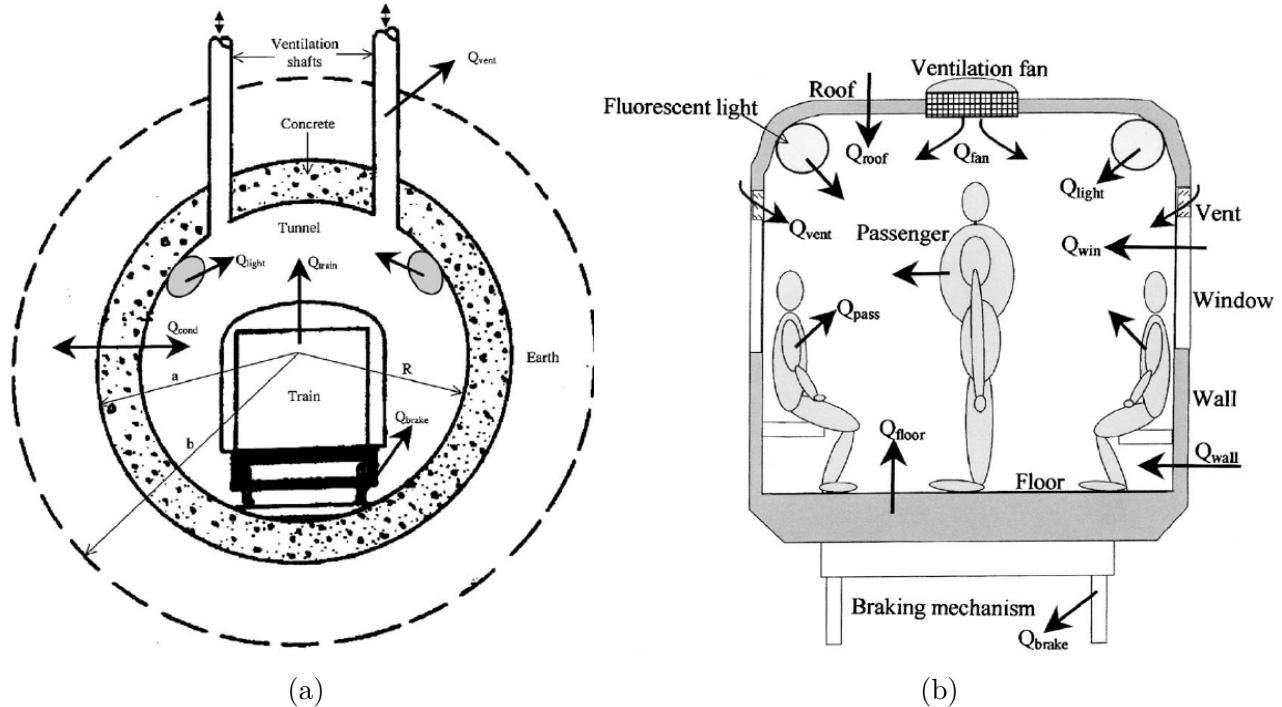


Figure 2.4 Déperditions thermiques a) d'un tunnel ferroviaire souterrain et b) dans une voiture ferroviaire. Tiré de Ampofo et al. (2004b).

2.3.1 Pratiques d'installation et d'opération

Échangeurs de chaleur intégrés aux revêtements des tunnels

La méthode la plus couramment utilisée dans l'industrie consiste à incorporer la tuyauterie de l'échangeur de chaleur aux éléments structuraux du tunnel. Cette technique permet d'utiliser l'intégralité de la superficie du tunnel comme échangeur, de combiner l'aspect indispensable du soutènement du tunnel à la récupération énergétique et mène à une diminution des coûts du système. Ce type de méthode nécessite toutefois d'être planifié en aval, lors de la conceptualisation et de la construction du tunnel, ce qui rend son potentiel de rétro-installation très faible. Les premiers projets d'échangeur de chaleur couplés aux revêtements de tunnels ont initialement été utilisés dans un projet en Autriche (Adam & Markiewicz, 2009). Nommés "Energy Textil", les auteurs ont intégré des tubulures à une toile géosynthétique, puis utilisé du béton projeté afin de maintenir la toile au cuvelage servant de soutènement au tunnel (Fig. 2.5) (Lee et al., 2012, 2016a). Le textile est disposé entre la doublure primaire et secondaire du tunnel et un liquide circulant dans ces tubulures permet la récupération ou l'émission d'énergie dissipée dans le tunnel.

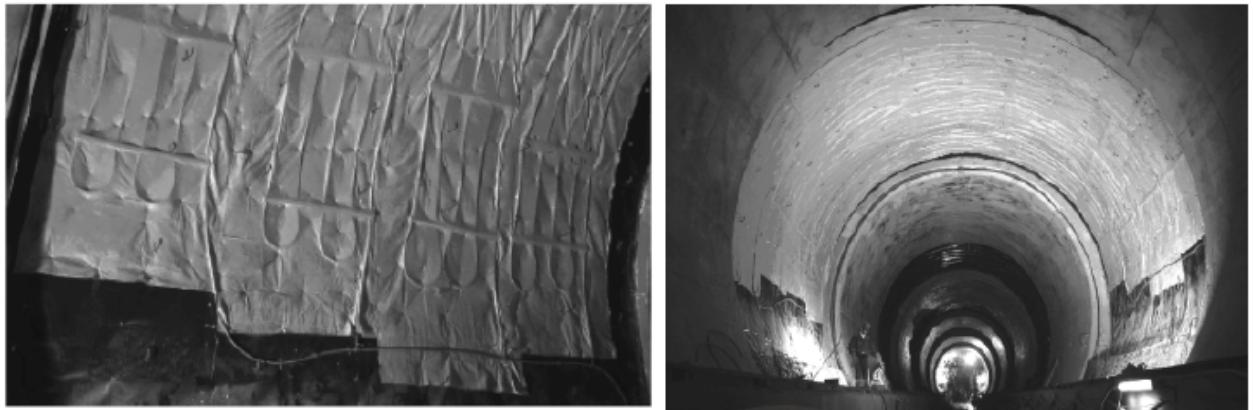


Figure 2.5 Récupération énergétique par intégration de tubulures dans un géotextile utilisé dans le tunnel de Lainzer, Autriche. Tiré d'Adam & Markiewicz (2009)

En modifiant la configuration des tubulures, Lee et al. (2016a) sont parvenus à optimiser la récupération énergétique afin d'obtenir entre 30 W/m^2 à 60 W/m^2 de chaleur. Plus récemment, Berg et al. (2017) ont repris la méthode et l'ont appliquée à une section du tunnel du métro de Stuttgart en Allemagne. Une récupération d'énergie variant entre 5 W/m^2 et 37 W/m^2 a été obtenue, en fonction de la température du fluide de sortie. Cependant, les auteurs notent la difficulté d'harmoniser la charge de sortie du système face à la charge de chauffage, ce qui nécessiterait une meilleure prédition des modèles énergétiques.

À la suite du projet d'Adam & Markiewicz (2009), quelques auteurs ont conceptualisé un procédé afin d'intégrer un système d'échangeur de chaleur à la méthode de creusage avec tunnelier (Frodl et al., 2010; Franzius & Pralle, 2011; Nicholson et al., 2014). Effectivement, la méthode de Adam & Markiewicz (2009) est adaptée à la méthode traditionnelle de creusage (*New Austrian Tunnelling Method* et forage-sautage), toutefois, en utilisant un tunnelier, les segments individuels de soutènement sont préfabriqués à l'extérieur et disposés une fois sur le site. Cette nouvelle technique permet l'intégration des tubulures en plastique de l'échangeur thermique directement à la structure des segments individuels en les attachant à l'ossature de métal (Fig. 2.6). Le béton est ensuite coulé dans les structures avec les tubulures et les segments peuvent être disposés avec le tunnelier tel qu'à l'habitude. Un fluide circulant au travers de la tuyauterie permet de récupérer la chaleur, qui est transmise à une PAC afin d'être récupérée pour chauffer des bâtiments environnants. Le système permet un circuit inverse de façon à climatiser ces mêmes bâtiments en évacuant la chaleur dans le tunnel.

Plusieurs auteurs ont démontré la bonne performance de ce type de systèmes sur divers projets et l'appellation "Energy Tunnel" est parfois rencontrée pour qualifier les lignes de métro équipées de systèmes de récupération énergétique. Frodl et al. (2010), puis Moormann

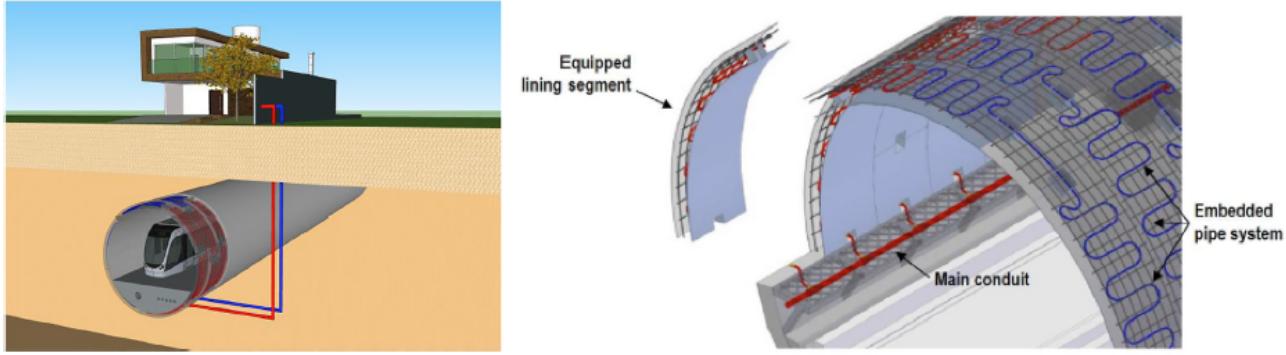


Figure 2.6 Récupération énergétique par intégration de tubulures aux structures de soutènement segmentées. Tiré de Barla & Di Donna (2018).

et al. (2016), l'ont attesté avec l'intégration dans un tunnel de 54 m à Jenbach en Autriche, où 18 à 40 W/m² de récupération de chaleur ont été observés. Franzius & Pralle (2011), dans un tunnel de train à haute vitesse en Allemagne et à Vienne, ont démontré qu'il serait possible de récupérer entre 10 et 20 W/m² d'énergie, et probablement plus, si la température d'opération de la pompe à chaleur pouvait être diminuée. Nicholson et al. (2013, 2014) ont obtenu des chiffres comparables dans un projet pour l'extension du métro de Londres.

Rognon et al. (2019) ont appliqué le procédé de tunnel énergétique à l'extension du métro souterrain de Paris. Le modèle simulé par éléments finis démontrerait une récupération de 120 à 280 kW d'énergie. En utilisant le tunnel comme source de chaleur l'hiver et comme stockage l'été, les résultats sont nettement supérieurs qu'à l'extraction de chaleur seulement. En outre, modifier la vitesse du liquide entrant et la configuration du réseau permettrait une augmentation de l'ordre de 5 à 10% de la récupération énergétique des échangeurs (Barla et al., 2016; Barla & Di Donna, 2018). Finalement, plusieurs projets similaires ont aussi été réalisés et complétés de façon concluante, tel qu'à Stuttgart en Allemagne (Buhmann et al., 2016; Moormann et al., 2016), à Torino en Italie (Barla et al., 2016; Barla & Di Donna, 2018), en Mongolie-Intérieure (Zhang et al., 2013) et à Brenner, en Italie (Tinti et al., 2017).

Piliers, ancrages et murs énergétiques

Une autre alternative consiste à utiliser des fondations comme source d'énergie alternative. Ces fondations énergétiques fonctionnent sensiblement de la même façon que les tunnels énergétiques. Un fluide circulant dans une tubulure installée préalablement sur le squelette métallique permet de récupérer la chaleur autour des infrastructures. La différence majeure réside principalement dans l'aspect final de ces structures, tel qu'illustré à la Fig. 2.7.

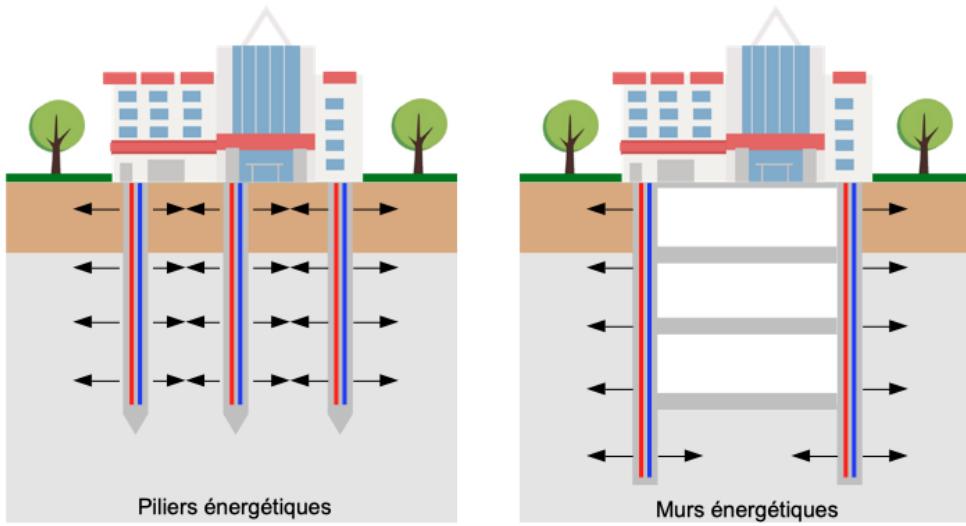


Figure 2.7 Illustration d'un pilier énergétique (à gauche) et d'un mur énergétique (à droite).

L'usage de piliers énergétiques a fait l'objet de nombreuses études depuis les années 1990, où plusieurs projets de récupération d'énergie ont installé ce type de structure (Koene & Geelen, 2000; Brandl, 2006; Laloui et al., 2006; Hamada et al., 2007; Pahud & Hubbuch, 2007; Gao et al., 2008; McCartney et al., 2010; Barla & Di Donna, 2018). L'essor pour ce type d'échangeur a diminué, mais leur rendement avantageux et leur facilité de construction contribuent à leur potentiel. Les murs énergétiques, quant à eux, ont connu une progression considérablement plus faible que les piliers énergétiques. La recherche autour de ce type de fondation s'est limitée à quelques projets conceptualisés au milieu des années 2000 (Brandl, 2006; Adam & Markiewicz, 2009; Amis et al., 2010). Néanmoins, avec leurs plus larges superficies, ils permettraient une plus grande récupération de chaleur que les piliers énergétiques.

Échangeurs de chaleurs dans les systèmes de ventilation

L'idée de retirer la chaleur dissipée par les conduites de ventilation des réseaux de transports souterrains a aussi fait l'objet de quelques recherches. Le concept consiste généralement à récupérer la chaleur générée dans l'air des tunnels par les conduites d'aération et la transférer vers un liquide circulant dans des tubulures installées dans ces mêmes conduites. Ce transfert est réalisé par la différence de température entre l'air et le liquide, qui réchauffe ou refroidit ce liquide. La chaleur transmise dans le liquide est par la suite récupérée par une PAC et émise à un réseau de chauffage individuel ou communautaire. De la même façon, le système peut aussi permettre la climatisation selon un cycle inverse. Ainsi, il est possible de récupérer la chaleur d'un réseau et d'en climatiser le métro, comme démontré à la Fig. 2.8.

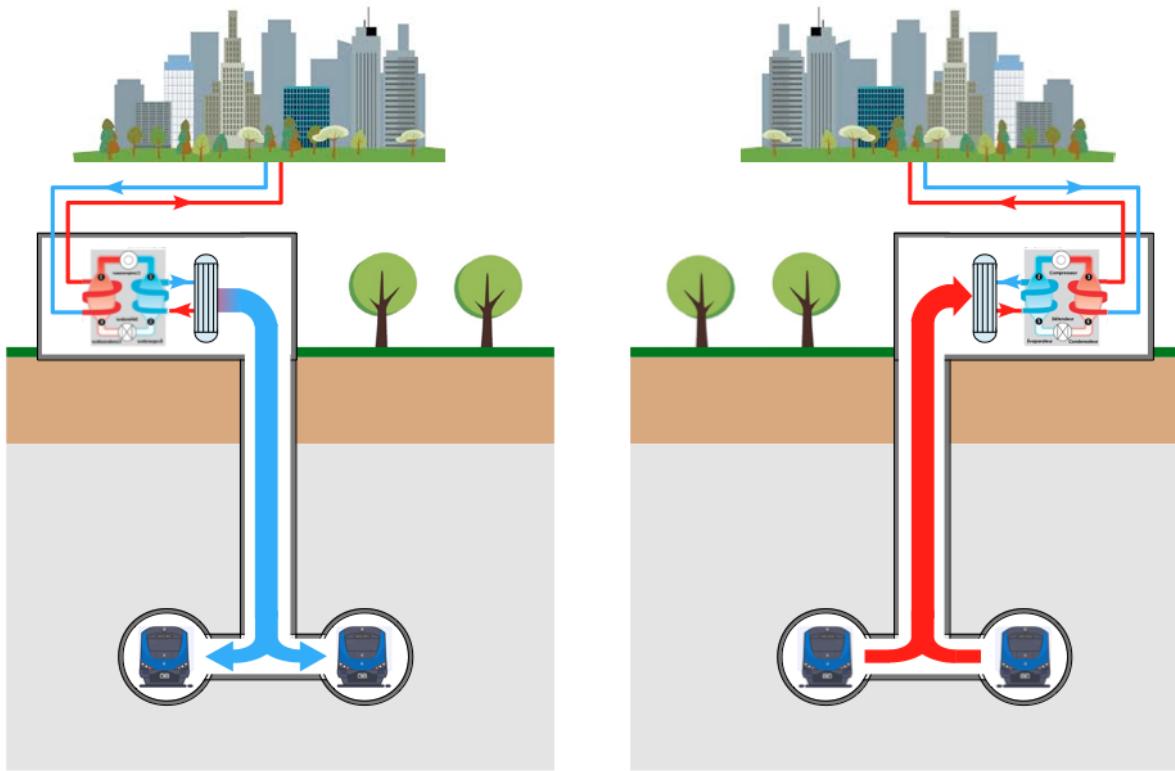


Figure 2.8 Échangeurs de chaleurs dans les systèmes de ventilation d'un tunnel de transport souterrain. Le système démontre un mode en climatisation (à gauche) et un mode en chauffage (à droite).

Il faut remonter en 1988 pour voir un premier projet de ce type être réalisé, lorsque la ville de Sapporo, au Japon, a décidé d'entreprendre un large programme de récupération de chaleur dans son futur métro. Le projet permettait d'éviter des températures extrêmes dans le métro et de balancer les conditions dans le réseau (Toki, 1988). La chaleur récupérée dans les conduites était transmise à un plus large centre d'énergie s'affairant à fournir les utilisateurs. L'efficacité du projet de Sapporo a été renforcée lorsque sa praticabilité a été démontrée après deux années d'usage (Kojima, 1990). Plus récemment, d'autres études ont aussi confirmé la viabilité de ce type de système (Thompson & Maidment, 2010; Gilbey et al., 2011; Vasilyev et al., 2014). Ninikas et al. (2016), en mesurant pendant plus d'une année complète les conditions d'air (humidité relative, température, flux, etc.) du réseau de métro de Glasgow au Royaume-Uni, ont d'ailleurs pu établir que les conditions dans les tunnels sont très favorables à l'amélioration des rendements énergétiques des PAC. Effectivement, utiliser l'air ambiant du métro, où les températures sont plus stables et chaudes comparativement à la température extérieure, permet une augmentation de l'échange thermique et une diminution de l'énergie consommée et des émissions de CO₂.

À l'instar des précédents systèmes, Davies et al. (2017, 2019) ont suggéré un concept de récupération de chaleur par les conduites de ventilation, mais portant particulièrement sur la réutilisation de cette chaleur afin de chauffer et climatiser un réseau urbain. Le projet, nommé *Metropolitan Integrated Cooling and Heating*, permettrait de chauffer et climatiser près de 500 maisons d'un quartier de Londres avec un total de 380 kW de chaleur et 900 kW de climatisation extraire (Davies et al., 2017). Ces sommes représentent 7,88 GWh de chaleur annuellement et une diminution d'environ 1080 à 1800 tonnes de CO₂ (Davies et al., 2019). Les auteurs notent toutefois certaines limitations, liées à la puissance des ventilateurs, pouvant poser certaines problématiques dans le bon fonctionnement du système.

Finalement, Chai et al. (2017) ont présenté un système léger et de petite taille afin d'être incorporé dans toute station de métro sans nécessiter de travaux majeurs. Les unités modulaires préfabriquées permettent une installation aisée et facile en utilisant une PAC (air-eau). Cette installation souple permettrait de positionner les unités à plusieurs endroits potentiels (plate-forme, tunnels, chambre auxiliaire, etc.).

Champs de puits géothermiques localisés

Cockram & Birnie (1976) avaient été les premiers à remarquer l'augmentation de température dans le sol en bordure d'un tunnel de métro. Leurs observations avaient permis d'établir qu'après quatre années de données, la température du sol continuait à légèrement augmenter à une distance de 9,15 m du pourtour du tunnel. Cette constatation concordait avec les hypothèses des auteurs, qui soupçonnaient une sous-estimation du gradient de température causé par la chaleur dissipée d'un réseau de transport souterrain. Sur la base de leurs recherches, Revesz et al. (2016, 2017) ont continué d'étudier l'interaction entre la chaleur dissipée dans le sol et le fonctionnement des métros. Ceux-ci se sont penchés sur le positionnement stratégique de puits géothermiques afin d'augmenter le COP des PAC des systèmes (Fig. 2.9).

À l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel, les auteurs ont fait varier les dimensions géométriques d'un champ de puits géothermiques à boucles fermées et simulé l'influence selon divers paramètres (distance des puits par rapport aux tunnels, nombre de tunnels présents dans l'environnement, des dimensions du champ de puits, etc.). Leurs conclusions ont permis d'établir que l'impact d'un tunnel de transport collectif près d'un puits géothermique est notable et améliore le taux d'extraction de chaleur de la PAC. En fonction de la taille et de la forme du réseau du champ de puits et de son rapprochement avec le tunnel, une amélioration de l'efficacité pouvant atteindre 43% a été observée, le centre géométrique du champ de puits devant être le plus près possible du centre géométrique du tunnel (Revesz et al., 2019).

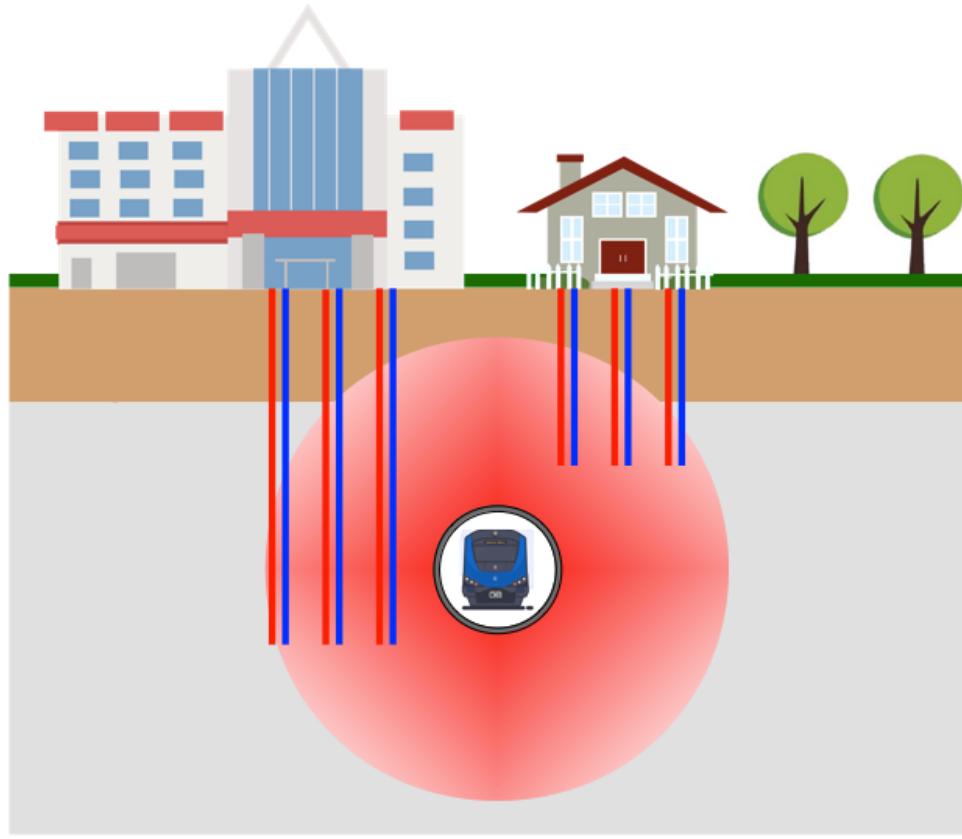


Figure 2.9 Influence de la chaleur dissipée d'un tunnel de métro sur un champ de puits géothermique.

2.3.2 Contraintes et limitations

Malgré la bonne performance de ce type de système de récupération énergétique, cette technologie souffre d'une lacune importante : la difficulté, sinon l'impossibilité, à être utilisé sur un ouvrage existant (opération communément appelée «retrofitting»). Effectivement, de toutes les technologies abordées dans ce travail, celle-ci s'avère la plus difficile à intégrer lors du réaménagement des systèmes thermiques des bâtiments, particulièrement pour ce qui est de l'installation directe dans les tunnels et les fondations. Effectivement, leurs installations doivent être généralement planifiées en avance, avant la construction des infrastructures souterraines, afin d'éviter des surcoûts importants et potentiellement obtenir une rentabilité intéressante. Certains se sont penchés sur des systèmes mobiles nécessitant peu ou pas d'installation permanente (Chai et al., 2017), toutefois, ces systèmes sont encore sous forme embryonnaire, nécessitant d'avantage de recherches et de développement avant d'être déployés efficacement.

2.4 Récupération énergétique depuis les eaux de surface

La troisième source énergétique non conventionnelle étudiée concerne la récupération de chaleur depuis les eaux de surface. L'utilisation de plans d'eau comme source ou puits de chaleur a préalablement été abordée au milieu du 20e siècle par Haldane (1930) puis par Sumner (1948), qui ont présenté des systèmes exploitant la différence de température d'un lac afin de climatiser des bâtiments résidentiels et publics. À la suite de ces ouvrages, ce type de technologie a connu un essor fulgurant, particulièrement au cours des années 70 et 80, lorsque la crise pétrolière était à son apogée (Mitchell & Spitler, 2013; Spitler & Mitchell, 2016). En outre, la démocratisation des PAC a largement contribué aux progrès de ce type de technologie. Toutefois, malgré les progrès réalisés au cours des années 70-80, la recrudescence des énergies fossiles durant les années 90 a diminué l'intérêt de l'industrie pour ce type de technologie (Spitler & Mitchell, 2016).

2.4.1 Pratiques d'installation et d'opération

Ces systèmes de récupération énergétique se divisent sous trois catégories principales :

1. les systèmes en boucles ouvertes à refroidissement direct par les eaux de surface ;
2. les systèmes à récupération énergétique indirecte depuis les eaux de surface avec PAC, se divisant elle-même en deux sous-catégories :
 - (a) les structures à boucles ouvertes ;
 - (b) les structures à boucles fermées ;
3. les systèmes hybrides, où la récupération énergétique est faite par l'utilisation en alternance d'une PAC et du refroidissement direct.

Refroidissement direct par les eaux de surface

Les systèmes à refroidissement direct par eaux de surface utilisent la faible température d'un plan d'eau afin de climatiser directement des bâtiments, tels que présentés dans la Fig. 2.10. Cette configuration utilise une pompe à eau de surface afin d'extraire l'eau et la fait circuler dans un EC pour en retirer la chaleur. L'énergie prélevée est transférée à une boucle de réfrigération fermée, qui est ensuite distribuée dans le réseau (Mitchell, 2014) et l'eau pompée dans l'échangeur est retournée dans le plan d'eau. La nature du plan d'eau peut différer (lac, réservoir ou rivière) et certaines configurations peuvent même être installées en haute mer (Mitchell, 2014; Mitchell & Spitler, 2013).

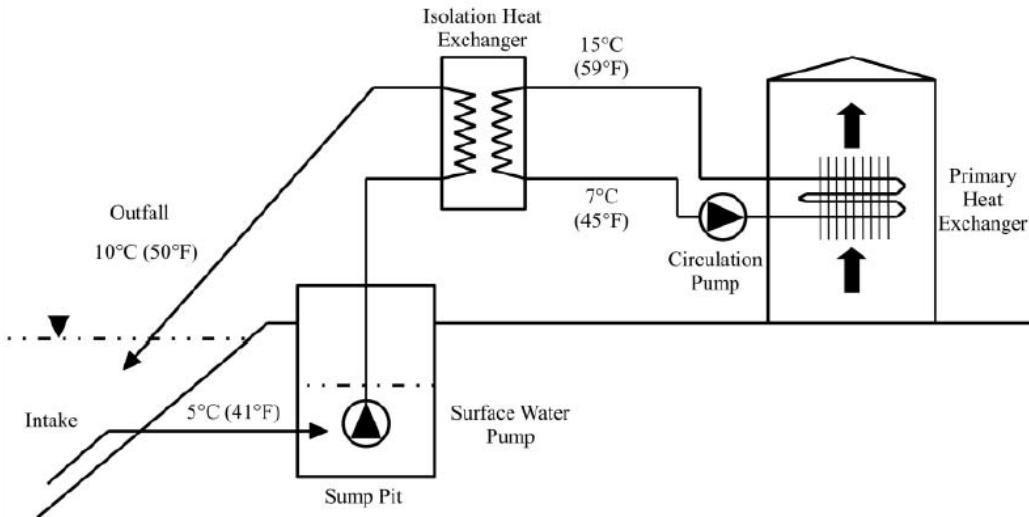


Figure 2.10 Systèmes en boucles ouvertes à refroidissement direct avec eaux de surface. Tiré de Mitchell & Spitler (2013).

L'avantage principal de ce type de configuration est l'utilisation directe de l'eau dans le système de réfrigération, c'est-à-dire qu'aucun système mécanique n'est employé pour réfrigérer l'eau, favorisant un COP pouvant être très élevé (> 25). Certains auteurs suggèrent même la circulation directe de l'eau dans les réseaux de distribution afin d'augmenter la récupération énergétique (Kavanaugh & Rafferty, 1997) lorsque les conditions géochimiques de l'eau de surface le permettent. La présence d'un EC permet toutefois de réduire les risques d'enrassement excessif causé par les minéraux et les bactéries dans l'eau. Cependant, plusieurs contraintes diminuant le potentiel d'installation sont observées dans les systèmes directs comparativement aux configurations indirectes ou hybrides (Mitchell & Spitler, 2013) :

1. ils ne fonctionnent qu'en climatisation ;
2. la température d'extraction de l'eau doit être faible ;
3. une grande proximité des bâtiments par rapport à la source d'eau est nécessaire ;
4. l'enrassement biologique des échangeurs est considérablement augmenté.

De ces trois contraintes, celle de la température de l'eau extraite est la plus sévère. Cette température doit être suffisamment basse pour permettre une bonne performance du système (entre 10 et 13°C) (Ciani, 1978; Kavanaugh & Pezent, 1990). Afin d'obtenir cette température, l'eau pompée doit généralement être collectée à grande profondeur dans les plans d'eau. Puisque le coût associé aux tuyaux de pompage correspond de 50 à 85% (Ciani, 1978; Leerand & Van Ryzin, 1995) du coût total, les longues distances contraignent ce type de configuration (Ciani, 1978).

Les projets économiquement rentables doivent être généralement de grande envergure (Mitchell & Spitzer, 2013). Par exemple, l'université de Cornell, dans l'état de New York (États-Unis) (Peer & Joyce, 2002; Zogg et al., 2008), les installations du Natural Energy Laboratory Hawaii Authority, dans l'état d'Hawaii (États-Unis) (War, 2011), les installations navales de Winter Harbour, dans l'état du Maine (États-Unis) (Ciani, 1978) ou encore les installations de Diego Garcia dans l'océan Indien (Looney & Oney, 2007) sont tous des projets avec une demande énergétique de 5,45 MW ou plus et réalisés de façon concluante.

Récupération énergétique indirecte depuis les eaux de surface (boucles ouvertes)

Les systèmes utilisant les PAC sont les configurations les plus couramment utilisées pour la récupération énergétique depuis les eaux de surfaces. À la différence des systèmes directs, ce type de configuration utilise une approche indirecte de récupération énergétique (Hansen, 2011; Mitchell & Spitzer, 2013), avec l'ajout d'une PAC à l'ensemble du système, tel qu'illustré à la Fig. 2.11. L'addition d'une PAC permet un cycle inverse du système en exploitant la ressource comme source ou puits de chaleur en fonction de la saison et permet ainsi une distribution de chaleur et de climatisation dans les bâtiments (Mitchell, 2014).

Pour le reste, les systèmes indirects en boucles ouvertes fonctionnent sensiblement de la même façon que les systèmes directs en boucles ouvertes. L'eau est pompée du plan d'eau et acheminée à un EC, qui transmet l'énergie à une boucle de réfrigérant fermée, puis à une PAC, qui la fournit à un bâtiment. L'eau pompée est finalement rejetée dans le plan d'eau à une température supérieure ou inférieure à la température initiale, selon le mode d'opération. La PAC permet de pallier la différence de température de la source, ce qui rend le système moins dépendant aux conditions de l'eau par rapport aux systèmes de refroidissement direct (Mitchell, 2014). Néanmoins, la PAC occasionne un financement initial additionnel aux coûts du système, pouvant être considérable selon l'envergure du projet (Culha et al., 2015), et leurs fonctionnements nécessitent une demande énergétique supplémentaire (Culha et al., 2015).

Plusieurs auteurs ont travaillé sur ce type de configuration : Akashi & Watanabe (2003), puis Song et al. (2007) ont obtenu des COP entre 2,6 et 2,9 sur un projet employant de l'eau de mer au Japon. Baardsen (2011) a travaillé sur un réseau de chauffage urbain en Norvège développant 15 MW de chaleur et un COP général de 3 (Kapsalaki, 2017). Chen et al. (2006) ont configuré une structure afin d'alimenter une charge de climatisation de 15 MW à l'aide de l'eau du lac Mengze, dans le sud de la Chine, obtenant un COP entre 3,4 et 4,2. Finalement, la compagnie Frioetherm (2012b,a) a conçu un système de réseau de chauffage urbain développant une charge de chaleur de 180 MW et un COP de 3,75.

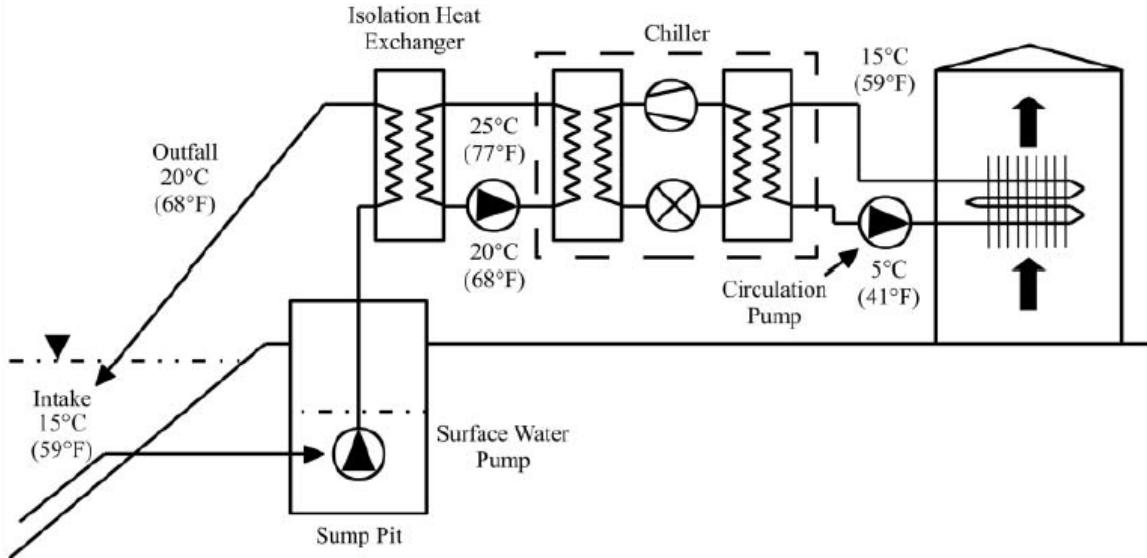


Figure 2.11 Système de récupération énergétique indirecte avec eaux de surface (structure à boucles ouvertes). Tiré de Mitchell & Spitler (2013).

Récupération énergétique indirecte depuis les eaux de surface (boucles fermées)

La modification principale du fonctionnement des systèmes indirects en boucles fermées comparativement à ceux des boucles ouvertes provient de l'immersion de l'EC dans la source (Hansen, 2011; Mitchell, 2014; Spitler & Mitchell, 2016), tel qu'illustré sur la Fig. 2.12. L'EC est donc complètement immergé dans le plan d'eau, ce qui nécessite un circuit fermé dans lequel circule un fluide réfrigérant afin de récupérer la chaleur. Ce type de configuration permet, entre autres, de diminuer de façon importante le risque d'encrassement biologique de l'échangeur (Kavanaugh & Pezent, 1990; Spitler & Mitchell, 2016). Une réduction de la puissance de pompage est aussi observée, puisque la différence de tête hydraulique dans le système est nulle. Cette caractéristique permet d'installer cette configuration à des endroits où une grande différence d'élévation entre la source et les bâtiments est observée (Mitchell, 2014).

Les risques d'accident entre l'EC et des débris flottants sont toutefois plus élevés et l'utilisation de ce type de configuration n'est pas recommandée dans un contexte où le débit de la source est important, telle qu'une rivière (Kavanaugh & Pezent, 1990; Hansen, 2011). En outre, les systèmes indirects en boucles fermées doivent surmonter une certaine résistance thermique provoquée par l'EC, pouvant engendrer une diminution du COP comparativement aux systèmes à boucles ouvertes (Kavanaugh & Pezent, 1990; Mitchell, 2014).

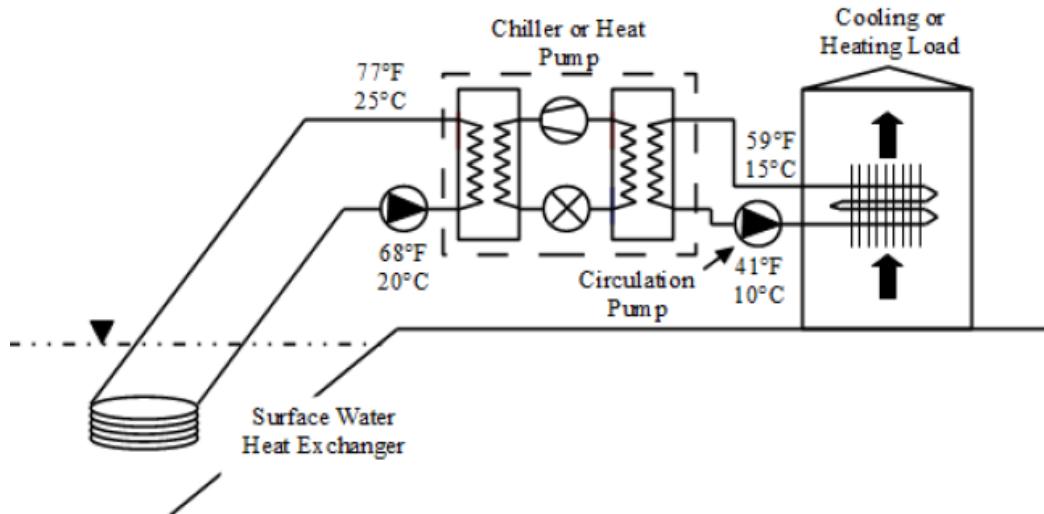


Figure 2.12 Système de récupération énergétique indirecte avec eaux de surface (structure à boucles fermées). Tiré de Mitchell (2014).

Une large variété d'EC a été développée afin d'optimiser la récupération énergétique des systèmes indirects en boucles fermées, tel que l'EC à plaques (Hansen, 2011; Banks, 2012; Mitchell, 2014; Spitzer & Mitchell, 2016), de type hélicoïdal (Hansen, 2011; Mitchell, 2014) ou encore à sédiments de fond (Svensson & Sorman, 1983; Fang & Stefan, 1996). Malheureusement, aucune valeur de COP pour ces configurations n'est rapportée dans la littérature (Spitzer & Mitchell, 2016)

Récupération énergétique hybride depuis les eaux de surface

Les systèmes hybrides à eau de surface sont des systèmes en boucles ouvertes utilisant une méthode de récupération de chaleur directe et indirecte (Spitzer & Mitchell, 2016), tel que l'illustre la Fig. 2.13. La terminologie «hybride» est un terme employé par les auteurs (Spitzer et al., 2012; Mitchell & Spitzer, 2013; Spitzer & Mitchell, 2016) pour désigner ce type particulier de configuration, où l'énergie extraite par l'EC peut être directement envoyée au système de climatisation ou redirigée vers la PAC, lorsque la quantité n'est pas adéquate.

Les projets de Purdy's Wharf à Halifax et Enwave à Toronto sont deux projets majeurs utilisant des systèmes de récupération hybride. Dans le cas de Purdy's Wharf, le système, financé conjointement entre le Gouvernement du Canada et les promoteurs, permet de générer environ 3,5 MW de climatisation en utilisant de l'eau de mer (War, 2011). Ce projet, démarré en 1989, était destiné à servir de projet de démonstration (Newman & Herbert, 2009). Le projet d'Enwave (Fotinos, 2003; Eliadis, 2003; Newman & Herbert, 2009), ouvert en 2006,

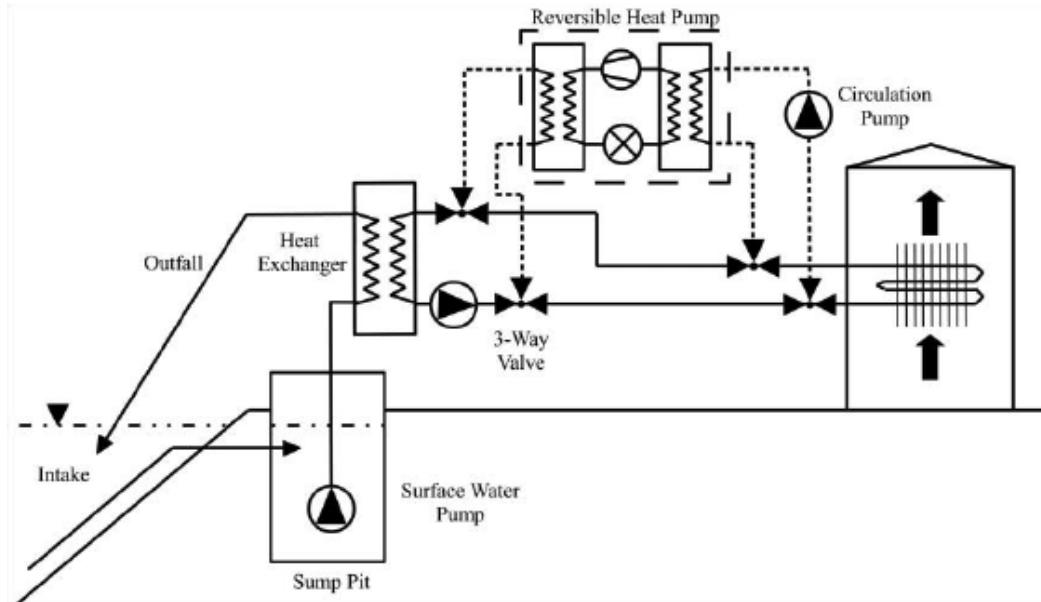


Figure 2.13 Système de récupération énergétique hybride avec eaux de surface. Tiré de Mitchell & Spitler (2013).

avait une envergure plus grande. Avec une capacité totale de 176 MW de climatisation et une tuyauterie s'étendant jusqu'à 5 km dans le lac Ontario, il permet de climatiser 46 bâtiments (Eliadis, 2003; Newman & Herbert, 2009). L'eau extraite est ensuite traitée et utilisée comme source d'eau potable. C'est d'ailleurs l'union entre la récupération énergétique des eaux de surfaces et la prise d'eau potable en eaux profondes qui a permis au projet de réellement prendre son envol (Newman & Herbert, 2009).

À l'échelle internationale, Fermback (1995) a présenté un projet en Suède, afin de fournir un réseau de chauffage urbain via une configuration hybride. Viquerat et al. (2012) ont confirmé l'efficacité d'un tel système avec un projet générant 23,5 MW de climatisation en Suisse. Finalement, Frioetherm (2012a) a également établi un système hybride à Paris, en France. Aucune valeur de COP pour l'ensemble de ces projets n'est rapportée dans la littérature.

Données de conception selon la physique des rivières

Une donnée capitale dans la conception de ce type de récupération énergétique provient de la mesure de température minimale et maximale de la source. Idéalement, afin de bien évaluer le potentiel énergétique, il est important d'avoir accès à un éventail de température au cours d'une année. De plus, comprendre les mécanismes et processus régulant la distribution de la température à l'intérieur des cours d'eau et plans d'eau facilite la conception. De façon générale, les processus d'interactions physiques dans les cours d'eau tendent à être légèrement

plus complexes que dans les plans d'eau et font l'objet d'études approfondies dans les articles de Caissie (2006) et Webb et al. (2008). En résumé, la distribution spatiale et temporelle dans les cours d'eau, tels que les fleuves et rivières, dépend de quatre caractéristiques fondamentales (Caissie, 2006) : les conditions atmosphériques (radiation solaire, rayonnement à ondes longues, évaporation, précipitation, etc.), la topographie, le débit et les propriétés du lit du cours d'eau (sédiments, échange avec les eaux souterraines, etc.).

De ces quatre conditions, les conditions atmosphériques régissent principalement les processus d'échange de chaleur prenant place à la surface de l'eau. Le lit du cours d'eau, par les échanges de chaleur avec les sédiments, influence les processus en profondeur. Le débit des cours d'eau interagit avec la capacité de chauffage ou refroidissement, par le mélange d'eau provenant de différentes sources. Contrairement aux lacs et réservoirs, les températures de rivières varient et ont tendance à suivre la température de l'air ambiant (Caissie, 2006). Les débits étant plus élevés dans les cours d'eau, les stratifications de température observables dans les plans d'eau ne sont généralement pas visibles (Webb et al., 2008). Les modèles employés actuellement pour représenter la distribution spatiale et temporelle de la température d'une rivière sont nombreux toutefois les modèles simplifiés de Edinger et al. (1968) et Herb & Stefan (2011) sont recommandés à des fins d'utilisation en ingénierie (Spitler & Mitchell, 2016).

Données de conception selon la physique des lacs

La distribution spatiale et temporelle des températures dans les plans d'eau, tels que les lacs et les réservoirs, dépend des apports (énergie solaire, ruissellement, etc.) et des pertes de chaleur (évaporation, etc.) ainsi que des mécanismes de mélange (Spitler & Mitchell, 2016). L'énergie solaire contribue fortement à l'apport de chaleur dans les plans d'eau non gelé et cet apport est grandement influencé par la turbidité. Les pertes de chaleur dominantes résultent de l'évaporation de l'eau, mais aussi d'autres phénomènes, comme le transfert de chaleur par convection de surface, la radiation ou le transfert de chaleur par les sédiments. Les mécanismes de mélange sont liés au processus d'advection (débits intrants et sortants, cisaillement de vent, etc.) et de diffusion moléculaire et influencent la température à l'intérieur d'un tel type de corps (Imberger et al., 1978).

La stratification des températures est également à prendre en compte dans les plans d'eau ayant une profondeur suffisante (>12 m). Cette stratification est présente dans la plupart des plans d'eau, et ce de l'été jusqu'à la fin de l'automne (Hakala, 2004). Cependant, au cours de l'hiver, la température à la surface étant plus faible, cette stratification est plus modeste et n'est maintenue que grâce à la présence d'un couvert de glace. Quand la glace fond et que l'eau de surface se réchauffe et devient plus dense, la stratification disparaît et le moindre

souffle de vent entraîne un mélange brusque de l'eau et provoque une homogénéisation de la température dans les plans d'eau (Spitler & Mitchell, 2016). Les modèles pour représenter adéquatement la distribution spatiale et temporelle de la température d'un plan d'eau ont fait l'objet de nombreuses études. Des modèles unidimensionnels (Salaranta & Andersen, 2007), bidimensionnels (Ji et al., 2001) et tridimensionnels (Hamrick, 1992) sont disponibles afin de prédire ces températures. Quant à l'utilisation dans le domaine de l'ingénierie, certains auteurs avancent que les modèles unidimensionnels seraient plus appropriés pour conceptualiser les systèmes de récupération en eau libre par leur plus grande simplicité (Spitler & Mitchell, 2016). Néanmoins, certaines précautions sont à prendre en fonction du modèle employé, telles que le type d'écoulement (turbulent ou laminaire) ou la présence de stratification. L'utilisation de données de températures moyennes, maximales et minimales sur le plan en fonction du temps et de la saison serait idéale afin de caractériser et conceptualiser un système en eaux libres. Finalement, les profils de température d'un lac dépendant fortement des conditions météorologiques locales et du profil bathymétrique, utiliser les données d'un autre plan d'eau avec des caractéristiques similaires doit être fait avec beaucoup de prudence (Spitler & Mitchell, 2016).

2.4.2 Contraintes et limitations

La contrainte principale intervenant dans l'émergence de cette technologie concerne la proximité entre la ressource et les bâtiments. Effectivement, une distance relativement courte doit être observée entre ces derniers afin d'être économiquement rentable, la tuyauterie étant une part significative du système de récupération. Cette courte distance limite, malheureusement, les possibilités d'installations aux édifices les plus près d'un plan ou cours d'eau. Des projets d'envergures, où plusieurs kilomètres de tubulures sont utilisés, comme celui d'Enwave à Toronto, sont généralement joints à un autre type d'utilisation de la ressource, tel qu'une prise d'eau potable, afin de partager les coûts de construction. Dans une moindre mesure, les risques de colmatage sont une seconde justification de la croissance tardive de ce type de systèmes, principalement en ce qui concerne les boucles ouvertes, plus susceptibles d'être touchées par ce phénomène. Finalement, l'adoption de système de récupération de chaleur en rivière est beaucoup moins commune, qu'en plan d'eau (Spitler & Mitchell, 2016). La raison est simple : les grands débits entraînent des considérations supplémentaires à ajouter à l'ingénierie des configurations planifiées pouvant fortement complexifier les travaux (Hansen, 2011). Lorsque la source est un cours d'eau, les systèmes à boucles fermées sont tout simplement à proscrire, le risque de collision avec des débris étant généralement trop important.

2.5 Puits à Colonne Permanente

La quatrième et dernière technologie analysée concerne les Puits à Colonne Permanente (PCP). Les systèmes PCP sont une variante hybride combinant les systèmes géothermiques traditionnels à boucles fermées et à boucles ouvertes (PBF et PBO). Tel que dans les systèmes PBO, l'eau souterraine pompée par le puits d'extraction est directement utilisée comme fluide caloporteur, toutefois, la forme coaxiale du puits permet de réinjecter l'eau pompée dans le même ouvrage, ce qui s'apparente à la configuration des PBF. Ce circuit forme donc une boucle semi-ouverte, où l'eau pompée, au centre, est réinsérée en périphérie, telle qu'illustrée à la Fig. 2.14. Lorsque le mode chauffage est activé, l'eau réinjectée est à une température plus faible que l'eau pompée du puits et le phénomène est inversé en mode climatisation.

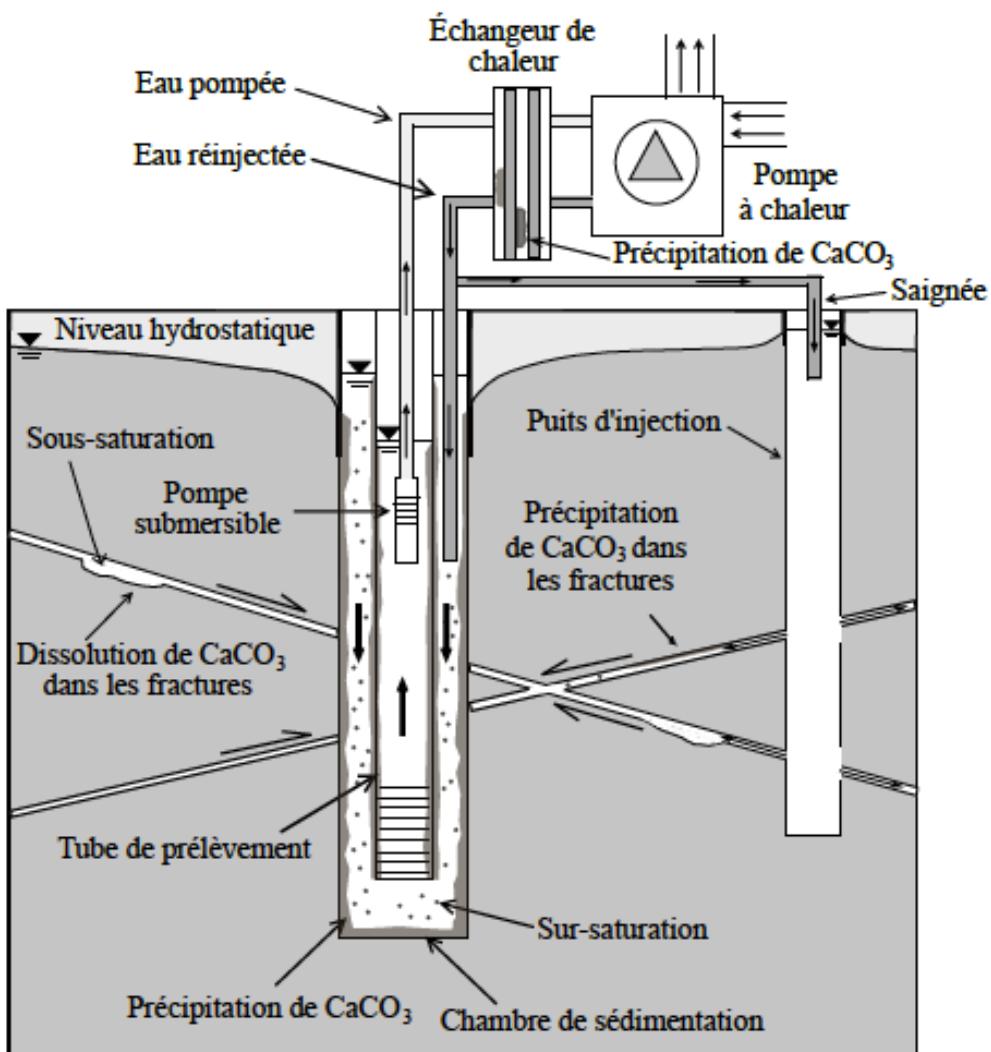


Figure 2.14 Illustration d'un système de puits à colonne permanente. Tiré d'Eppner (2016).

Cette configuration à l'avantage de limiter les complications liées à la productivité de l'aquifère et des paramètres hydrogéologiques observés dans les PBO, en plus d'éliminer les problèmes de résistance thermique des PBF (Yavuzturk & Chiasson, 2002). Le contact entre l'eau réinjectée et le massif rocheux permet un transfert de chaleur par conduction tandis que l'eau alimentée par les bassins régionaux et par le réseau de fractures permet un transfert de chaleur par advection. Le rendement thermique des PCP est donc plus élevé comparativement aux PBF, avec une capacité unitaire de 150 à 225 W/m de forage (Pasquier et al., 2016), aidant à réduire la longueur des puits et permettant de réduire les coûts de construction de deux à cinq fois par rapport aux PBF (Yuill & Mikler, 1995; Yavuzturk & Chiasson, 2002; O'Neill et al., 2006; Pasquier et al., 2016). Certains auteurs ont récemment rapporté des valeurs de COP expérimentaux associés aux systèmes PCP, où l'interpolation de leurs résultats d'expérimentation a permis de mesurer un COP en chauffage de 4,2 (Nguyen et al., 2020). Ces valeurs sont d'ailleurs très près des valeurs indiquées par le manufacturier (4,3).

Afin d'améliorer la production des PCP, un second ouvrage, nommé puits de saignée, peut-être réalisé afin de purger une certaine quantité d'eau du puits principal. Cette démarche est effectuée pour diminuer sporadiquement le volume d'eau dans le puits et créer un large cône de rabattement dans l'aquifère. Ceci permet de stimuler l'apport d'eau du bassin régional, d'augmenter le transfert de chaleur advectif dans le puits et d'accroître temporairement les performances du système. La saignée permettrait de diminuer d'environ 60% la longueur de l'échangeur souterrain comparativement aux PBF (Orio, 1999; O'Neill et al., 2006; Rees et al., 2004). Cependant, le désavantage principal des systèmes PCP est lié aux incertitudes face aux risques de colmatages du système et des équipements (Spitler et al., 2002; Rees et al., 2004; Pasquier et al., 2016), notamment dans des milieux carbonatés ou en présence de fer et de manganèse (Houben, 2003). Ces problèmes, déjà observés et étudiés dans les systèmes PBO (Thomas & Gudmundsson, 1989; Gunnlaugsson, 2012; Ma et al., 2012), pourraient compromettre la performance et la durabilité des opérations des PCP (Eppner, 2016).

2.5.1 Pratiques d'installation et d'opération

Les premiers exemples de PCP sont apparus dans les années 80 et 90 aux États-Unis, avec les travaux de Bose et al. (1979) et Braud et al. (1983) discutant de l'intérêt de faire circuler l'eau pompée dans un seul et même circuit. Malgré une croissance accrue récemment, cette technologie reste sensiblement méconnue de la communauté scientifique et du public en général. O'Neill et al. (2006) notaient qu'au début des années 2000, autour d'un millier de systèmes PCP avaient été installés en Amérique du Nord, majoritairement dans le nord-est des États-Unis, sur des édifices résidentiels ou commerciaux (Orio et al., 2005; O'Neill et al.,

2006). Compte tenu de la faible utilisation du système, la conception, la construction et l'opération des systèmes PCP sont généralement basées sur des normes, règlements et pratiques locales ainsi que sur les conditions géologiques régionales (Pasquier et al., 2016).

Conception du système

Typiquement, ces ouvrages sont constitués d'un puits principal d'environ 150 mm de diamètre avec une profondeur relative au type d'utilisation (Orio et al., 2005). La profondeur se situe entre 75 m et 300 m pour un usage résidentiel et 180 m et 450 m pour un usage commercial (Spitler et al., 2002). Puisque la longueur du forage constitue l'essentiel de l'EC, la profondeur déterminée joue un rôle capital qui est fortement lié à la charge demandée par le bâtiment. Les valeurs typiques de conditions de chargement varient en fonction des études. Orio et al. (2005) indiquaient des valeurs entre 4,3 m/kW et 5,3 m/kW, Banks (2012) utilisaient des valeurs entre 2,6 m/kW et 7,4 m/kW alors que Sachs & Dinse (2000) abordent des valeurs entre 4,3 m/kW et 6,5 m/kW. Néanmoins, compte tenu de l'efficacité de récupération énergétique de ces systèmes et de la longueur du forage, la conception d'un seul puits est généralement satisfaisante pour la charge thermique d'un bâtiment (Orio, 1999; Spitler et al., 2002)

En outre, l'emplacement de la pompe submersible joue un rôle important dans l'opération d'un système PCP. Positionner la pompe dans une chambre de pompage près de la surface est communément employée dans les projets de conception à forage profond (Orio et al., 2005). Cette disposition simplifie les opérations d'installation et de maintenance, diminue la longueur du tuyau de refoulement et les pertes de charge associées et permet une réduction du diamètre du trou de forage (Pasquier et al., 2016). Une autre configuration courante est d'installer la pompe submersible au fond du puits, où la température est la plus élevée, afin de récupérer le maximum d'énergie (Orio, 1999). Cet arrangement nécessite toutefois un long tuyau de refoulement tout le long de l'ouvrage (Spitler et al., 2002), ce qui peut entraîner des complications, particulièrement en ce qui concerne la maintenance de la pompe submersible.

L'installation de PCP étant beaucoup plus compacte que les PBF, cette technique s'adapte mieux aux zones urbaines denses et fortement développées (Pasquier et al., 2016). Les PCP peuvent être facilement intégrés à des projets de rénovation ou de modernisation des systèmes thermiques des bâtiments (Eppner, 2016; Pasquier et al., 2016). Néanmoins, peu de recherches ont été effectuées sur l'interférence thermique et hydraulique possible avec l'utilisation de plusieurs systèmes PCP. Orio et al. (2005) ont été dans les seuls chercheurs à proposer une distance minimum de 10 m entre les puits de pompage afin d'éviter une possible interaction défavorable.

Gestion et contrôle des saignées

Tel que mentionné précédemment, afin de stimuler sporadiquement les performances d'un système PCP, il est possible d'effectuer une saignée de l'eau du puits. Cette saignée permet un apport d'eau plus chaude ou froide en provenance du bassin régional et de réguler la température de l'eau à l'intérieur de l'ouvrage. Cette régulation restreint la consommation énergétique des PAC en améliorant l'efficacité de la source (Rees et al., 2004). Le débit de la saignée varie généralement entre 5 et 25% du débit de circulation totale dans le puits (Spitler et al., 2002), mais un débit de 10 à 15% serait considéré comme idéal pour l'opération du système (Spitler et al., 2002; Rees et al., 2004). Cependant, il y aurait des avantages à utiliser un débit de saignée plus élevé que 15%, notamment, afin de diminuer les risques de gel dans l'ouvrage (Rees et al., 2004). Certains auteurs ont aussi travaillé sur une modulation du débit de la saignée en fonction de la température d'entrée à la PAC pour restreindre les volumes rejetés dans l'environnement (Nguyen et al., 2015).

La saignée apporte toutefois son lot de contraintes opérationnelles et techniques, la gestion des volumes d'eau rejetés étant l'un des problèmes majeurs (Rees et al., 2004). Les possibilités de dispositions sont nombreuses, telles que les égouts, les fossés d'infiltration et les plans d'eau (Spitler et al., 2002; Pasquier et al., 2016), cependant, ces lieux de dispositions sont généralement soumis à une régulation stricte. La réinjection dans l'aquifère, par un second forage en aval hydraulique du PCP, est généralement utilisée dans l'industrie, ce qui engendre toutefois des coûts supplémentaires et restreint les débits de saignée. En outre, l'application de la saignée provoque une augmentation du rabattement au pourtour du puits. Il est important d'effectuer une bonne stratégie de saignée afin de maintenir l'admission de la pompe au-dessous du niveau dynamique le plus bas et le positionnement de la pompe doit être établi en considérant les rabattements provoqués par le taux de saignée maximal.

Particularités des sites d'installation

Le site caractéristique pour l'installation d'un système PCP est un roc compétent, soit un roc capable de supporter des ouvertures sans support structurel, sain, peu friable, avec une faible couverture de dépôts meubles permettant de réduire les contraintes de forage et de soutènement de l'ouvrage (Orio et al., 2005). Mettre en place un système dans un aquifère poreux ou sur un site avec une épaisse couche de dépôts meubles est possible, mais nécessite un cuvelage d'acier afin de renforcer la paroi du trou de forage et de diminuer les risques d'effondrement. Spitler et al. (2002) recensaient l'importance d'une nappe phréatique près de la surface afin d'éviter un coût de pompage trop élevé, ainsi qu'une conductivité thermique favorable pour l'optimisation de la structure géothermique.

La présence d'un aquifère très productif n'est pas nécessaire, puisque l'eau est directement réintégrée dans le circuit hydraulique (Ng et al., 2009), limitant les risques d'abaissement de la nappe phréatique. Puisque les systèmes PCP comportent des incertitudes relativement aux problèmes de colmatage, la composition du socle rocheux intervient grandement dans la mitigation de ce désagrément. Un socle rocheux formé de roches ignées et métamorphiques limiterait considérablement les risques géochimiques et, à l'inverse, un socle composé de calcaire favoriserait largement les risques de colmatage (Eppner, 2016).

Qualité de l'eau et colmatage des systèmes géothermiques

Les risques géochimiques enveloppent l'ensemble des processus issus de la modification du fond géochimique naturel du sous-sol ou de la signature chimique de l'aquifère environnant. Les variations de température ou l'oxygénation de l'eau souterraine peuvent engendrer un tel type de modification chimique (Eppner, 2016). De façon générale, l'utilisation d'un système PCP change les conditions de température et de pression des eaux souterraines circulant dans le puits et dans l'aquifère (Hahnlein et al., 2013). Cette situation provoque l'augmentation de l'oxygénation par diffusion gazeuse et modifie la signature chimique de l'eau. Différentes problématiques découlent de ces changements chimiques et favorisent les risques de problèmes opérationnels, affectant la productivité du système (Pasquier et al., 2016).

L'installation d'un système PCP doit donc prendre en compte la signature physico-chimique initiale et l'équilibre géochimique de l'aquifère dans lequel l'ouvrage sera construit et considérer à long terme l'entretien et la maintenance nécessaire afin d'éviter les possibles effets néfastes associés. Une série d'analyse a d'ailleurs été proposée afin de caractériser l'aquifère et le risque géochimique associé à l'installation d'un système géothermique (Kavanaugh & Rafferty, 1997). Un manque d'entretien combiné à des conditions géochimiques particulières peut éventuellement mener à un entartrage ou un colmatage du puits géothermique (Pasquier et al., 2016; Eppner, 2016). Le colmatage des puits géothermiques peut être caractérisé comme étant une perte du rendement de pompage ou d'une diminution de la conductivité hydraulique ou thermique des différentes composantes de l'ouvrage (massif rocheux, équipements mécaniques, etc.). Le colmatage peut être :

1. de nature physique, lors de l'injection d'une phase gazeuse ; (Eppner, 2016), de particules en suspension ; (Rinck-Pfeiffer et al., 2000) ou d'un liquide trop visqueux ; (Hahnlein et al., 2013) ;
2. de nature chimique, avec la formation de composés insolubles dans l'eau (calcite, manganèse ou ions ferreux) ; (Pasquier et al., 2016) ;

3. de nature microbiologique via la croissance de bactéries et la formation de biofilms (Wurdemann et al., 2014).

Il est rare qu'une seule cause soit associée au colmatage d'un puits et une combinaison multiple de ces facteurs est communément observée (Rinck-Pfeiffer et al., 2000). Cependant, il existe peu d'informations sur l'entartrage spécifiquement associé aux systèmes PCP (Eppner, 2016). En outre, un entartrage ou un colmatage des composantes du système peut provoquer des surcoûts d'exploitation et un possible vieillissement hâtif des équipements. Les plus susceptibles d'être affectés sont les matériels mécaniques tels que la pompe, l'EC ainsi que la tuyauterie. Certaines solutions peuvent permettre de minimiser les risques en installant un EC secondaire entre la boucle d'eau souterraine et la PAC, mais ces solutions peuvent être dispendieuses (Pasquier et al., 2016). Des recherches afin de créer un protocole expérimental sont en cours afin de diminuer les risques d'entartrage et de colmatage.

Finalement, quelques études (INERIS, 2017; Lavoie et al., 2015) notent certains risques de contamination inhérents aux nappes phréatiques utilisée, ou potentiellement utilisable, pour la production d'eau potable. Notamment, le recouplement de plusieurs aquifères lors du forage d'un puits géothermique pourrait permettre l'intrusion de fluide contaminée ou de contaminants entre aquifères (Lavoie et al., 2015). Cependant, ces risques sont généralement associés aux forages profonds, et non aux systèmes géothermiques INERIS (2017). Les risques de contamination associés spécifiquement à la précipitation de minéraux (fer, manganèse, etc.) ou aux développements bactériens provoqués par l'opération de systèmes géothermiques peu profonds n'ont, à notre connaissance, jamais fait l'objet de recherche scientifique.

2.5.2 Projets de démonstration récents

L'engouement actuel pour les puits géothermiques à colonne permanente peut s'expliquer par une variété de facteurs essentiels, tels que la hausse des coûts associés à l'énergie, le développement des fournisseurs dans l'industrie et la diminution des coûts d'installation. Cependant, l'un des points tournants de cet engouement s'explique par le rendement positif de systèmes implantés dans l'est des États-Unis, particulièrement en Nouvelle-Angleterre (Spitler et al., 2002). Le socle métamorphique, très compétent de la région, combiné à un fond géochimique optimal en font un emplacement idéal pour l'installation des systèmes PCP. Des projets, tel que ceux de Mikler (1993), d'Orio et al. (2006) ou plus récemment d'Orio & Patnaude (2014) ont favorablement démontré l'installation de systèmes PCP afin de chauffer et climatiser différents bâtiments. Orio et al. (2006) avaient comme projet la conceptualisation et la surveillance d'une structure intégrant six PCP dans le système de chauffage d'une école publique de Nouvelle-Angleterre. L'étude s'étendait sur une durée de neuf années et a permis

de présenter des économies annuelles de 686 820 kWh. Des résultats comparables ont par la suite été apportés par Orio & Patnaude (2014) avec un projet couplant 16 systèmes PCP et 326 PAC. Choi et al. (2012) et Lee et al. (2016b) ont également démontré le potentiel de ces systèmes en Corée du Sud, où plus du tiers des installations géothermiques construites serait constitué de PCP.

2.5.3 Contraintes et limitations

Différentes contraintes interviennent comme facteur limitatif de l'émergence de cette technologie sur les marchés internationaux. Tout d'abord, l'incertitude face aux risques de colmatage, particulièrement dans les socles calcaires, est sans équivoque la justification primaire de l'apparition tardive de ce type de ces systèmes. Un défi majeur est donc de caractériser les risques de colmatage et de trouver des méthodes pour restreindre ces risques.

Certaines complications provoquées par les obligations législatives et la réglementation sont également évoquées comme facteurs freinant le déploiement des PCP (Comeau & Raymond, 2018). Par exemple, au Québec, la réglementation en vigueur impose le retour de l'eau pompé dans son aquifère d'origine (Éditeur officiel du Québec, 2014), ce qui peut complexifier les aspects liés à la gestion de la saignée. En effet, la création d'un second ouvrage pour la réinjection est donc nécessaire, ce qui entraîne une hausse des coûts associés à l'installation des systèmes, tout en limitant les débits de saignée à la capacité de réinjection du second ouvrage, où un trop grand volume d'eau réinjecté pourrait mener à un débordement du puits.

Le peuvent également contribuer à la diminution de l'essor potentiel des PCP (Pasquier et al., 2016; Spitler et al., 2002; Rees et al., 2004). Par ailleurs, en ce qui concerne les interférences entre systèmes, très peu d'études ont évalué les effets régionaux et les interactions potentielles entre plusieurs systèmes PCP dans un contexte précis. Ainsi, une implantation en milieu fortement urbanisé, tel qu'une agglomération ou une grande ville, pourrait compromettre la durabilité des PCP si les contraintes d'espace conduisaient à les implanter trop proches les uns des autres. Le pompage d'un volume d'eau souterraine, même faible, finirait par provoquer un rabattement hydraulique dans la région. De la même manière, l'injection ou l'extraction de chaleur dans l'aquifère généreraient des changements thermiques à proximité des échangeurs de chaleur souterrains. Quantifier ces modifications pourrait jouer un rôle crucial sur le déploiement à long terme de ce type de système géothermique.

CHAPITRE 3 CONTEXTE ET POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DE L'ÎLE DE MONTRÉAL

Afin de bien situer l'emplacement et la localisation de l'étude, le contexte régional de la Ville de Montréal est abordé dans le présent chapitre. Une revue du potentiel géothermique de la région y est également démontrée, notamment en ce qui concerne la géologie, l'hydrogéologie, et l'hydrologie observées sur l'île et la grande région de Montréal.

3.1 Localisation et climat

Avec une population d'un peu plus de 2 millions d'habitants, la Ville de Montréal est la deuxième ville la plus populeuse du Canada et la plus grande agglomération de la province de Québec (Institut de la Statistique du Québec, 2020). Elle est géographiquement située dans le sud de cette dernière, aux coordonnées 45°31' de latitude Nord et 73°39' de longitude Ouest. Localisé presque entièrement sur l'île de Montréal, son territoire s'étend sur un peu moins de 500 km². À son maximum cette dernière se déploie sur 50 km de long, par 16 km de large. Sa topographie se caractérise par un relief relativement plat, où l'élévation se situe entre 10 et 50 mètres au-dessus du niveau des mers. Le Mont-Royal, au centre, représente son point culminant avec une élévation de 234 m. La région administrative de Montréal regroupe 15 municipalités, dont les 19 arrondissements de la ville de Montréal en y incluant l'île Bizard, l'île Sainte-Hélène, l'île Notre-Dame, l'île des Soeurs et l'île Dorval, tel que présentée à la Fig. 3.1.

En ce qui concerne le climat, la région enregistre une température moyenne de 6,2°C annuellement, où les températures les plus chaudes sont en juillet (20,9°C) et les plus froides en janvier (-10,2°C) (Canada. Environnement et Changement climatique, 2011). La municipalité reçoit 998 mm de pluie par année (Université de Winnipeg, 2020), dont 20% sous forme de neige, et la moyenne annuelle d'ensoleillement est de 44% (Montambault & Leduc, 1980). La gelée au sol est observable entre le mois d'octobre jusqu'à mi-avril (plus ou moins 143 jours), tandis que les précipitations neigeuses se produisent entre mi-novembre et fin-mars (Université de Winnipeg, 2020). Ces caractéristiques climatiques, dont la grande amplitude de température ambiante, induisent une forte consommation énergétique des bâtiments, tant en chauffage qu'en refroidissement. Le nombre de degrés-jour en chauffage, unité de mesure permettant l'estimation de la consommation énergétique, est estimé à environ 4350, ce qui est, par exemple, plus élevé que les villes de Toronto (3850) ou Vancouver (2776) (Université de Winnipeg, 2020).



Figure 3.1 Carte de la région administrative de Montréal, regroupant 15 municipalités (en vert pâle) et les 19 arrondissements de la Ville de Montréal (en vert foncé). Tiré de Ville de Montréal (2013).

3.2 Géologie de l'île de Montréal

Les assises rocheuses de la région de Montréal se composent essentiellement d'une séquence de roches sédimentaires, reposant sur un socle igné et métamorphique formant le Bouclier canadien. Cette séquence, nommée Basses-Terres du Saint-Laurent, est présentée à la Fig. 3.2 (Globensky, 1987). Compte tenu de la localisation de l'étude, les unités géologiques abordées dans cette section ne seront que les groupes et formations retrouvés sur l'île de Montréal, plus spécifiquement dans les arrondissements de la Ville de Montréal. La carte géologique de l'île de Montréal est présentée à la Fig. A.1, en annexe A, et est adaptée de celle provenant des travaux de Globensky (1987). Cette carte expose les principales unités géologiques affleurantes sur l'île, les différentes failles présentes (normale et inverse) ainsi que les divers plis géologiques observables (anticlinal et synclinal).

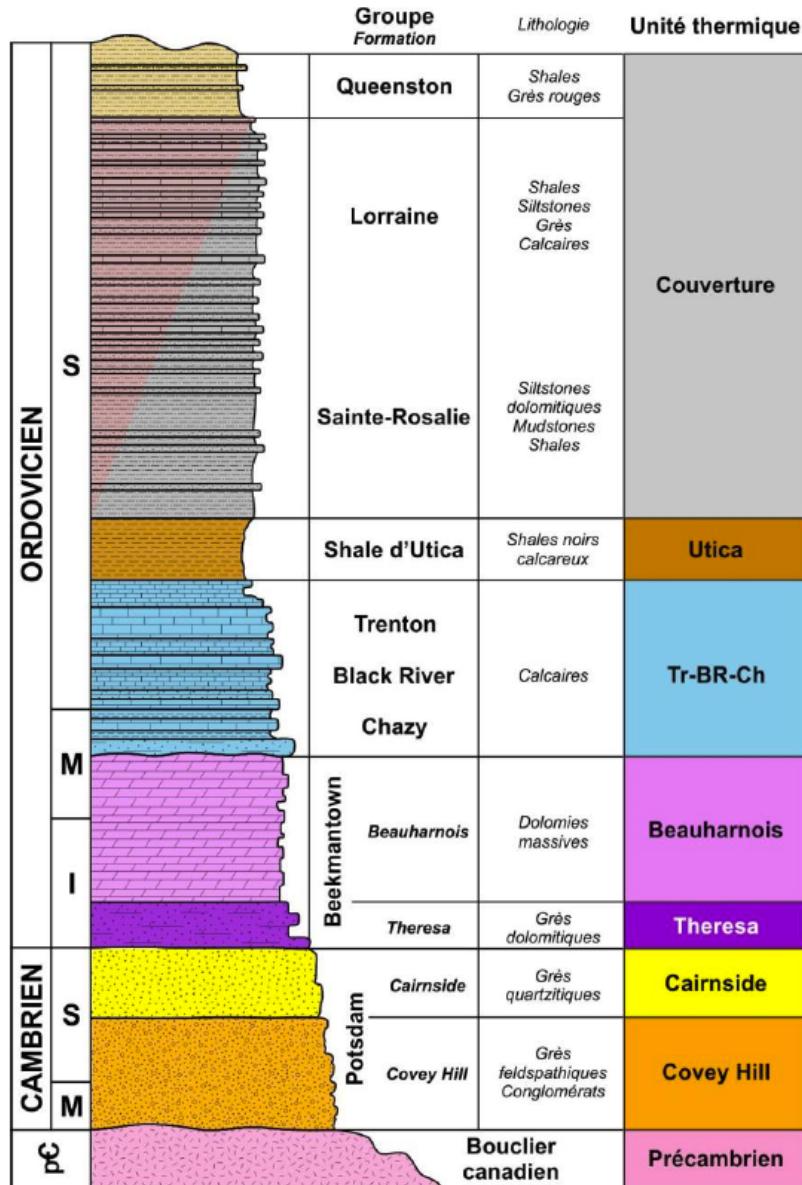


Figure 3.2 Colonne stratigraphique de la séquence géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent. Tiré de Comeau et al. (2012) et adapté de Globensky (1987).

Les roches ignées et métamorphiques de l'ère précambrienne constituent les fondations les plus anciennes du socle de l'île de Montréal. Sur cette formation, on retrouve les roches des périodes du Cambrien et de l'Ordovicien. Les formations du Cambrien, plus anciennes, sont essentiellement composées de grès du Groupe de Postdam. En revanche, les formations de l'Ordovicien sont plus variées, avec une diversité de roches sédimentaires (grès, calcaires, shale, etc.). De la base vers le sommet, on retrouve des dolomies et des grès dolomitiques (Groupe de Beekmantown), des calcaires gréseux (Groupe de Chazy et de Black River),

des calcaires argileux (Groupe de Trenton), des shales noirs (Shale d'Utica), des turbidites (Groupes de Sainte-Rosalie et de Lorraine) et de la molasse (Groupe de Queenston). À ces unités sédimentaires s'ajoute la singularité du Mont-Royal, constitué de roches magmatiques intrusives et recouvrant principalement les roches de l'Ordovicien moyen. Les roches magmatiques intrusives des Montéréggiennes, dont fait partie le Mont-Royal, se seraient injectées durant le Crétacé, qui ont ensuite été érodées pour laisser place aux formations affleurantes actuelles.

Géographiquement, le groupe de Beekmantown n'affleure qu'à la pointe ouest de l'île de Montréal et présente une épaisseur maximale d'environ 250 m. Le groupe de Chazy, un calcaire gris, cristallin, fossilifère, parsemé de lits de schiste et de dolomie, est rencontré essentiellement dans la partie nord de l'île, sur une épaisseur maximale atteignant 85 m. Le groupe de Black River est peu retrouvé sur l'île, son épaisseur totale ne dépassant pas 15 m. Il se caractérise par un calcaire interlit par du shale ou de la dolomie. Le groupe de Trenton est l'unité géologique qui affleure le plus largement à Montréal, ses différentes formations couvrant près de 75% de la surface de l'île. Son épaisseur maximale est d'environ 240 m et il est singularisé par son calcaire en lit, très fossilifère, mince et intercalé de schiste. Finalement, le groupe d'Utica consiste en des formations de schiste noir observables dans une zone longeant la rive sud et sud-est de l'île de Montréal avec une épaisseur moyenne de 140 m.

Faisant suite au développement croissant du marché de la géothermie, Bédard et al. (2018) ont évalué la distribution de la conductivité thermique du sol géologique, afin d'accélérer les études de préfaisabilité et d'accroître l'accessibilité aux systèmes géothermiques. À l'aide de résultats de tests de réponse thermique, de mesures de conductivité thermique en laboratoire et de diagraphies en forages, les auteurs ont permis la modélisation géostatistique de la conductivité thermique du roc afin d'évaluer le potentiel d'intégration au Québec, dont la Ville de Montréal, pour des systèmes géothermiques peu profonds (< 150 m). Les données de l'île de Montréal démontrent un potentiel thermique intéressant et relativement homogène, correspondant essentiellement à la géologie observée à la profondeur visée, soit les formations calcaires de Chazy et de Trenton. Les résultats de la simulation sont présentés à la figure A.2, en annexe A. Les valeurs de conductivité thermique fluctuent entre 2,5 W/m.K et 3 W/m.K sur l'ensemble de l'île. Les exceptions concernent les formations d'Utica sur la Rive-Sud, qui est moins conductrice (2 W/m.K), et la formation de Beekmantown, à l'extrême ouest de l'île, qui est plus conductrice (4 W/m.K). De plus, les valeurs de conductivités théoriques du roc sont également présentées à l'annexe A à la Fig. A.3 et sont tirées de la littérature (Nasr, 2016).

3.3 Dépôts meubles de l'île de Montréal

Une large variété de dépôts meubles est observée sur l'île de Montréal, causé par l'avènement de plusieurs périodes géologiques. À la base, trois variétés de till (basal, intermédiaire et supérieur) sont retrouvées, occasionnées par deux glaciations distinctes lors du Wisconsinien (Épisodes de Malone et Fort Covington). Ces dépôts consistent en un ensemble de dépôts glaciolacustres, fluvio-glaciaires et glaciaires. Suite à la déglaciation, la région fut submergée par la mer de Champlain, laissant une séquence de dépôts lacustres composés de sables et de graviers combinés à des argiles. Enfin, une dernière séquence de dépôts fluviolacustres (sable, argile et limon) puis de tourbe se superpose à l'ensemble des dépôts. La Fig. A.4, en annexe, présente les différents dépôts et leurs répartitions sur l'ensemble de l'île de Montréal.

L'épaisseur moyenne des dépôts meubles est d'environ 6 mètres, mais celle-ci fluctue entre quelques mètres et plus de 30 mètres d'épaisseur. La région où se situe le Mont-Royal est celle où l'épaisseur de dépôts est la plus faible, laissant place à du roc affleurant sur une large surface. À l'opposé, les dépôts meubles ayant la plus forte épaisseur se situent sur la rive sud et sud-est de l'île, bordés par le Saint-Laurent. À l'exception de ces localisations, l'épaisseur observée des dépôts est relativement homogène sur l'ensemble du territoire. La faible épaisseur relative des dépôts est un avantage pour le fonctionnement des systèmes géothermiques, puisqu'elle limite le déploiement de structures de soutènement dans les forages. La Fig A.5, en annexe A, montre l'épaisseur observable des dépôts meubles sur l'île de Montréal.

Au courant du 20e siècle, plusieurs carrières ont été exploitées sur l'île, dont la majorité afin d'extraire de la pierre calcaire, couramment utilisée dans la construction de bâtiments. Suite à leurs fermetures, plusieurs de ces carrières ont été utilisées comme dépotoirs et remblayés par des remblais variés (déchets domestiques, de construction, etc.). Une grande partie de ces terrains a été convertie en parcs municipaux, mais certaines constructions résidentielles, commerciales ou municipales ont également été construites dans les zones. Le principe de précaution est donc de mise à l'intérieur de ces zonages, puisque des travaux de forages ou de circulation d'eau pourraient accentuer les risques de contamination de la nappe phréatique en forçant les contaminants à s'éloigner ou se rapprocher des ouvrages souterrains, en fonction du débit d'eau injecté ou extrait. Néanmoins, si un terrain se trouve dans les limitations d'une ancienne carrière, celui-ci n'est pas systématiquement contaminé (Ville de Montréal, 2020). Au total, pas moins de 94 dépotoirs sont recensés sur l'île, mais les données publiques présentent les délimitations pour seulement 40 d'entre eux. En outre, 12 dépôts de surface, dépressions naturelles exploitées puis remblayées, ont également été recensés. La Ville a mis à disposition une carte interactive gratuite présentant les emplacements des différents dépotoirs, anciennes carrières et site de dépôts meubles sur l'île de Montréal (Ville de Montréal, 2020).

3.4 Hydrologie de l'île de Montréal

L'île de Montréal est ceinturée par plusieurs lacs et cours d'eau, dont la rivière des Prairies, au nord, le fleuve Saint-Laurent et le Lac St-Louis, au sud, ainsi que le lac des Deux-Montagnes et la rivière des Outaouais, à l'ouest. Ces plans d'eau représentent un large bassin versant, dont la superficie est supérieure à 100 000 km². Le tableau 3.1 présente les caractéristiques hydrologiques du fleuve Saint-Laurent et de la rivière des Prairies, où les débits ont été calculés sur cinq décennies d'observation (1970-2012). Les données du fleuve et de la rivière des Prairies proviennent, respectivement, de la station LaSalle et de la station des Mille-Îles (Québec. MELCC, 2020).

Tableau 3.1 Caractéristiques hydrologiques du fleuve Saint-Laurent et de la rivière des Prairies.

Rivière	Débit Moyen [m ³ /s]	Débit Max. [m ³ /s]	Débit Min. [m ³ /s]
Saint-Laurent	8 752	14 500	5 540
Des Prairies	1 094	3 680	382

Outre ces cours d'eau, les autres cours d'eau sur l'île de Montréal sont peu nombreux et essentiellement artificiels. À l'instar de plusieurs métropoles de l'Amérique du Nord, l'urbanisation a provoqué la canalisation et l'assèchement de la majorité des cours et plan d'eau naturels de la région. Le plus important cours d'eau artificiel est sans aucun doute le canal Lachine qui traverse la section sud-ouest de l'île, entre le lac Saint-Louis et le Vieux Port. Historiquement, le canal permettait à la navigation commerciale d'éviter les rapides de Lachine, jouant un rôle crucial dans le développement économique du Canada. Aujourd'hui, il a été remplacé par la voie maritime du Fleuve St-Laurent, mais les embarcations de plaisance y ont toujours accès.

3.5 Hydrogéologie de l'île de Montréal

En ce qui concerne l'hydrogéologie de l'île de Montréal, très peu de données publiques sont disponibles. Malgré leur ancienneté, les travaux de Bériault & Simard (1978) sont sans aucun doute les informations les plus complètes relativement à l'eau souterraine de l'île, ceux-ci ayant réalisé une vaste carte piézométrique de la région. En conséquence à ce manque d'information, une hypothèse importante doit être réalisée, soit celle selon laquelle le niveau de la nappe phréatique est resté stable dans le temps. Cette hypothèse peut être justifiable selon trois considérations (Lepage, 1996) :

1. les précipitations dans la région sont restées constantes dans le temps ;
2. l'exploitation de la nappe phréatique par les puits individuels a largement diminué, la majorité de l'eau potable provenant des rivières ceinturant l'île (Bériault & Simard, 1978) ;
3. l'urbanisation de la municipalité s'est accrue dans les dernières décennies, diminuant le potentiel de recharge de la nappe phréatique.

En supposant ces trois phénomènes à l'équilibre, il peut être acceptable de considérer le niveau piézométrique de la nappe phréatique de l'île stable et constante depuis la réalisation des travaux de Bériault & Simard (1978). Dans cette optique, la carte piézométrique de l'île de Montréal est présentée à la Fig. A.6, en annexe A. La figure expose les lignes d'écoulement de l'eau souterraine, les lignes isopièzes du niveau piézométrique en fonction du niveau des mers (en mètre) ainsi que la ligne de partage des eaux. Puisque l'écoulement des eaux est directement lié à la topographie de l'île, la région du Mont-Royal, au centre, présente la plus haute élévation de la nappe. En moyenne, le niveau de la nappe phréatique est considéré comme peu profond, situé à moins de 5 mètres de la surface (Lepage, 1996). Finalement, les valeurs de conductivités hydrauliques théoriques du roc et des dépôts meubles sont présentées aux Fig. A.7 et A.8, respectivement, et ont été extraites de la littérature (Lepage, 1996; Todd & Mays, 2004; Tran Ngoc et al., 2014).

3.6 Caractéristiques du transport urbain souterrain de la Ville de Montréal

La région de Montréal détient l'un des plus importants systèmes de métro au Canada. Celui-ci dessert la ville de Montréal ainsi que les villes de Laval, au Nord, et de Longueuil, au Sud. Le métro de Montréal, entièrement souterrain, est géré par la Société de Transport de Montréal et compte quatre lignes distinctes (orange, bleue, verte et jaune) desservant 68 stations (73 stations en comptabilisant les stations de correspondance) avec un total de 71 km, dont 66 km de voies exploitées commercialement. Quatre stations sont situées à l'extérieur de l'île, où trois stations débouchent à Laval et une station débouche à Longueuil. La Fig. A.9, en annexe, présente le tracé actuel du réseau souterrain de la Ville de Montréal.

Une extension sur le réseau est actuellement en construction, où l'avancement est encore aux étapes préliminaires. Cette extension, sur la ligne bleue, au nord-est de la Ville, est d'une longueur de 5,8 km de tunnel et permettrait l'accès à 5 nouvelles stations de métro. Située dans les arrondissements de St-Léonard et d'Anjou, l'inauguration de ce tronçon serait prévue pour 2026. La Fig. A.10, en annexe, présente le tracé planifié du nouveau tronçon.

3.7 Caractéristiques du réseau d'égouts de la Ville de Montréal

Le réseau d'égouts de la ville de Montréal couvre près de 5 000 km et est divisé en trois catégories de conduites : (1) les égouts locaux, qui collectent les eaux sanitaires, et parfois pluviales, d'un quartier, soit l'équivalent de plusieurs sorties privées, (2) les collecteurs, captant les eaux usées provenant des égouts locaux et (3) les intercepteurs, vers lesquels l'eau des collecteurs est acheminée.

De façon hiérarchique, les égouts locaux sont les plus petites canalisations du réseau, tandis que les collecteurs sont des conduites légèrement plus larges, leur diamètre variant entre 30 et 450 cm. Ces deux types de canalisations sont elles-mêmes sous-divisées en deux catégories. Les raccords unitaires (combinés), combinant l'eau de pluie et les eaux usées, forment les deux tiers du réseau. Ces raccords sont susceptibles aux variations de débit et de température et, en période d'orage ou de pluie intense, leurs débits peuvent fortement augmenter. L'autre type de raccord est le raccord séparatif, où deux conduites partagent les eaux sanitaires et l'eau de pluie. Ils couvrent le tiers de l'île, majoritairement dans l'ouest de la ville. L'eau pluviale est déversée dans les cours d'eau tandis que l'eau sanitaire se à la station d'épuration.

Le troisième type de canalisation (intercepteurs) est le plus important du réseau de la municipalité, leur diamètre variant entre 1,8 et 5,4 m. Ces canalisations récupèrent l'eau des collecteurs et les acheminent vers la station d'épuration Jean-R.-Marcotte, localisé à la pointe est de l'île, dans l'arrondissement de Rivière-des-Prairies. Le réseau d'intercepteurs totalise 115 km, fonctionne par gravité et est situé à une profondeur variant de 20 à 40 m. Pour accéder aux intercepteurs, ceux-ci doivent être mis à l'arrêt afin d'assécher les canalisations et y assurer un endroit de travail sécuritaire. Depuis la mise en fonction des intercepteurs, ceux-ci n'ont été interrompus qu'à trois reprises, soit en 2003, 2007 et 2015. Les intercepteurs sont séparés en trois sections distinctes : l'intercepteur nord capte les eaux autrefois déversées dans la rivière des Prairies et le lac des Deux-Montagnes, l'intercepteur sud-ouest recueille les eaux des secteurs longeant le lac Saint-Louis et l'intercepteur sud longe la Rive-Sud de l'île de Montréal.

Finalement, la station d'épuration Jean-R.-Marcotte est la destination finale de toutes les eaux sanitaires et d'une partie des eaux pluviales de l'île de Montréal. Avec une capacité maximale de traitement de 88 m³/s, elle traite l'équivalent de la moitié de toutes les eaux usées du Québec. Une fois traitée, l'eau est ensuite rejetée dans le fleuve Saint-Laurent. La Fig. A.11, en annexe, présente l'ensemble du réseau d'égouts de la ville de Montréal en fonction de la hiérarchie des canalisations (locaux, collecteurs, intercepteurs) ainsi que la localisation de la station d'épuration.

3.8 Milieu naturel protégé et écoterritoires

En décembre 2009, l'agglomération de Montréal a décidé de développer un répertoire des milieux naturels protégés sur le territoire, avec pour mission la protection, le maintien et le rehaussement de la biodiversité à long terme de ces régions. Devant satisfaire à la définition des «aires protégées» de l'Union internationale de conservation de la nature, ces sites sont partiellement sous la responsabilité de la ville de Montréal. À l'intérieur de ces zonages, l'urbanisme et la construction de nouveaux bâtiments doivent être soumis à un protocole strict. Les projets de construction de bâtiments et les aménagements pouvant entraîner une perte significative d'habitat sont assujettis à une évaluation environnementale afin d'éviter les pertes d'habitat.

De façon parallèle, les écoterritoires sont des espaces naturels où la protection a été jugée prioritaire. Ils sont d'ailleurs distingués dans le Plan d'urbanisme de la Ville de Montréal (partie III, 6.4) et dix territoires ont été caractérisés. Tout projet ayant lieu au sein d'un de ces territoires doit promouvoir ou prendre en compte la protection des milieux naturels. Cependant, de façon différente du milieu naturel protégé, les projets d'aménagements ou de construction ne sont pas soumis au même protocole environnemental.

En outre, l'île de Montréal dispose d'une grande variété d'espaces verts et de parcs urbains pour ses habitants. La plupart de ses espaces sont organisés en fonction de l'accessibilité des territoires et de leurs superficies : les parcs-natures étant les plus importants. La municipalité possède d'ailleurs une large variété d'installations sur ces territoires afin d'accueillir la population. La Fig. A.12, en annexe, présente l'étendue des différents territoires de l'île et les délimitations des écoterritoires, des espaces verts et des milieux naturels protégés.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DE LA CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE

La construction d'une cartographie numérique a rapidement été établie comme la solution optimale pour répondre au second objectif du présent mémoire qui était d'identifier et cartographier les bâtiments favorables à l'installation de systèmes énergétiques non conventionnels selon le type de sources, leurs consommations énergétiques et leurs localisations. Ce type d'outil permet de rapidement visualiser et identifier les zones potentielles pour les futures installations géothermiques. Lorsque mis en relation avec les données énergétiques des bâtiments de la Ville de Montréal, un tel outil aide à distinguer les bâtiments les plus propices à une éventuelle conversion vers une source énergétique renouvelable. Ce chapitre expose donc la méthodologie utilisée lors de la réalisation de cette cartographie numérique. Une liste des données d'informations cartographiques est initialement exposée, puis les caractéristiques énergétiques du parc immobilier de la municipalité y sont présentées. Un tri des différentes technologies géothermiques (chapitre 2) est ensuite réalisé afin de sélectionner les configurations les plus propices à l'environnement de Montréal (chapitre 3).

4.1 Données d'information géographique de l'île de Montréal

Plusieurs plateformes numériques ont été utilisées afin de récupérer la totalité des informations utiles à la création de la carte. Une large partie de l'information a été obtenue par la Ville de Montréal, via le portail numérique de la municipalité, nommé portail de Données Ouvertes. La majorité des fichiers sont des fichiers de système d'information géographique (SIG) utilisables sur des logiciels du même type (QGIS, ArcGIS, etc.). Les cartes récupérées sur la plateforme sont :

- les limites terrestres de l'île de Montréal ;
- les limites administratives de l'agglomération de Montréal ;
- les infrastructures routières (Géobase) ;
- les milieux humides, milieux intérieurs naturels protégés et écoterritoires ;
- les grands parcs, parcs d'arrondissements et espaces publics ;
- le plan d'urbanisme - Densité de construction et affectation du sol ;
- le schéma d'aménagement et de développement - Patrimoine ;
- le modèle numérique de surface et la représentation géométrique des bâtiments ;
- le plan des actifs des réseaux d'eau potable et d'égouts de la Ville de Montréal ;
- le tracé de la STM (réseau de métro souterrain) ;
- l'hydrographie ;

- la carte des dépôts meubles ;
- les anciennes carrières et les dépôts de surface du territoire.

La plateforme GéoIndex, développée par l'Université de Laval afin de partager la consultation et l'extraction de données géospatiales, a aussi permis d'extraire d'autres données complémentaires. Toutefois, l'accès à cette plateforme est réservé aux membres de la communauté universitaire. Les informations extraites sur cette plateforme sont :

- les polygones de lots (cadastres) ;
- la carte hypsométrique (courbes de niveau).

Finalement, la carte interactive du Système d'information Géominière du Québec (SIGEOM) a aussi permis de récupérer d'autres informations publiques. Cette plateforme dispose de cartographie géologique, de prospection et d'exploration réalisée, notamment par le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. Les données suivantes ont été prélevées dans le cadre du projet :

- la géologie régionale ;
- les structures planaires et linéaires régionales (plis et failles).

De plus, les informations non disponibles au format *.SIG* ont été soumises à la méthodologie suivante. Chacune des cartes était préalablement géoréférencée, opération consistant à positionner les cartes dans l'espace. Afin d'y parvenir, plusieurs points sont identifiés de façon visuelle sur la carte et des coordonnées géographiques réelles y sont associées en les repérant géographiquement. Ce géoréférencement manuel entraîne certaines imprécisions, causées par les approximations lors des opérations, qui dépendent du nombre de points utilisés, de leurs fiabilités et de la précision de la carte.

Une fois les données géoréférencées, la seconde opération consistait à tracer les informations utiles à la cartographie numérique. Les logiciels d'information géographique disposent généralement d'outil destiné à recopier les données pour en produire une version vectorielle. Les différentes couches sont ensuite organisées selon leur apparence afin de produire une méthode cohérente de traçage. Les informations subséquentes ont été déterminées selon cette technique :

- les informations piézométrique et hydrogéologique de l'île de Montréal (Bériault & Simard, 1978) ;
- l'épaisseur des dépôts meuble de la région de Montréal (Prest & Keyser, 1982) ;
- le tracé de l'extension de la ligne bleue du métro de la ville de Montréal.

4.2 Caractéristiques énergétiques des bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal

La municipalité possède une très large variété de bâtiments, dont des bureaux, des petites infrastructures urbaines saisonnières, des postes de police, des casernes de pompiers et des garages municipaux. Afin d'assurer une bonne adéquation entre le projet et les attentes des entités responsables du projet (la Ville de Montréal), l'identification des différents bâtiments du parc immobilier et l'évaluation des besoins énergétiques étaient primordiales. Ces étapes, essentiellement réalisées à l'aide des cartes cadastrales et des relevés de consommation, permettent d'établir une cartographie des bâtiments existants en fonction de leur consommation énergétique.

En date de 2017, la ville était propriétaire d'un total de 797 bâtiments à travers ses 19 arrondissements. Sur ce total, 774 bâtiments possèdent des données énergétiques accessibles et exploitables. Avec un parc urbain aussi varié, la consommation énergétique totale fluctue énormément selon les édifices répertoriés. Les données mesurées annuellement oscillent entre 0.07 GJ et 45 088 GJ par bâtiment et les pointes d'énergie oscillent entre 0,002 kW et 1429,75 kW. La plupart des données énergétiques disponibles se situent entre 2010 et 2017, mais une forte proportion des bâtiments (74,4%) ne présente qu'une seule et unique année de donnée (365 jours) entre janvier et décembre 2017. Plusieurs types de systèmes thermiques sont observés dans le parc urbain, notamment des systèmes à l'électricité, au gaz naturel, au gaz propane, au mazout (2-léger), à la vapeur d'eau, à l'eau réfrigérée ou une combinaison de ces systèmes. Le tableau 4.1 dénombre les proportions de chacune des sources énergétiques utilisées dans les bâtiments du répertoire de la ville.

Tableau 4.1 Proportions des différents types de systèmes thermiques identifiés dans les bâtiments de la Ville de Montréal

Éner. Primaire	Éner. Auxiliaire (#1)	Éner. Auxiliaire (#2)	Nombre Bât.	Proportion
Électricité	-	-	524	67.70%
Électricité	Gaz Naturel	-	85	10.98%
Électricité	Gaz Naturel	Propane	1	0.13%
Électricité	Propane	-	2	0.26%
Électricité	Mazout 2 (léger)	-	11	1.42%
Électricité	Vapeur	-	4	0.52%
Gaz Naturel	-	-	9	1.16%
Gaz Naturel	Électricité	-	135	17.44%
Propane	Électricité	-	1	0.13%
Mazout 2 (léger)	-	-	1	0.13%
Vapeur	Électricité	Eau Refr.	2	0.26%
Total			774	100

Une forte majorité (67.7%) des bâtiments identifiés fonctionnent donc intégralement à l'aide d'un système thermique à l'électricité. De tous les systèmes thermiques présents dans le parc urbain, les systèmes électriques sont parmi ceux qui génèrent le moins de GES, le facteur énergétique étant égal à 0,72 kg CO₂éq./GJ (Transition énergétique Québec, 2017). Seule l'eau refroidie fait mieux que l'électricité avec un facteur de 0,69 kg CO₂éq./GJ (Transition énergétique Québec, 2017). En revanche, les systèmes utilisant le mazout (2 léger), le gaz propane, le gaz naturel ou la vapeur d'eau sont parmi les sources énergétiques les plus polluantes, avec des facteurs de conversion énergétique respectifs équivalents à 71,21 kg CO₂éq./GJ, 57,05 kg CO₂éq./GJ, 50,10 kg CO₂éq./GJ et 50,10 kg CO₂éq./GJ.

Cette large différence est principalement expliquée par la façon dont le Québec produit son électricité. Environ 95% de celle-ci est produite par hydroélectricité, qui génère peu de GES comparativement aux énergies fossiles. Dans cette optique, afin de circonscrire les bâtiments les plus problématiques au niveau de la quantité de GES produits, les bâtiments fonctionnant uniquement à l'aide d'un système électrique ont été éliminés de l'étude. S'il est vrai que moderniser ou rénover certains bâtiments particulièrement énergivores pourrait permettre de diminuer la charge sur le réseau électrique, notamment en ce qui concerne la demande en pointe, la portée de l'étude se concentre plutôt sur la diminution des émissions de GES.

En réponse à ce premier tri, 250 bâtiments seraient disponibles pour une conversion vers une énergie moins émettrice de GES, dont une large majorité (88.0%) utilise une combinaison de gaz naturel et d'électricité. À contrario, une minorité de bâtiment fonctionne entièrement avec des énergies fossiles (4.0%), parmi lesquels 9 bâtiments utilisent le gaz naturel et 1 bâtiment du mazout. Au premier abord, cibler de façon prioritaire les bâtiments fonctionnant au propane ou au mazout semblerait la meilleure des options afin de diminuer rapidement les émissions de GES, leurs facteurs de conversion énergétiques étant plus élevés. En appliquant ces valeurs aux résultats de consommation annuelle des bâtiments, il est toutefois possible de constater que les bâtiments les plus polluants, en ce qui concerne les émissions de GES, sont presque tous des bâtiments utilisant du gaz naturel. Sur les 25 bâtiments les plus polluants de la municipalité, 2 bâtiments seulement utilisent une autre source énergétique (vapeur) que le gaz naturel. Le résultat augmente à 3 bâtiments lorsque les 50 bâtiments les plus polluants sont comptabilisés et 6 bâtiments en comptabilisant 100 bâtiments, dont un seul utilise du mazout. La raison est simple : les bâtiments de plus grande superficie emploient généralement des systèmes au gaz naturel, qui s'avèrent généralement moins onéreux que le mazout ou le propane. En outre, une majorité des systèmes au mazout sont des systèmes thermiques en fin de vie ou présentant un indice de vétusté élevé et devant être modernisés. C'est l'une des raisons pour laquelle la ville de Montréal avait initialement identifié le remplacement de cette source d'énergie.

Dans ces circonstances, deux étapes seront alternativement réalisées pour la suite des analyses. La première étape permettra d'identifier les bâtiments les plus polluants selon les émissions de GES totaux, sans considération pour le système thermique, et ce, de façon à réduire efficacement et rapidement la quantité de GES produits. La Fig 4.1 présente la localisation de tous les bâtiments en fonction de leurs émissions de GES calculés annuellement. Une liste exhaustive des bâtiments est disponible au tableau B.1, à l'annexe B.

De façon alternative, si possible, la seconde étape ne considérera que les bâtiments ayant comme source primaire ou auxiliaire le mazout et le gaz propane. Un total de 15 bâtiments de ce type été répertoriés sur l'ensemble de l'île. Cette étape est réalisée de façon à répondre aux intentions initiales de la municipalité, qui était de viser en priorité les systèmes thermiques au mazout et au propane. Cependant, vu le nombre restreint de bâtiments, il est possible qu'aucun des bâtiments ne soit propice aux technologies alternatives envisagées. Dans cette perspective, cette étape pourrait être tout simplement éliminée. La Fig 4.2 présente la localisation des 15 bâtiments, ainsi que leurs émissions de GES calculées annuellement.

4.3 Quantification du potentiel de conversion du parc immobilier de la Ville de Montréal

Malgré le potentiel des différentes configurations des technologies identifiées précédemment (chapitre 2), plusieurs d'entre elles ne sont pas idéales pour une implantation sur l'île de Montréal. Certaines conditions géologiques, hydrogéologiques ou d'éloignement à la source peuvent effectivement limiter leurs déploiements dans la région. Afin de circonscrire les technologies avec les potentiels les plus élevés, il est nécessaire de sélectionner un nombre restreint de configurations applicables au contexte géographique, géologique ou hydrologique de la Ville de Montréal. Différentes méthodologies ont ensuite été employées pour quantifier le potentiel de conversion des bâtiments du parc urbain de la Ville de Montréal, qui varient selon les types de sources de récupération énergétiques. Les sections suivantes présentent donc les méthodes réalisées afin d'évaluer ce potentiel.

4.3.1 Sélection des configurations de récupération dans les eaux usées

Les limitations de ce type de récupération énergétique sont majoritairement liées au positionnement de l'EC à la source. Disposer l'échangeur à l'intérieur des canalisations d'égouts est la configuration la plus intéressante dans le contexte de ce projet, où les canalisations à utiliser correspondent spécifiquement aux collecteurs. Les intercepteurs et les réseaux d'égouts locaux doivent être éliminés de l'analyse, car les premiers, malgré leurs grands débits, exigent

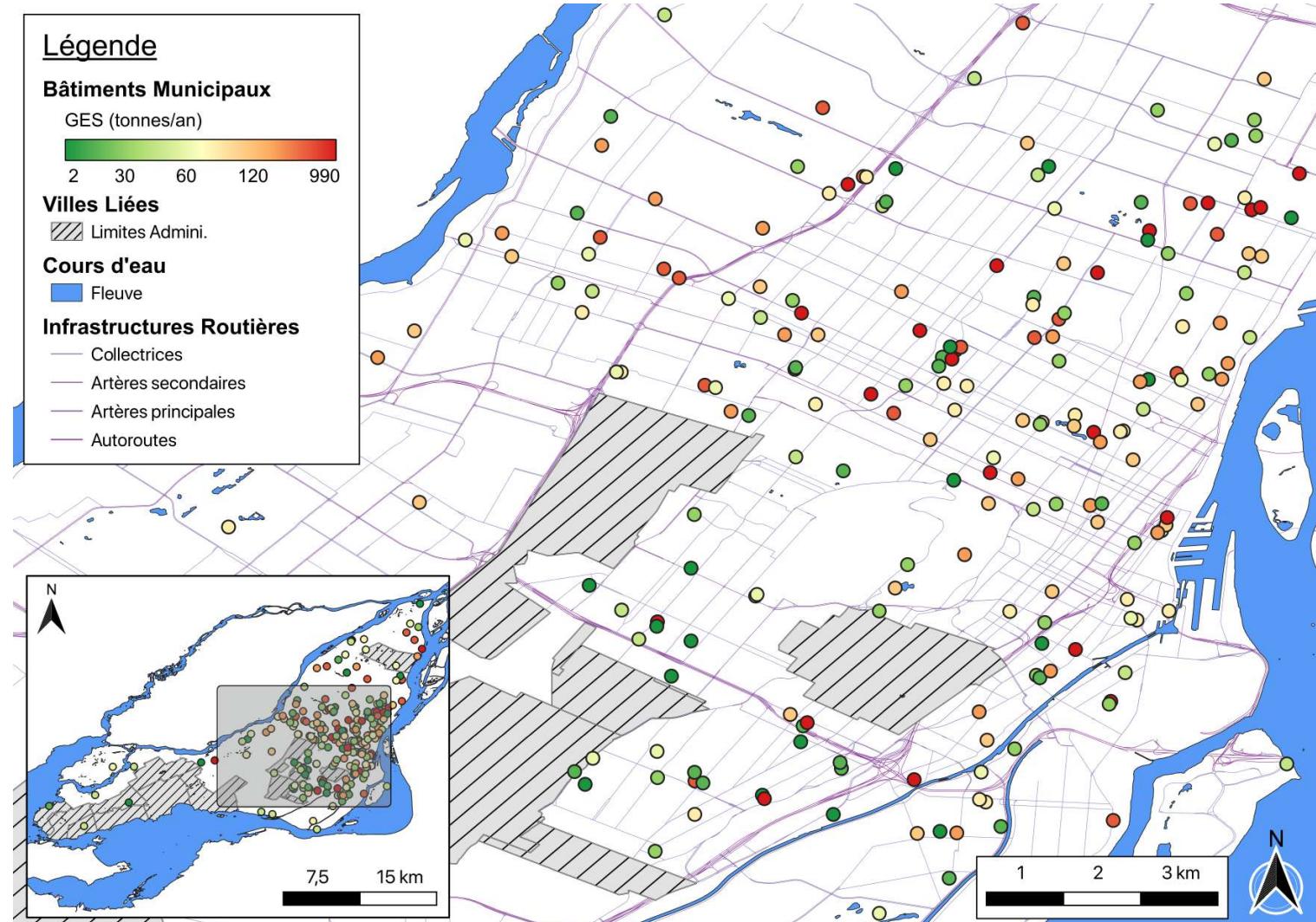


Figure 4.1 Localisation des 250 bâtiments de la Ville de Montréal ayant un système thermique carburant à l'aide d'énergies fossiles (gaz naturel, mazout, propane ou vapeur). Les émissions de GES calculés annuellement pour chacun des bâtiments sont également présentées.

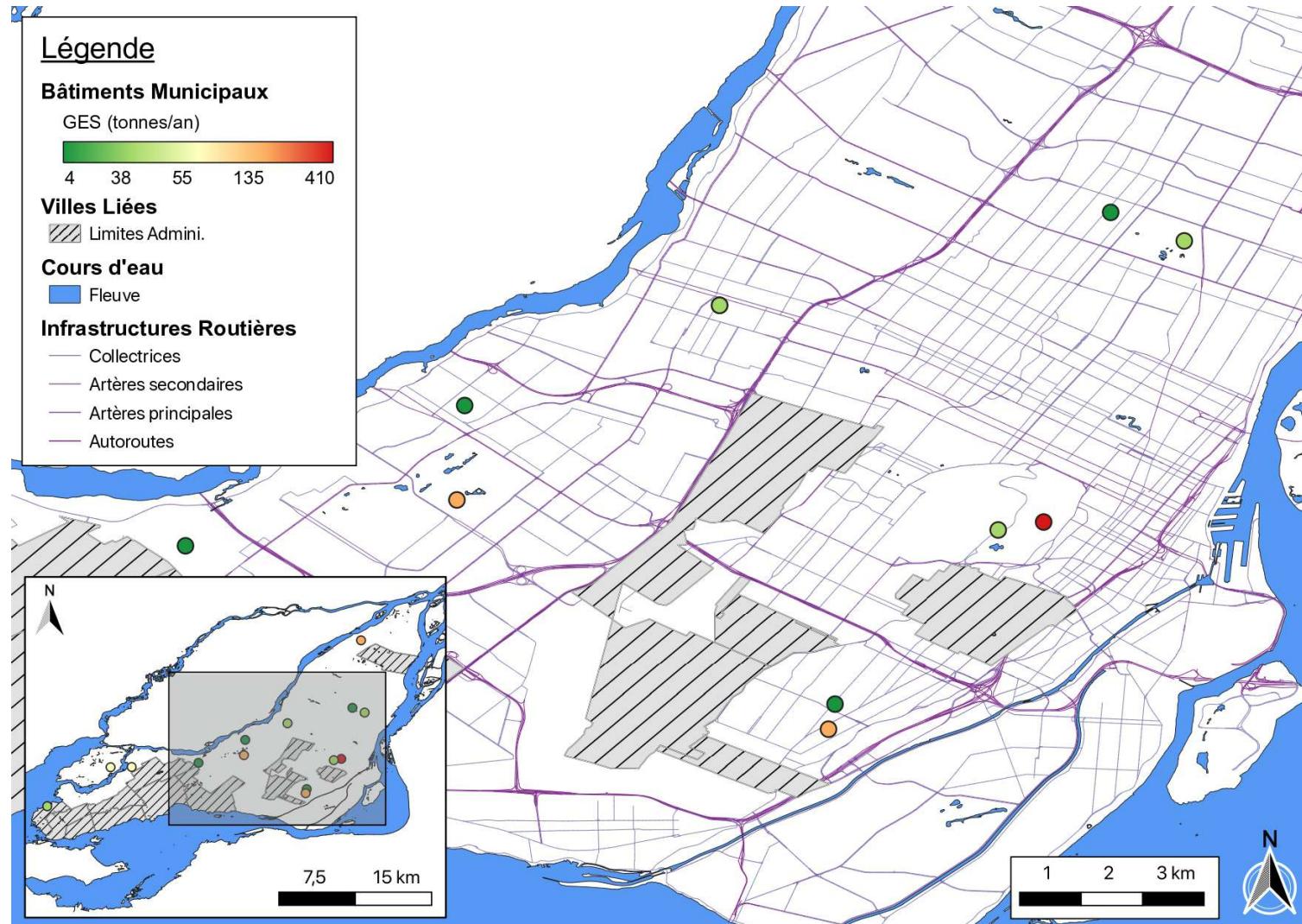


Figure 4.2 Localisation des 15 bâtiments de la Ville de Montréal ayant un système thermique carburant partiellement ou complètement à l'aide de mazout ou de gaz propane. Les émissions de GES calculés annuellement pour chacun des bâtiments sont également présentées.

une trop grande complexité de rénovation (inhérent au bon fonctionnement des eaux usées de la ville), tandis que les réseaux locaux possèdent un diamètre inférieur à celui nécessaire pour l'installation de systèmes de récupération énergétique (< 440 mm) (Niewitecka, 2018).

Les deux autres configurations ne sont tout simplement pas adaptées au contexte énergétique ou géographique du projet. En effet, le positionnement de l'EC dans les bâtiments n'est pas suffisamment bénéfique du point de vue énergétique. Cette disposition est généralement adaptée afin de diminuer la charge sur le système primaire et récupérer une faible quantité de chaleur, pour chauffer l'eau chaude par exemple. Cette configuration n'a pas les gains énergétiques nécessaires à une transition complète d'un système thermique vers cette source. De plus, le positionnement de l'EC directement à la station d'épuration n'est également pas une option possible à cause de la situation géographique de la station. En effet, la station Jean-R.-Marcotte est située dans un quartier peu densifié, où aucun bâtiment de la ville n'est présent, ce qui diminue grandement le potentiel de distribution de chaleur. Puisqu'un réseau de chaleur urbain est nécessaire, ce type de réseau nécessite plusieurs bâtiments ancrés sur le réseau afin d'avoir une viabilité énergétique et économique, ce qui n'est pas observé dans le contexte actuel.

Méthodologie

La méthodologie utilisée pour la sélection des bâtiments reliés à la récupération énergétique dans les eaux usées a été effectuée en trois temps. Premièrement, à l'aide des informations géographiques du réseau d'égouts, les conduites ont été triées en fonction de leurs types (intercepteurs, collecteurs ou locaux) et de leurs états (A : aucune intervention ou entretien préventif et B : auscultations requises). En effet, en ciblant les canalisations où une restauration est imminente, il est possible de diminuer les coûts en liant les travaux de restauration aux projets de conversion énergétiques. Une zone tampon de 250 m autour des canalisations identifiées a ensuite été appliquée afin de circonscrire les bâtiments les plus près de la source. Cette valeur est considérée comme la limite de rentabilité économique (Culha et al., 2015). Par la suite, une seconde élimination associée à la situation énergétique des bâtiments a été effectuée : seuls les édifices ayant une puissance supérieure à 150 kW ont été conservés dans l'analyse (Culha et al., 2015).

Finalement, une classification par pointage a été réalisée afin de créer une hiérarchisation du potentiel de conversion. Le pointage inclut notamment les trois paramètres suivants : (1) la proximité de la source (où la limite de 250 m correspond à un pointage nul), (2) la réduction totale des émissions de GES (fonction de la consommation énergétique des bâtiments) et (3) la condition des canalisations. Accessoirement, les deux paramètres suivants ont également

été utilisés dans le calcul : (4) si la longueur de canalisations disponibles est supérieure ou égale à 70% de la puissance nécessaire au bâtiment et (5) si la longueur de canalisations à rénover est supérieure ou égale à la longueur calculée de l'EC. Ces deux paramètres utilisent un seuil, où 100% du pointage est accordé lorsque le critère est rencontré, toutefois, une quantité considérable d'informations était manquante. Afin de ne pas excessivement pénaliser les bâtiments où ces données sont absentes, la pondération de ces deux paramètres a été diminuée. Le pointage est construit à l'aide d'une matrice décisionnelle (tableau 4.2) et celui-ci permet d'identifier les bâtiments du parc urbain les plus favorables. Le calcul est réalisé par une somme pondérée des valeurs continues, où le pointage maximal théorique est de 100.

Tableau 4.2 Pondérations des paramètres utilisées pour la classification par pointage du potentiel de la récupération énergétique dans les eaux usées

Paramètres	Unités	Pond. [%]
Proximité de la source	[m]	50,0
Diminution GES	[kg CO ₂ eq/an]	30,0
Conditions canalisations (A ou B)	[-]	15,0
Longueur canalisations > 70% puissance	[m]	2,5
Longueur à réparer > longueur EC planifié	[m]	2,5

4.3.2 Sélection des configurations de récupération dans les réseaux de transports souterrains

La principale difficulté de ce type de récupération énergétique concerne sa faible capacité à être mise en oeuvre sur les ouvrages existants, ce qui élimine le tracé actuel du métro dans la municipalité. Cependant, intégrer un système de récupération énergétique sur le nouveau tronçon de la ligne bleue reste une possibilité. Le tracé de la ligne planifiée circule dans des quartiers fortement densifiés et la probabilité d'avoir plusieurs édifices à proximité est non négligeable. Il est toutefois important de souligner que l'installation de ce type de système ne se réalise généralement pas sur un seul et unique bâtiment. Lorsque liée à un tel type de réseau, la distance entre la source et les usagers joue un rôle mineur sur le coût total, qui est expliqué par le large diamètre des tubulures utilisées (Davies et al., 2019). En outre, l'important coût d'investissement peut être épargné par plusieurs acteurs. Cependant, hors de ce contexte, la question de distance entre la source et les bâtiments est impérative afin d'éviter les pertes énergétiques et de prévenir un surcoût d'installation et d'opération. Ce qui explique que l'intégralité des projets ayant été précédemment réalisés est liée à des réseaux de chaleur urbains. Dans cette éventualité, une analyse comportant plusieurs bâtiments de la ville pourrait être réalisée.

La récupération de la chaleur de la ventilation des tunnels par les postes de ventilation serait une seconde solution viable afin d'alimenter en chaleur les bâtiments de la municipalité. Avec l'accord des autorités responsables (STM), l'installation d'EC sur les conduites de ventilation du tracé actuel du métro pourrait être effectuée. Cependant, les données de localisation concernant les postes de ventilations sur les lignes de métro n'étaient pas disponibles dans le cadre de ce présent projet et il n'était donc pas possible de déterminer l'emplacement spécifique des postes de ventilations sur le réseau. Cette situation rendait l'analyse cartographique particulièrement ardue, surtout en considérant les limitations concernant la distance entre la source et les bâtiments. En cas de présence d'un tel poste de ventilation à proximité d'un bâtiment de la Ville de Montréal, il pourrait néanmoins s'agir d'une technologie à considérer.

Méthodologie

La méthodologie utilisée pour la sélection des bâtiments reliés aux réseaux de transports souterrains est similaire à celle des réseaux d'égouts, mais simplifiée. Une fois le tracé de l'extension de la ligne bleue identifiée, deux zones tampons ont été tracées, correspondant à 150 m et 350 m de la distance du tracé planifié. Ces valeurs sont déterminées en fonction des projets existants dans la littérature, où la première valeur serait idéale (Franzius & Pralle, 2011; Nicholson et al., 2014; Barla et al., 2016) et la seconde serait la limite d'application de la technologie (Davies et al., 2019). Un premier tri a ensuite été réalisé en fonction de la consommation énergétique des bâtiments, où une consommation minimale de 600 MWh/an justifierait l'intégration de récupérateur de chaleur aux revêtements des tunnels du métro (Nicholson et al., 2014). Enfin, une hiérarchisation des bâtiments impliquant les émissions de GES, la consommation énergétique des bâtiments et la proximité de la source permettent d'identifier les bâtiments du parc urbain les plus favorables à une conversion.

4.3.3 Sélection des configurations de récupération dans les eaux de surface

Deux configurations seraient viables pour les conditions hydrographiques de l'île de Montréal : les systèmes indirects par eaux de surfaces avec systèmes en boucle ouverte et les systèmes hybrides. Les autres configurations doivent être éliminées pour deux raisons. Premièrement, les systèmes à refroidissement direct ne prennent en compte que la climatisation des bâtiments, ce qui ne représente qu'une fraction du coût énergétique des bâtiments de la Ville de Montréal. Cette configuration n'est donc pas intéressante du point de vue économique et énergétique. Deuxièmement, le débit élevé de la Rivière-des-Prairies et du Fleuve St-Laurent empêche la possibilité d'installer des systèmes en boucle fermée. Le risque de collision avec des débris étant trop élevé pour ce type de configuration.

Méthodologie

La méthodologie utilisée pour quantifier le potentiel de conversion des bâtiments vers la récupération énergétique depuis les eaux de surfaces est comparable à la méthode des eaux usées. Préalablement, les limites géographiques des principaux cours d'eau ceinturant l'île de Montréal (Rivières-des-Prairies, Fleuve St-Laurent, lac des Deux-Montagnes et Rivières des Outaouais) ont été identifiées. Trois zones tampons ont alors été créées autour de ces limites et les distances déterminées de ces zones sont de 100 m, 300 m et 500 m. La valeur inférieure serait la distance idéale de la rive et la valeur supérieure, la limite maximale. Les mesures utilisées sont plus conservatrices que celles observées dans la littérature, mais les grandeurs et les budgets plus limités des projets visés par la municipalité justifie la diminution de ces paramètres (Eliadis, 2003; Zogg et al., 2008; War, 2011; Mitchell & Spitler, 2013).

Plusieurs régions des zones tampons ont été exclues, dont les territoires correspondant aux milieux naturels protégés et aux milieux humides, afin de préserver et affecter le moins possible les caractéristiques de ces milieux. Les cours d'eau et les plans d'eau artificiels, notamment le canal Lachine, ont aussi été rejetés de l'étude. Ces plans d'eau ont une large fluctuation de débit, notamment lors de la saison hivernale où la majorité d'entre eux est asséchée ou gelée afin d'éviter que les cycles de gel-dégel ne détériorent les installations.

Finalement, une classification par pointage a été réalisée afin de créer une hiérarchisation des bâtiments identifiés. Le pointage implique, à parts égales, les deux paramètres suivants : (1) la proximité à la source (où la limite de 500 m correspond à un pointage nul) et (2) la réduction totale des émissions de GES (fonction de la consommation énergétique des bâtiments). Cependant, une demande énergétique minimum de 1000 MWh/an devrait être mesurée afin d'être économiquement rentable (Ciani, 1978) et une pénalité de 30% sur le pointage obtenu est appliquée si la demande mesurée est inférieure à ce résultat. Le pointage est construit à l'aide d'une matrice décisionnelle et le calcul est réalisé par une somme pondérée des valeurs continues, où le pointage maximal théorique est de 100. Cette matrice permet de quantifier le potentiel des bâtiments du parc immobilier et de classer les plus favorables à une conversion vers la récupération énergétique des eaux de surfaces.

4.3.4 Puits à Colonne Permanente

L'accessibilité à la ressource et le peu d'espace nécessaire à la construction des systèmes PCP facilitent leur implantation dans un contexte d'urbanisation, tel que celui de la Ville de Montréal, et de manière générale, ces systèmes peuvent être facilement déployés sur l'ensemble de l'île. Il est possible que localement une autre technique soit plus adaptée, mais en réponse

aux observations du chapitre 3, les PCP semblent la technologie étudiée la plus appropriée au contexte de la Ville. Cependant, les questionnements entourant ces systèmes concernent les risques d’interférences thermiques et hydrauliques entre les différentes unités géothermiques. Élucider ces questions pourrait être favorable à leurs implantations éventuelles.

Méthodologie

Puisque les PCP peuvent être facilement implantés sur une grande partie de l’île de Montréal, un nombre important d’immeubles gérés par la Ville pourraient accueillir cette technologie. Afin de trier cette quantité de résultats, un système de pointage plus complexe que les précédentes technologies a été créé. Ce pointage est fonction des paramètres intrinsèques à l’implantation des systèmes et permet de quantifier plus précisément le potentiel du parc immobilier.

Préalablement à la classification, certains bâtiments ont d’abord été éliminés en fonction de leur situation géographique, géologique ou énergétique. Les bâtiments situés dans les milieux naturels protégés ou dans les milieux humides ont donc été exclus, ce qui se justifie par la législation plus restrictive concernant les nouveaux aménagements. Les bâtiments localisés sur les formations intrusives du Mont-Royal ont également été écartés, car le roc, ayant une dureté beaucoup plus élevée que les roches sédimentaires, augmente les coûts associés au forage. Sa nature laisse également craindre des problèmes de précipitation de fer et de manganèse. Finalement, les bâtiments dont la demande de pointe en puissance est inférieure à 39,5 kW ont aussi été évincés de la classification, leurs caractéristiques énergétiques étant trop modestes pour justifier une conversion vers les PCP. En effet, afin de simplifier les calculs, tous les puits correspondent à la même profondeur, soit 400 m. Une règle du pouce couramment utilisé dans l’industrie stipule que 10 mètres de forage correspondent approximativement à 1,00 kW de puissance, ce qui équivaut à une puissance de 39,5 kW par forage (considérant qu’une chambre de sédimentation de 5 m à l’extrémité des forages est nécessaire).

En ce qui concerne le calcul du pointage, trois paramètres principaux ont été retenus pour le dimensionnement et le fonctionnement optimal des PCP : (1) la diminution des émissions de GES et le nombre de puits associé (fonction de la demande énergétique des bâtiments afin de répondre à 70% de la pointe énergétique), (2) la conductivité thermique du roc et (3) la conductivité hydraulique du roc. Trois autres paramètres secondaires ont aussi été ajoutés dans le calcul du pointage : (5) l’épaisseur des dépôts meubles (6) la profondeur de la nappe, (7) et la conductivité hydraulique des dépôts meubles. De plus, cinq facteurs entraînent une pénalité sur le pointage calculé. Ainsi, si le bâtiment est positionné sur un ancien dépotoir, une ancienne carrière ou un ancien dépôt de surface, 5% du pointage est

soustrait, qui se justifie par l'augmentation des probabilités associées à une complication du projet (présence de déchets sur le site, législation supplémentaire, etc.). En outre, une pénalité de 30% est attribuée au pointage si l'aire de plancher du bâtiment est égale ou supérieure à 99% de la superficie du lot. Les lots particulièrement exigus sont donc pénalisés, mais permettent de circonscrire les risques thermiques et hydrauliques lors des opérations. Une plus grande superficie du site signifie une diminution de la probabilité de modification thermique ou hydraulique dans le voisinage. De la même façon, une pénalité de 20% est attribuée lorsque l'espace disponible sur le lot est inférieur à l'espace nécessaire pour le nombre de puits calculés, sachant qu'un puits requiert approximativement 100 m² d'espace libre (10 m x 10 m). Une distance conservatrice de 10 m entre chacun des puits doit être respectée afin d'éviter les risques d'interférences entre eux. Enfin, une pénalité de 15% est entraînée lorsque les bâtiments sont situés sur des fondations géologiques composées majoritairement de calcaire (Groupe Trenton, Black River, etc.) ou 10% lorsque les fondations géologiques sont composées de shale (Groupe Utica). Cette pénalité est engendrée afin de tenir compte du potentiel de colmatage associé à la géochimie de ces types d'assises géologique.

Finalement, la présence d'un des deux critères suivants diminue seulement le pointage en cas d'égalité : le bâtiment est situé (1) dans un écoterritoire ou (2) sur un site patrimonial. En effet, tel que mentionné au chapitre 4, la législation sur ces territoires n'empêche pas l'implantation de PCP, mais peut entraîner des complications dans la planification des contraintes supplémentaire pour les travaux. Les valeurs des différentes pondérations des paramètres sont résumées dans le tableau 4.3. Le calcul est réalisé par une somme pondérée des valeurs continues, où le pointage maximal théorique est de 100.

Tableau 4.3 Pondérations des paramètres utilisées dans la classification par pointage du potentiel des systèmes PCP

Paramètres	Unités	Pond. [%]
Diminution GES / Nombre de puits	[kg CO ₂ éq.]	60,0
Conductivité thermique (Roc)	[W/m.K]	20,0
Conductivité hydraulique (Roc)	[m/s]	10,0
Profondeur nappe phréatique	[m]	3,5
Épaisseur (dépôts meubles)	[m]	3,5
Conductivité hydraulique (dépôts meuble)	[m/s]	3,0
Ex-dépotoirs/carrières/dépôts de surface	[‐]	-5,0
Aire bâtiment ≥ 99% superficie du lot	[m ²]	-30,0
Superficie libre < superficie nécessaire aux puits	[m ²]	-20,0
Nature du roc (calcaire)	[‐]	-15,0
Nature du roc (shale)	[‐]	-10,0

CHAPITRE 5 RÉSULTATS - CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE

5.1 Potentiel d'implantation pour la récupération d'énergie dans les eaux usées

Sur l'ensemble des bâtiments, un total de 226 édifices a été identifié dans un rayon de 250 m d'un collecteur d'égouts, soit l'unique type de canalisation du réseau de la municipalité pouvant être converti en EC. De ce nombre, 55 présentent une puissance de pointe supérieure à 150 kW (puissance minimum). Les valeurs de pointage calculées fluctuent entre un minimum de 15,9 et un maximum de 86,9. La moyenne arithmétique est de 54,2, tandis que la médiane est de 51,9. Dix-huit bâtiments offrent un pointage supérieur à 60, signifiant un bon potentiel de conversion vers la technologie. Les Ateliers Municipaux Viau, situés dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, obtiennent le pointage le plus élevé, car sa relative proximité à la source et les fortes possibilités de réduction de GES gonflent son pointage final.

La localisation des 20 bâtiments dont le potentiel de conversion est le plus élevé est présentée à la Fig. 5.1 et leurs spécifications au tableau 5.1. La classification des bâtiments est organisée selon les calculs de pointage. Les résultats pour les autres bâtiments identifiés (37) sont également disponibles au tableau C.1, en annexe C. Pour plus de renseignements concernant les édifices et les territoires répertoriés, il est possible de se référer à l'annexe A. Deux facteurs essentiels ont été écartés du calcul de pointage par l'absence d'informations, soit le débit dans les canalisations et le diamètre de celle-ci. Une recherche exhaustive par les autorités responsables devra être réalisée afin de pallier ce manque d'informations.

La moyenne des GES émis par ces 20 bâtiments est d'approximativement 298 262 kg CO₂eq./an et le maximum par bâtiment est de 995 806 kg CO₂eq./an. En convertissant les 20 bâtiments identifiés, la diminution des émissions de GES serait d'environ 6 662 791 kg CO₂eq./an, soit une réduction de l'équivalent de 97,3% des émissions actuelles de ces bâtiments. Sans surprise, une large quantité des bâtiments identifiés utilisent un système thermique au gaz naturel, à l'électricité ou une combinaison des deux (50 sur 55). Le reste des bâtiments (5 sur 55) utilisent un système thermique auxiliaire à la vapeur. Aucun bâtiment répertorié n'emploie de mazout ou de gaz propane.

Tableau 5.1 Caractéristiques générales et pointages des 20 bâtiments du parc immobilier de la ville de Montréal dont le potentiel d'implantation de la technique de récupération énergétique avec les eaux usées est le plus élevé.

#	Nom Bâtiment	Syst. Thermique Primaire	Syst. Thermique Second.	Distance [m]	Distance [/50]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an]	Réduction GES [/30]	Cond. Canal. [-]	Cond. Canal. [/15]	Long. EC [m]	Long. EC [m]	Long. Canal. [/2.5]	Long. Restau. [m]	Long. Restau. [/2.5]	Point. [/100]
0246	Ateliers Municipaux Viau	Gaz Nat.	Électri.	40,7	41,9	977 032,6	30,0	B	15,0	247,3	359,3	2,5	0,0	0,0	86,9
0575	Centre Patro Le Prévost	Gaz Nat.	Électri.	30,6	43,9	601 037,6	18,5	B	15,0	182,8	272,1	2,5	272,1	2,5	77,3
0105	Édifice du 1500 des Carrières	Gaz Nat.	Électri.	10,5	47,9	421 223,6	12,9	B	15,0	120,5	244,3	2,5	244,3	2,5	75,8
3665	2580 St-Joseph	Électri.	Gaz Nat.	15,4	46,9	206 900,7	6,4	B	15,0	158,5	366,5	2,5	212,8	2,5	68,3
0434	Édifice Dickson	Gaz Nat.	Électri.	55,7	38,9	468 939,5	14,4	B	15,0	118,5	281,7	2,5	137,2	2,5	68,3
0025	Édifice du 200 Bellechasse	Gaz Nat.	Électri.	39,8	42,0	358 278,5	11,0	B	15,0	107,0	171,3	2,5	71,7	1,7	68,0
3238	Caserne No 66	Gaz Nat.	Électri.	16,9	46,6	162 582,6	5,0	B	15,0	53,4	466,1	2,5	209,8	2,5	66,6
0263	Centre Sportif Saint-Charles	Gaz Nat.	Électri.	32,3	43,5	259 896,8	8,0	B	15,0	85,6	154,1	2,5	154,1	2,5	66,5
3685	Centre Opé. Nord et Environnement	Électri.	Gaz Nat.	33,0	43,4	206 481,9	6,3	B	15,0	126,9	400,0	2,5	72,5	1,4	64,7
0152	Centre Commun. N.-D.-G.	Gaz Nat.	Électri.	37,1	42,6	227 881,1	7,0	B	15,0	55,0	121,7	2,5	0,0	0,0	64,6
0183	Centre Rosemont	Gaz Nat.	Électri.	44,1	41,2	262 265,5	8,1	B	15,0	63,1	201,0	2,5	85,8	2,5	64,2
0196	Aréna St-Michel	Électri.	Gaz Nat.	83,9	33,2	496 717,5	15,3	B	15,0	197,9	211,4	1,3	136,1	1,7	63,5
2463	Centre Sportif Petite Bourgogne	Gaz Nat.	Électri.	43,7	41,3	224 848,7	6,9	B	15,0	68,9	232,7	2,5	228,0	2,5	63,2
3679	Quartier Général SPVM	Électri.	Gaz Nat.	25,1	45,0	70 690,7	2,2	B	15,0	163,5	209,1	2,5	17,7	0,3	62,2
0285	Édifice Gaston-Miron	Électri.	Gaz Nat.	31,2	43,8	105 803,0	3,2	B	15,0	46,5	247,8	2,5	206,6	2,5	62,0
0002	Édifice Gosford	Électri.	Vapeur	67,6	36,5	326 821,8	10,0	B	15,0	190,5	253,1	2,5	39,4	0,5	61,5
0091	Chaufferie et Atelier Jardin Botanique	Gaz Nat.	-	47,9	40,4	411 852,4	12,6	A	7,5	79,3	236,4	2,5	0,0	0,0	60,6
0481	Aréna Francis-Bouillon	Électri.	Gaz Nat.	34,0	43,2	67 163,6	2,1	B	15,0	44,7	265,1	2,5	179,8	2,5	60,3
0110	Centre Sportif Père-Marquette	Gaz Nat.	Électri.	79,7	34,1	315 273,4	9,7	B	15,0	116,1	238,4	2,5	23,1	0,5	58,7
0891	Pavillon Lafontaine	Gaz Nat.	Électri.	84,0	33,2	312 833,1	9,6	B	15,0	121,8	247,8	2,5	206,6	2,5	57,8

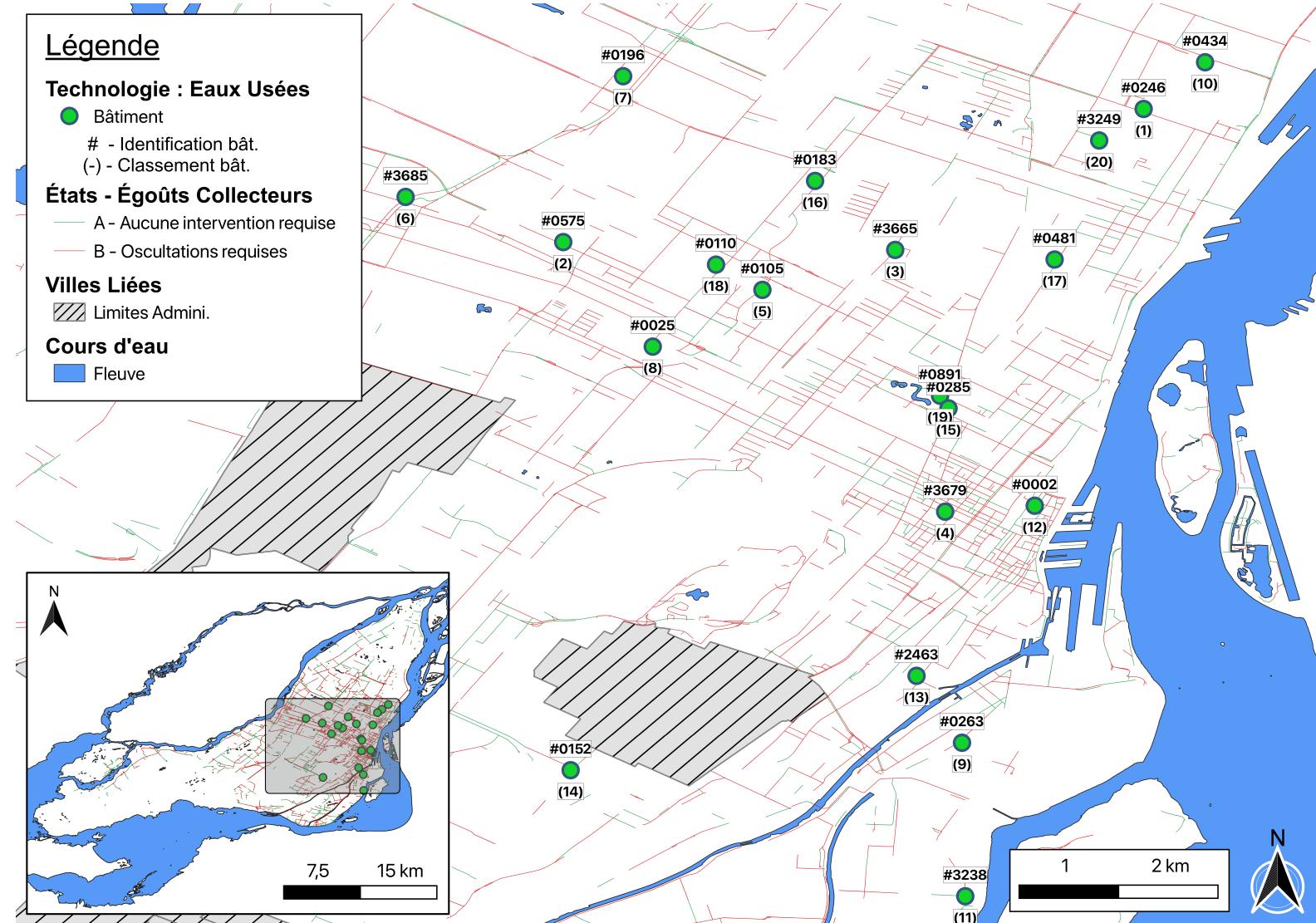


Figure 5.1 Localisation des 20 bâtiments du parc immobilier de la ville de Montréal dont le potentiel d'implantation de la technique de récupération énergétique avec les eaux usées est le plus élevé.

5.2 Potentiel d'implantation de la récupération d'énergie depuis les réseaux de transports souterrains

Peu de résultats sont propices à une conversion potentielle de bâtiments vers la récupération énergétique depuis les réseaux de transports souterrains, puisque le tracé de la nouvelle extension de la ligne bleue influence entièrement les résultats. Trois bâtiments se situeraient dans un rayon de moins de 350 m du tracé, mais un seul démontre une consommation énergétique supérieure à 600 MWh/année, soit la limite énergétique inférieure. En outre, aucun bâtiment n'est situé à l'intérieur de la zone tampon de 150 m du tracé planifié de l'extension de la ligne bleue.

L'unique bâtiment identifié est un poste de quartier du Service de Police de la Ville de Montréal (SPVM) situé dans l'arrondissement Saint-Léonard, nommé Centre Opérationnel (Division Est). À la vue des spécifications énergétiques, ce bâtiment serait un bon candidat pour une conversion vers une énergie moins émettrice de GES. En effet, sa consommation énergétique actuelle provient à 48,0% du gaz naturel et à 52,0% de l'électricité, ce qui représente des émissions totales de 208 503 kg CO₂eq./an. En transformant le système thermique actuel, une diminution de 202 397 kg CO₂eq./an pourrait être observée, soit une réduction de 97,0 % des émissions de GES de ce bâtiment.

L'édifice est établi à environ 230 m du tracé planifié de la ligne, à 235 m de la future station Langelier (nom provisoire) et à 180 m de l'édicule secondaire de cette dernière. En outre, un seul bâtiment est situé entre l'édicule et le bâtiment identifié, simplifiant l'accessibilité à la ressource. La localisation du bâtiment est présentée à la Fig. 5.2 et ses spécifications au tableau 5.2.

Tableau 5.2 Caractéristiques générales du bâtiment identifié pour la conversion vers la récupération énergétique dans les transports souterrains.

# Bât.	Nom Bâtiment	Superf. [m ²]	Électricité [GJ/an]	Gaz Nat. [GJ/an]	Total [GJ/an]	GES Tot. [kgCO ₂ eq./an]	Rédu. GES [kgCO ₂ eq./an]
3687	Centre Op. Division Est	8094,98	4 355,88	4 098,81	8 454,68	208 503,31	202 397,15

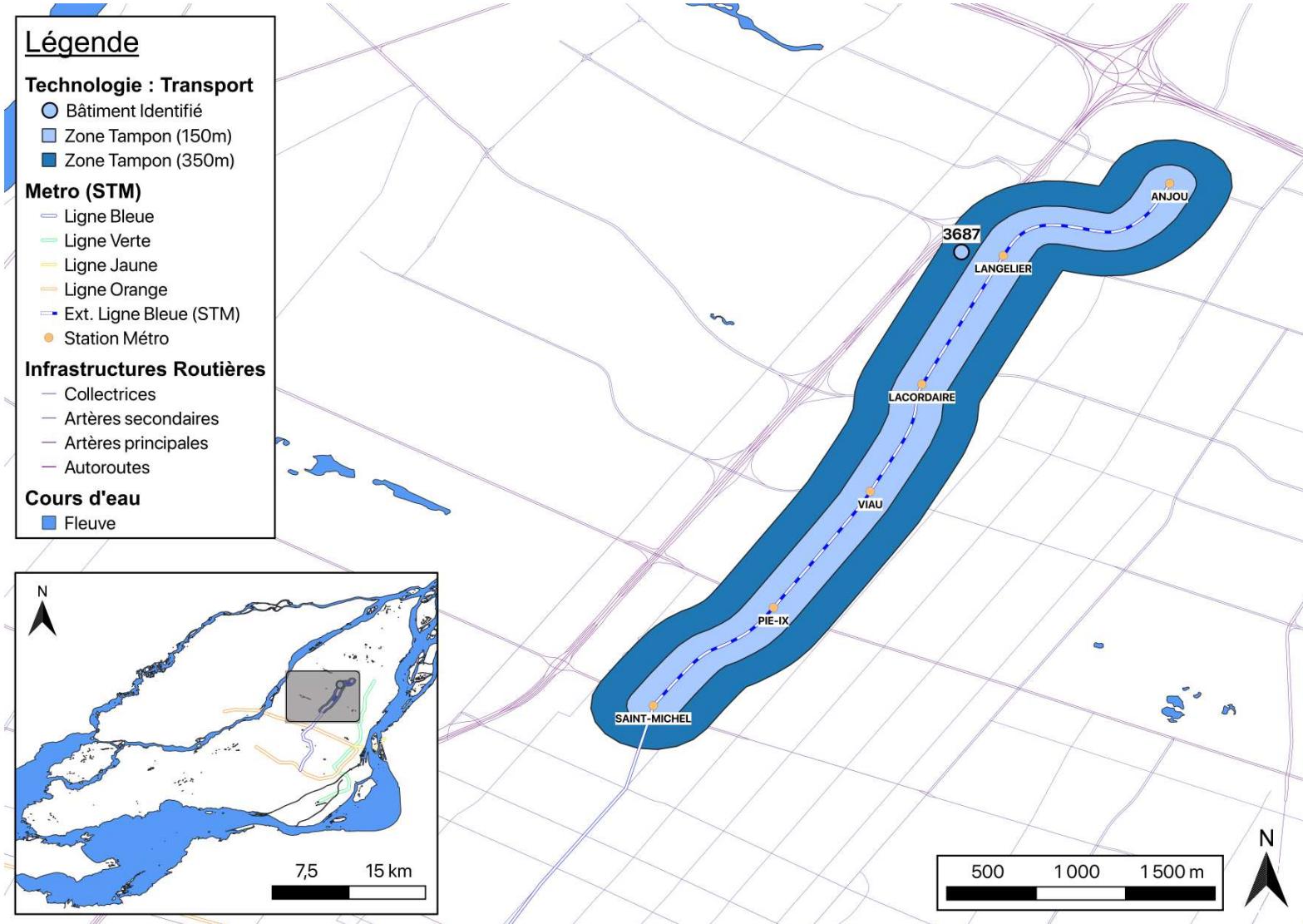


Figure 5.2 Localisation du bâtiment du parc urbain de la ville de Montréal situé dans la zone tampon du tracé planifié de l'extension de la ligne bleue.

5.3 Potentiel d'implantation de la récupération d'énergie depuis les eaux de surface

Un total de 24 bâtiments a été répertorié pour une conversion éventuelle vers la récupération énergétique depuis les eaux de surface. De ces 24 bâtiments, 2 se situent à moins de 100 m de la rive, 11 se situent entre 100 et 300 m et 12 sont localisés entre 300 et 500 m. De plus, 8 des 24 bâtiments satisfont une demande énergétique de 1 000 MWh/an ou plus (3 600 GJ/an). Une grande partie des systèmes thermiques (19 sur 24) recourt actuellement à une combinaison d'électricité et de gaz naturel, tandis qu'un seul bâtiment fonctionne partiellement au propane et 4 utilisent de la vapeur. La moyenne des GES émis par ces bâtiments est d'environ 117 178 kg CO₂eq./an, avec un maximum observé de 534 098 kg CO₂eq./an. De plus, 98,2% des GES proviennent de l'utilisation de combustibles fossiles et 1,8 % du système électrique.

De tous les bâtiments identifiés, le centre communautaire Roussin, situé dans l'arrondissement Rivières-des-Prairies/Pointe-aux-Trembles, est le bâtiment se détachant le plus du groupe. En effet, son pointage de 80 est largement supérieur aux autres valeurs observées, ce qui s'explique par sa faible distance à la source (200 m) et ses larges émissions de GES. Cette valeur de pointage est d'ailleurs considérablement plus élevée que la moyenne arithmétique du groupe, qui est de 25,3, ou de la médiane, qui se situe à 22,3. Par la suite, le classement présente un rapprochement des valeurs calculées puisque 3 bâtiments obtiennent un score entre 40 et 50, 4 bâtiments obtiennent un score entre 30 et 40 et 17 bâtiments se situent sous la barre de 30. Tel que mentionné précédemment, 17 bâtiments ont été pénalisés pour leur consommation énergétique inférieure à la limite théorique de Ciani (1978). Pour plus de renseignements concernant les bâtiments ciblés, il est possible de se référer à l'annexe A.

Dans l'optique où la totalité des 24 bâtiments serait convertie vers ce type de système de récupération de chaleur, la diminution des émissions de GES serait d'environ 2 877 970 kg CO₂eq./an, soit l'équivalent de 96,8% des émissions actuelles. La localisation des bâtiments est présentée à la Fig. 5.2 et leurs spécifications au tableau 5.2. Les bâtiments sont organisés en fonction du pointage calculé.

Tableau 5.3 Caractéristiques générales et pointages des 24 bâtiments de la ville de Montréal avec un potentiel d'implantation de la technique de récupération énergétique depuis les eaux de surface

#	Nom Bâtiment	Syst. Thermique Primaire	Syst. Thermique Second.	Dist. Source [m]	Source [/50]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an]	GES [/50]	Pénal. Demande [MWh/an]	Demande [/30]	Point. [/100]
0868	Centre Roussin	Gaz Nat.	Élect.	200	30,0	521 363,2	50,0	4 897,7	0,0	80,0
0002	Édifice Gosford	Élect.	Vapeur	345	15,5	326 821,8	31,3	5 562,1	0,0	46,8
3238	Caserne No.66	Gaz Nat.	Élect.	200	30,0	162 582,5	15,6	1 560,4	0,0	45,6
0889	Centre Aquat. R-D-P	Gaz Nat.	Élect.	435	6,5	375 662,0	36,0	3 403,3	0,0	42,5
3435	Caserne No.67	Élect.	Gaz Nat.	70	43,0	34 006,0	3,3	408,7	-13,9	32,4
3172	PDQ No.13	Élect.	Gaz Nat.	80	42,0	39 926,9	3,8	475,3	-13,7	32,1
0422	Centre Formation Pompiers	Gaz Nat.	Élect.	375	12,5	201 638,5	19,3	1 695,4	0,0	31,8
0745	Garage (Cour Bercy)	Élect.	Gaz Nat.	290	21,0	108 325,3	10,4	1 297,0	0,0	31,4
0669	Garage (Cour de la Commune)	Élect.	Gaz Nat.	150	35,0	68 975,2	6,6	825,8	-12,5	29,1
0001	Hôtel de Ville de Montréal	Élect.	Vapeur	310	19,0	66 149,0	6,3	3 423,5	0,0	25,3
0012	Édifice Lucien-Saulnier	Élect.	Vapeur	350	15,0	103 536,3	9,9	2 571,1	0,0	24,9
8471	2915-2925 Ste-Catherine	Gaz Nat.	-	285	21,5	121 637,4	11,7	684,3	-9,9	23,2
2996	Caserne No.32	Élect.	Gaz Nat.	190	31,0	9 370,5	0,9	186,9	-9,6	22,3
1078	Piscine Annie-Pelletier	Gaz Nat.	Élect.	475	2,5	194 649,2	18,7	1 976,5	0,0	21,2
3331	Caserne No.66	Gaz Nat.	Élect.	300	20,0	106 716,6	10,2	846,9	-9,1	21,2
0038	Caserne No.35	Gaz Nat.	Élect.	275	22,5	56 062,7	5,4	539,9	-8,4	19,5
0062	Caserne No.13	Gaz Nat.	Élect.	285	21,5	45 932,2	4,4	377,2	-7,8	18,1
0986	Maison de la Culture	Élect.	Gaz Nat.	265	23,5	24 416,6	2,3	756,9	-7,8	18,1
0570	Annexe Édifice Lucien-Saulnier	Élect.	Vapeur	325	17,5	38 756,8	3,7	962,1	-6,4	14,9
3228	Caserne No.57	Élect.	Gaz Nat. + Prop.	335	16,5	40 738,9	3,9	421,6	-6,1	14,3
3169	PDQ No.08 et Centre Curé-Piché	Gaz Nat.	Élect.	345	15,5	44 180,4	4,2	407,9	-5,9	13,8
0528	Aréna René-Masson	Élect.	Gaz Nat.	462	3,8	83 214,9	8,0	1 659,3	0,0	11,8
2995	Caserne No.59	Élect.	Gaz Nat.	470	3,0	35 876,8	3,4	420,2	-1,9	4,5
0879	Bâtiment Prin. (Cour Ville-Marie)	Gaz Nat.	Élect.	470	3,0	30 123,1	2,9	225,7	-1,8	4,1
3330	Caserne No.64	Élect.	Gaz Nat.	480	2,0	37 307,2	3,6	918,5	-1,7	3,9

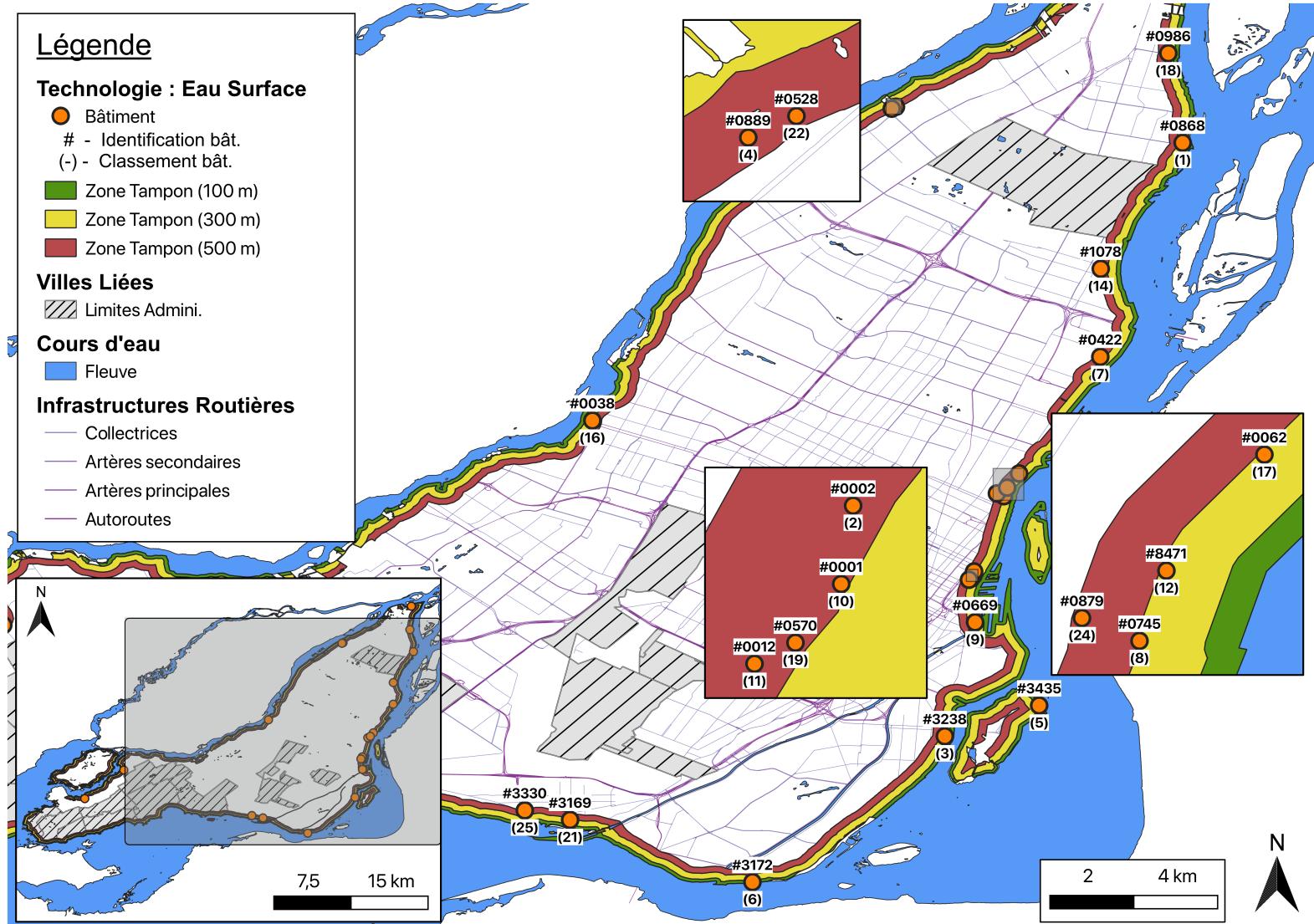


Figure 5.3 Localisation des 24 bâtiments de la ville de Montréal avec un potentiel d'implantation de la technique de récupération énergétique avec les eaux de surface

5.4 Potentiel d'implantation des puits à Colonne Permanente

Suite à la sélection effectuée afin d'éliminer les bâtiments situés en zone humide, dans les milieux naturels protégés ou sur les intrusions montérégienennes, 242 bâtiments ont été identifiés pour être potentiellement convertis vers un système PCP. Sur ce groupe, 175 édifices démontrent une puissance unitaire suffisante (> 40 kW). Les pointages calculés pour ces 175 bâtiments se situent entre un minimum de 13,4 et un maximum de 48,0, avec une moyenne arithmétique de 28,0 et une médiane de 27,4. Le bâtiment se démarquant le plus par son pointage est le Complexe Gadbois, situé dans l'arrondissement du Sud-Ouest. Une fois les pénalités appliquées, 6 bâtiments offrent une valeur supérieure à 40, soit deux écarts-types au-dessus de la moyenne, ce qui représente un bon potentiel de conversion. Cependant, aucun bâtiment ne devrait réellement être exclu sur la base de son pointage et même les bâtiments avec les pointages les plus bas pourraient être de bons candidats à une conversion vers les PCP. En effet, ces bâtiments nécessitent généralement un investissement moindre, grâce aux dimensions plus modestes de leurs systèmes thermiques, et une analyse économique devrait être réalisée avant de les éliminer complètement.

La localisation des 20 bâtiments dont le potentiel est le plus élevé est présentée à la Fig. 5.4 et leurs spécifications au tableau 5.4. À l'instar des précédentes technologies, les bâtiments sont organisés en fonction du pointage calculé et ces résultats sont disponibles à l'annexe C. Les résultats pour les autres bâtiments sont également disponibles au tableau C.2, à l'annexe C. Pour plus de renseignements concernant les édifices et les territoires répertoriés, il est possible de se référer à l'annexe A. La moyenne des GES émis par ces 20 bâtiments est d'environ 344 904 kg CO₂eq./an et le maximum calculé est de 995 806 kg CO₂eq./an. En moyenne, 97,1% des GES proviennent de l'utilisation de combustibles fossiles. En convertissant la totalité de ses 20 bâtiments, la diminution des émissions de GES serait d'environ 6 697 539 kg CO₂eq./an, soit l'équivalent de 96,3% des émissions actuelles.

Tel qu'attendu, la majorité des bâtiments ayant un potentiel élevé utilisent une combinaison de gaz naturel et d'électricité. Sur les 100 bâtiments les plus propices, seuls 5 utilisent un autre type d'énergie (vapeur). Il faut remonter à la 129e position pour observer un bâtiment utilisant du mazout et à la 133e position pour du propane. Autrement dit, les bâtiments employant du gaz naturel ont un potentiel de conversion nettement supérieur aux autres types de systèmes énergétiques actuellement utilisés. Néanmoins, tel que mentionné à la section 4, afin de répondre aux intentions initiales de viser en priorité les systèmes thermiques au mazout et au propane, le tableau 5.5 met également en lumière la classification des bâtiments utilisant du mazout et du propane comme système thermique.

Afin d'évaluer plus précisément le potentiel des PCP en milieu urbain ou dans un contexte fortement densifié, le chapitre 6 s'attardera à l'évaluation de l'influence de l'opération de ces systèmes, plus précisément afin de déterminer les conséquences et les risques d'interférences thermiques et hydrauliques sur un domaine de la Ville de Montréal.

Tableau 5.4 Caractéristiques générales et pointages des 20 bâtiments de la ville de Montréal dont le potentiel de conversion vers les systèmes PCP est le plus élevé

#	Nom Bâtiment	Puiss. Nb. Puits [kW]	Nb. Puits [-]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an]	GES [/60]	C. Therm. Roc [W/m.K]	Roc [/20]	C. Hydra. Roc [m/s]	Roc [/10]	C. Hydra. Dép. [m/s]	Dép. [/3,5]	Épais. Dép. [m]	Dép. [/3,5]	Prof. Nappe [m]	Nappe [/3,0]	Pénal. [-]	Point. [/100]
0154	Complexe Gadbois	826,4	15	574 956,3	47,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	8,0	2,9	21,0	1,6	-8,5	47,95
0450	Aréna Maurice-Richard	616,0	11	291 208,9	30,9	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	10,2	2,6	-5,1	45,49
0868	Centre Roussin	559,1	10	521 363,2	36,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	2,1E-05	1,9	16,0	2,3	12,2	2,4	-4,8	43,48
0575	Centre Patro Le Prévost	609,4	11	601 037,8	40,5	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	2,3E-05	2,2	2,0	3,4	10,5	2,5	-7,2	40,98
0246	Ateliers Municip. Viau	824,3	15	977 032,7	60,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	4,0	3,2	21,0	1,6	-17,4	40,55
0763	Aréna Rodrigue-Gilbert	429,0	8	150 982,7	20,6	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	6,0	3,1	12,2	2,4	-4,5	40,12
0434	Édifice Dickson	395,1	8	468 939,3	30,4	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	13,0	2,5	16,6	2,0	-4,4	39,29
0105	Édifice du 1500 des Carrières	401,8	8	421 223,5	28,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	4,0	3,2	1,8	3,3	-6,6	37,35
2390	Centre Jean-Claude Malépart	286,9	6	201 171,5	18,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	13,0	2,5	5,8	3,0	-4,1	36,59
0891	Pavillon Lafontaine	406,1	8	312 832,9	25,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	16,0	2,3	15,7	2,1	-6,3	35,95
0087	Centre Sportif Pierre-Charbon.	233,6	5	127 909,0	13,9	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	2,1E-05	1,9	9,0	2,8	6,9	2,9	-3,9	35,39
0002	Édifice Gosford	634,9	12	326 821,8	34,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	26,0	1,6	21,0	1,6	-15,1	35,20
0889	Centre Aquat. R-D-P	388,5	7	375 662,0	25,5	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8	2,0	3,4	21,0	1,6	-6,2	34,99
0248	Ateliers Municip. Rouen	230,6	5	268 280,7	18,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	4,0	3,2	21,0	1,6	-3,8	34,13
0110	Centre Sportif Père-Marquette	387,1	7	315 273,6	23,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	9,0	2,8	4,2	3,1	-8,5	34,08
3679	Quartier Général du SPVM	545,1	10	70 690,5	22,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	2,1E-05	1,9	18,0	2,2	6,9	2,9	-14,6	34,06
3031	Caserne No 28	299,6	6	145 819,3	16,5	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8	7,0	3,0	8,1	2,8	-6,0	33,98
0609	Aréna St-Louis	241,2	5	183 379,8	15,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	2,0	3,4	8,4	2,7	-5,9	33,63
2463	Centre Sportif De la Petite-Bourg.	229,7	5	224 848,7	16,9	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	12,0	2,6	21,0	1,6	-3,7	33,59
2621	Centre Sportif Marie-Victorin	260,8	5	138 105,3	14,2	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	2,0	3,4	14,6	2,2	-5,9	33,15

Tableau 5.5 Caractéristiques générales des bâtiments identifiés pour la conversion vers les systèmes PCP avec systèmes thermiques utilisant une source primaire ou auxiliaire au gaz propane ou au mazout

#	Nom Bâtiment	Puiss. Nb. Puits [kW]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an] [/60]	C. Therm. Roc [W/m.K] [/20]	C. Hydra. Roc [m/s] [/10]	C. Hydra. Dép. [m/s] [/3,5]	Épais. Dép. [m] [/3,5]	Prof. Nappe [m] [/3,0]	Pénal. [-]	Point. Class. [/100] [-]								
3051	Caserne No 56	68,2	2	47 583,8	5,5	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	9,8E-06	0,9	6,0	3,1	0,0	3,5	-4,4	25,19	129
0418	Caserne No 44	41,7	1	63 704,3	4,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8	1,0	3,4	19,0	1,8	-4,4	25,01	133
3116	Caserne No 72	53,0	1	59 244,9	3,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	6,0	3,1	11,3	2,5	-4,3	24,58	142
3228	Caserne No 57	48,1	1	40 738,9	3,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	5,0	3,1	14,6	2,2	-4,3	24,39	145
0148	Centre Trenholme	43,2	1	65 351,3	4,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	30,0	1,3	22,5	1,4	-4,1	23,25	157

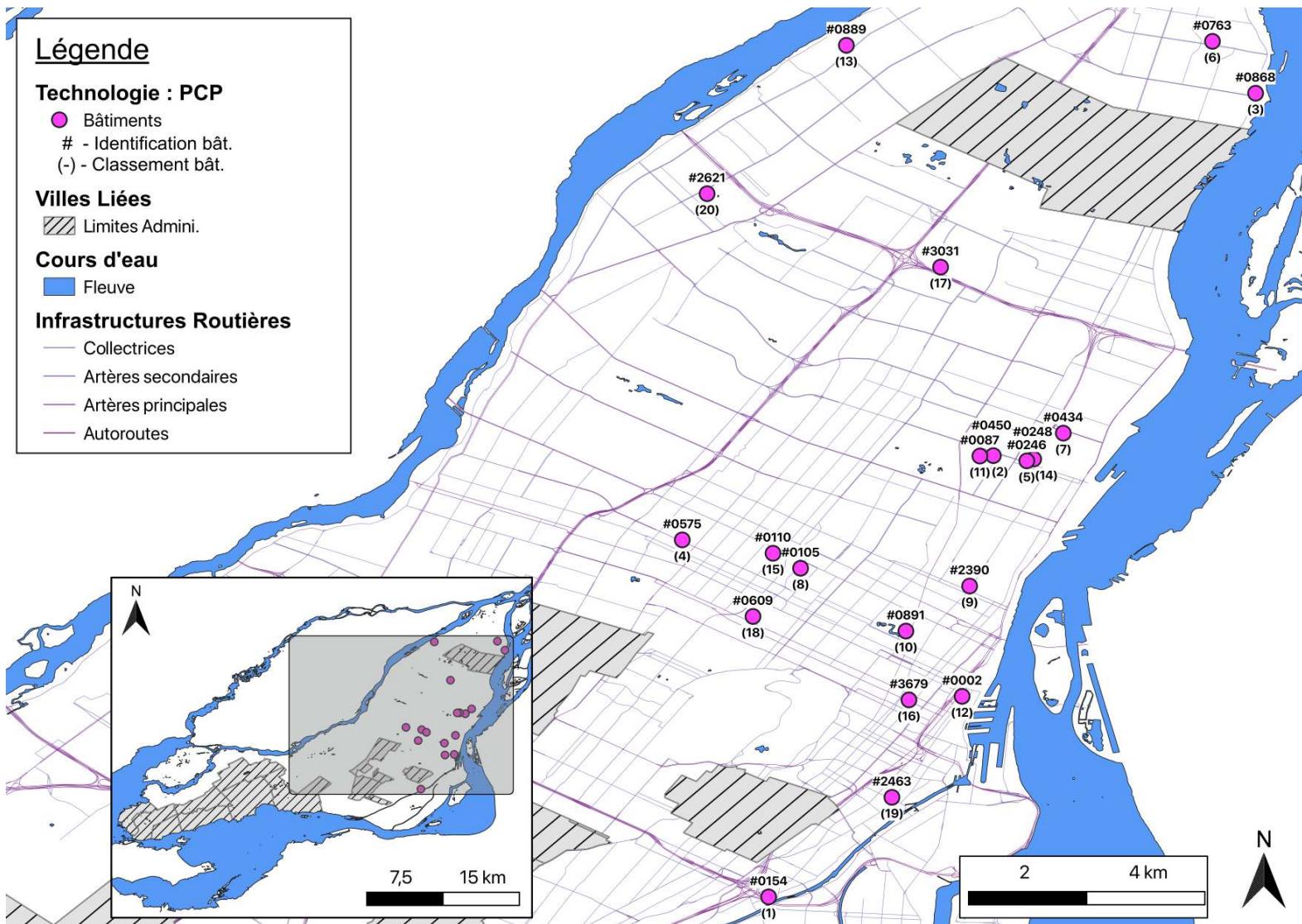


Figure 5.4 Localisation des 20 bâtiments de la ville de Montréal dont le potentiel de conversion vers les systèmes PCP est le plus élevé

**CHAPITRE 6 ARTICLE 1 - INTEGRATION OF STANDING COLUMN
WELLS IN URBAN CONTEXT : A NUMERICAL INVESTIGATION-CASE
OF THE CITY OF MONTREAL**

Vincent Laroche, Philippe Pasquier, Benoît Courcelles

Department of Civil, Geological and Mining Engineering, Polytechnique Montréal, P.O. Box 6079,
Centre-Ville, Montréal, QC, Canada, H3C3A7

Article soumis le 31 mars 2021 à la revue Sustainable Cities and Society.

Abstract

While the use of new technologies with low greenhouse gas emissions are growing quickly, ground source heat pump systems offer net advantages for high-density urban environments. Standing column well, which exploits groundwater as a heat transfer fluid, requires less space and is less expensive than traditional closed-loop ground heat exchangers. However, a lack of information concerning standing column well is observed, especially in terms of interference with neighboring systems and long-term performances. A semi-regional finite element model was thus developed to emulate the thermal and hydraulic behavior of several standing column wells operated in a highly urbanized area of the City of Montreal. Five different institutional, municipal and residential buildings were considered, with a total of 14 standing column wells and 5 injection wells. Numerical simulations indicate that infrastructure, such as buildings and roads, has a greater impact on the ground temperature than standing column wells. Results show the viability of each system over 10 years of dynamic operation without noticeable performance degradation and environmental impacts. Simulation results indicate that thermal modifications in the ground have a wider and greater extent than hydraulic modifications and decreases rapidly with depth. With proper positioning, all modifications can be confined to the property limits where wells are installed. The study demonstrates that the operation of those systems in an urban and densely populated context is viable in short and long term, especially for buildings having small thermal loads.

Keywords :

Standing column well, Shallow geothermal energy, Ground source heat pump, Underground heat island, Thermal and hydraulic interference

6.1 Introduction

As part of the fight against climate changes, the use of new technologies with low greenhouse gas (GHG) emissions are rapidly increasing (Bayer et al., 2012). Since cities have an undeniable impact on global GHG emissions (Lee & Erickson, 2017), especially with regard to buildings (Becchio et al., 2016), many of them have adopted programs and adapted their legislation to encourage new approaches to reduce their levels of emissions (Kauffman et al., 2012). Among those technologies, ground source heat pumps, using heat from geological materials and groundwater, present net advantages for high-density urban environments. In fact, thermal accumulation of large urban centers caused by anthropogenic activities (Rivera et al., 2017) displays great potential for energy recovery from geothermal systems (Rivera et al., 2017; Bayer et al., 2019).

Shallow geothermal systems commonly used are divided into two main categories : closed-loop systems (CLS), which represent the vast majority of installations in Canada (Coalition Canadienne de l'Energie Geothermique, 2012), and open-loop systems (OLS). CLSs employ a heat carrier fluid that moves continuously in a pipe, inside a borehole. By circulating into the loop, the heat carrier fluid exchanges heat with the surrounding ground and groundwater. In a different way, OLS directly uses groundwater as the heat carrier fluid. The water is pumped from an aquifer and usually discharged into an injection well (IW) located downstream of the pumping well. Nevertheless, these two methods have some drawbacks which can limit their implementation in dense urban centers. For instance, due to a lower thermal efficiency of CLSs, several boreholes are required to cover the thermal loads of most commercial and institutional buildings. This leads to a significant first cost and the need to have a large surface area for the boreholes, which is not always available in urban environments (Pasquier et al., 2016; Yavuzturk & Chiasson, 2002). On the other hand, while OLSs use less boreholes, they require a highly productive aquifer and are relatively sensitive to chemical, physical and bacterial clogging (Rinck-Pfeiffer et al., 2000).

A third alternative, called standing column well (SCW) (Orio, 1999), uses groundwater as a heat transfer fluid in a deep vertical open well (75-500 m), but re-injects the pumped water into the same well. During peak periods, the pumped water can be discharged into a second borehole, drilled downstream, enhancing thermal exchange by amplifying groundwater flow and thermal advection around the well. This operation, named “bleed”, can reduce boreholes total length by 60% compared to CLS (Orio, 1999). SCWs are therefore less expensive and use smaller footprint than CLS (Pasquier et al., 2016; Yavuzturk & Chiasson, 2002), while limiting the complications related to OLSs. Thus, SCWs have a high potential in urban environments (Pasquier et al., 2016).

Current geothermal installations generally require a design based on the geological, hydrogeological and thermal properties of the soil to guarantee the system's lifetime efficiency and avoid degradation of the resource Alcaraz et al. (2017); Rybach & Eugster (2010). A good design is critical, especially for systems used in cold climates, where the margin between the undisturbed temperature and the fusion temperature of groundwater is thin (Spitler et al., 2002; Beaudry et al., 2019). Extracting or injecting heat can lead to a significant temperature difference around the boreholes (Bayer et al., 2014; Hahnlein et al., 2013), which reduces the heat pump' coefficients of performance (COP), may cause a system to shut down and contribute to economic losses (Law & Dworkin, 2016). Buildings with highly unbalanced thermal loads are particularly at risk, and these consequences can be seen quickly after the operations begin (Law & Dworkin, 2016).

While the concern to elaborate flawless design is continuously being addressed (Rybach & Eugster, 2010), an aspect commonly overlooked involves the interference between actual and future geothermal structures. Since the presence of geothermal systems in the vicinity generates a change in thermal and hydraulic regimes, as illustrated by Fig. 6.1, competition between nearby systems is increased (Bayer et al., 2019; Garcia-Gil et al., 2015). This interference can be caused by neighboring geothermal boreholes but also by other underground structures, such as tunnels in public transport systems (Revesz et al., 2016), and can display the same consequences of a poor design ; loss of durability and efficiency. The long-term yield of geothermal boreholes implies that the design considers the relationship with nearby underground operations.

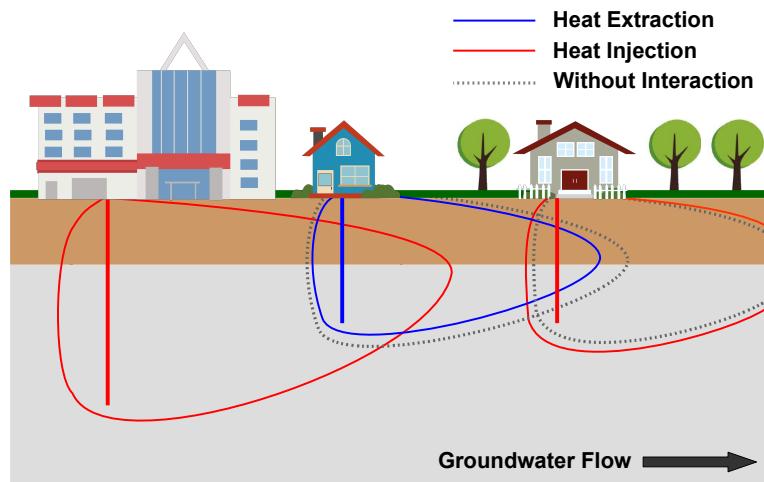


Figure 6.1 Simplified representation of the thermal plume of several neighboring geothermal systems. An interference is observed between the systems, amplified by the groundwater flow, and modifying their plume.

Nevertheless, few studies take into account the neighboring geothermal systems or adjacent underground structures for upcoming systems (Bayer et al., 2014; Rybach & Eugster, 2010). Moreover, hardly any research gives an overview of the evolution of long-term exploitation temperatures when located in a dense urban environment where a lot of infrastructures are erected. Some studies have looked at minimum distances to be respected to avoid any potential interaction (Orio et al., 2005; Garcia-Gil et al., 2015), while others have demonstrated the usefulness of a thermal threshold by defining the radius of thermal influence of contiguous systems, called thermal plume (Attard et al., 2016, 2020; Garcia-Gil et al., 2019). By mapping and placing new installations outside the plume, the risk of interference would be considerably reduced. To determine if these criteria are met, tools using analytical or semi-analytical equations are commonly employed, thanks to their simplicity (Spitler & Bernier, 2016). Yet, these models have a substantial flaw, since they only consider thermal conduction. This assumption is only valid when a low hydraulic gradient is observed and may lead to system oversizing (Blum et al., 2011).

To mitigate these limitations, numerical models are gradually being adopted. Invariably more complete, they allow the simulation of complex physical problems, overcome the disadvantages of analytical models, consider the heterogeneity of the underground aquifer, and provide a more accurate and precise spatial description of the phenomenon of interest (Garcia-Gil et al., 2019; Soltani et al., 2019). Several studies have demonstrated the relevance of these tools with a perspective of interference between geothermal systems (Li et al., 2017; Garcia-Gil et al., 2015; Herbert et al., 2013; Choi et al., 2018), while other authors have specifically worked on the development of numerical models emulating a single SCW (Beaudry et al., 2019; Nguyen et al., 2015, 2017; Eppner et al., 2017).

However, no work or analysis has been carried out to evaluate the regional effects and potential interference caused by the use of several SCWs in a highly urbanized environment. In that event, a lack of information concerning SCWs is observed, both in terms of interference and long-term performance (Pasquier et al., 2016; Spitler et al., 2002; Rees et al., 2004). The aim of this study is therefore to present and examine the long-term influence of the exploitation of several SCWs on a semi-regional scale, specifically focused on thermal and hydraulic interferences. To estimate and determine the potential impacts of SCW, the present work uses a dynamic simulation from a 3D finite element model, which takes into account five institutional, municipal and residential buildings, for a total of 14 SCWs and 5 IWs. The in-depth analysis is carried out in a burrow of the City of Montreal in Canada, where the municipality has a desire of replacing some outdated thermal systems in their existing buildings (City of Montreal, 2013). As a secondary goal, this study also investigates the impact of urban infrastructure on ground temperatures.

6.2 Case study and site characteristics

With an average atmospheric temperature of 6.2°C and a important thermal amplitude (Canada. Environnement et Changement climatique, 2011), the City of Montreal is dealing with high buildings energy consumption, both in heating and cooling, inducing significant GHG emissions and economic expenses. In this context, the municipality has previously targeted buildings to convert their thermal system to ground-coupled heat pump system, of which the *Centre Père-Marquette*, a public sports center.

Being located in a densely populated residential area, the building is ideally situated to simulate the thermal and hydraulic influence of SCWs. To reflect the actual conditions on the site, most of the buildings, road infrastructure, vegetation and geology were closely reproduced. Thus, an exhaustive research on geological, hydrogeological and geothermal parameters was carried out and displayed in the following section. As no fieldwork was complete for this paper, all the information used is retrieved from literature.

Four supplemental municipal, institutional and residential buildings were also included in the case study, as they can potentially benefit from a ground-coupled heat pump system and interfere with each other. As shown in Fig. 6.2, in addition to the *Père-Marquette Centre* (A), these supplemental buildings are : a secondary school (B), a church (C), a primary school (D) and a large 8-units residential building (E). The area represented by the numerical model developed in this work has a total surface of 250 000 m² (500 m x 500 m) by 300 m of depth.

6.2.1 Local geological environment

Montreal is located on a complex geological province known as the St. Lawrence Lowlands, which borders both banks of the St. Lawrence River. The sequence essentially mixes diverse types of sedimentary strata, such as sandstone, shale, limestone, dolomite and several mafic intrusions (Globensky, 1987), with a thickness varying between 1500 m and 3000 m (Globensky, 1987). Based on the lithology reported in the literature, the numerical model uses the on-site geological environment seen in Fig. 6.3. It consists of a thick layer of limestone (Trenton and Black River groups), partly covered by two types of unconsolidated deposits, which are an undifferentiated till in the southwest and a sand in the center of the area (de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2020).

An old limestone quarry, backfilled with residential and industrial waste from the late 1940s to the early 1960s, covers a large part of the southwest sector (Ville de Montréal, 2020). The deposits are themselves topped by a general organic fill over the entire territory (Prest & Keyser, 1982; Lepage, 1996). Combined thickness of loose deposits and organic soils fluctuates

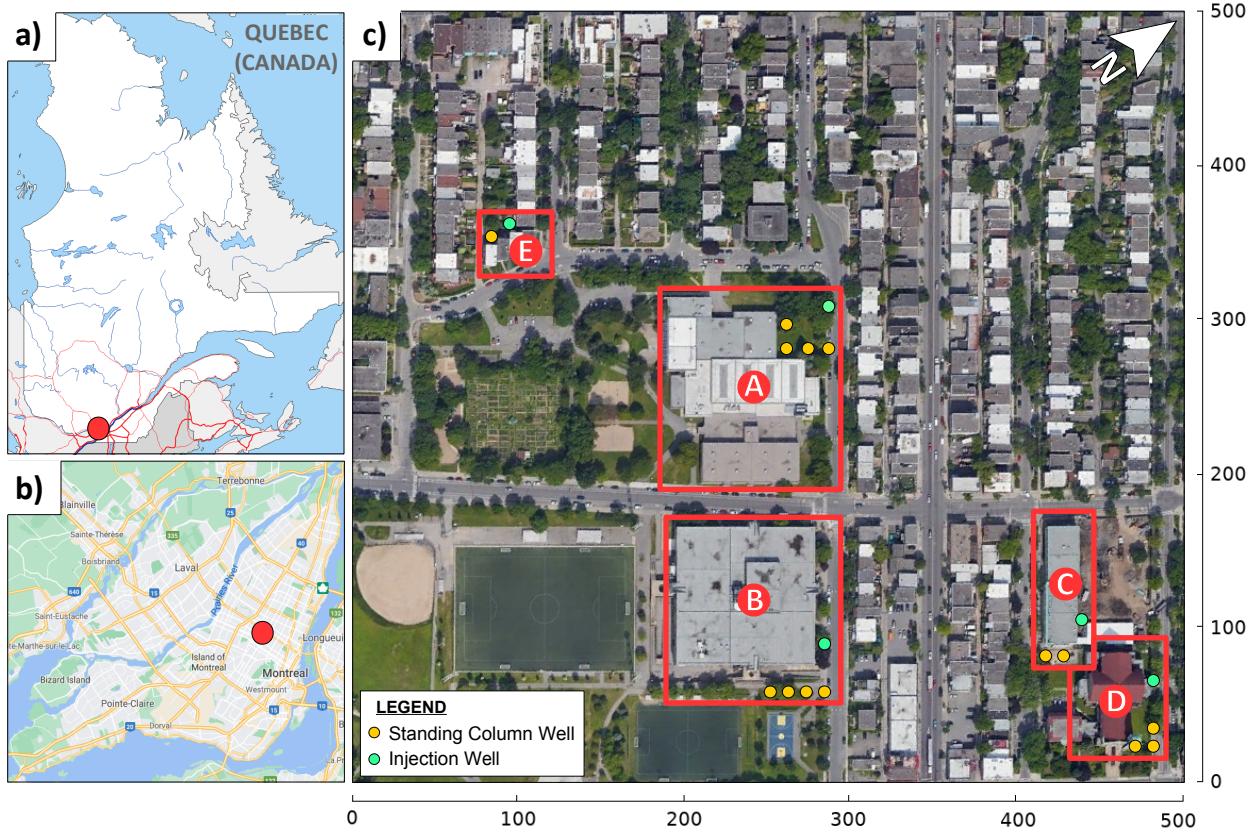


Figure 6.2 Geographical location and delimitation of the study site at a) provincial, b) regional and c) local scale in meters. Site boundaries of Père-Marquette Centre (A), Père-Marquette High School (B), Madeleine-de-Verchères Primary School (C), St-Jean-Berchmans Church (D) and Residential Building (E) are represented with their associated geothermal systems. The number of SCWs and IWs were established in correlation with their thermal load, as seen in Fig. 6.4. Satellite maps are recovered from Google. (n.d.)

between 5 and 15 meters (Prest & Keyser, 1982). In surface, approximately 40% of the study area is occupied by buildings and residences and 40% by road infrastructures. The remaining area is covered by vegetation.

To simplify the geometry, four distinct horizontal layers were represented, each of them using different thicknesses. The first layer, 1.25 m thick, displays the surface strata, which includes building foundations, road infrastructure and vegetation. The second layer represents the organic filling, with a thickness of 1.75 m. The third layer shows the various unconsolidated deposits, with a thickness of 8 m. A last, a fourth plane presents the limestone strata over 289 m. As mentioned previously, the summation of the four strata is 300 m, which is the total depth of the model. Physical properties employed in the model are summarized in Table 6.1 and are considered to be uniform and constant over their entire domain.

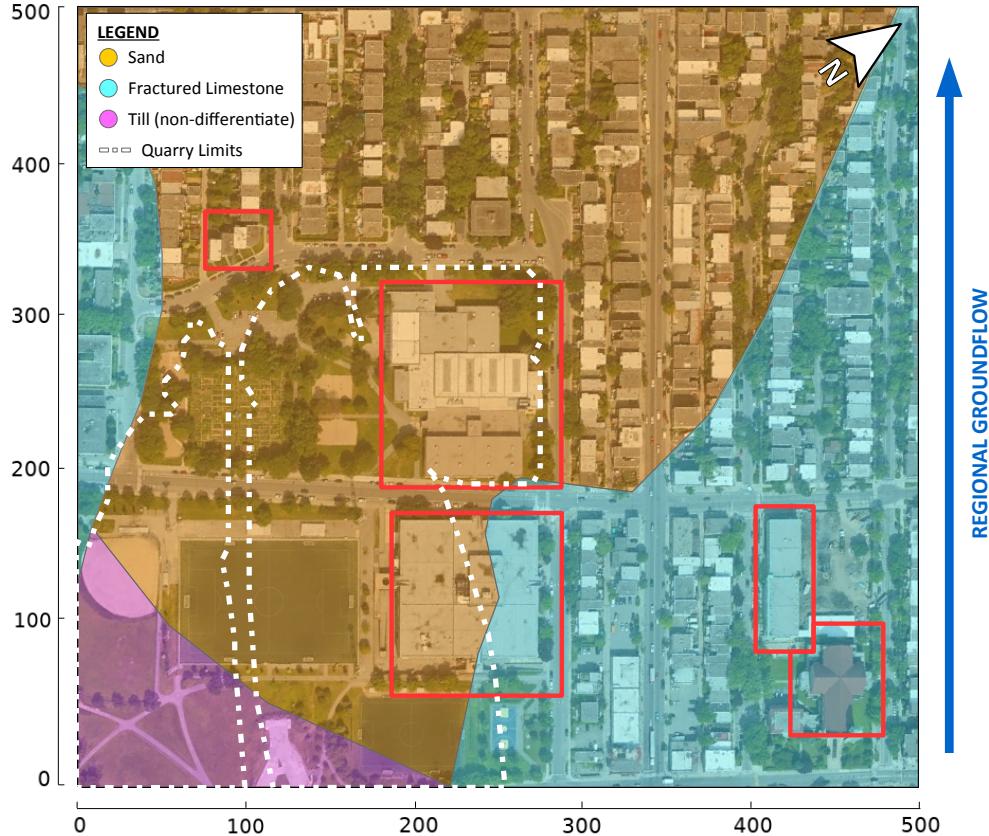


Figure 6.3 Unconsolidated deposits and detailed geology used for the numerical case study. Delimitation of the old quarry is shown with the dotted line. Red boundaries outline the territorial boundaries established in Fig. 6.2 for each of the 5 buildings. Direction of the hydraulic flow is indicated by the blue arrow. Local scale is in meters. Satellite maps are recovered from Google. (n.d.).

6.2.2 Local hydrogeological parameters

Little public information is available regarding the hydrogeological properties on the Island of Montreal. This lack of information is explained by the fact that water exploitation comes from the rivers and lakes surrounding the island (de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2020). Two regional studies show a shallow unconfined water table, between 3 and 5 meters deep, with a radial flow from the center of the island towards the St. Lawrence River and the Prairies River (Lepage, 1996; Bériault & Simard, 1978). The crest separating the two main watersheds is about 100 m South of the area studied, corresponding to a SE-NW groundwater flow (Bériault & Simard, 1978) as shown in Fig 6.3, while hydraulic conditions used in the numerical model correlate to those of Lepage (1996).

Tableau 6.1 Physical properties for the different domains used in the numerical model

Material	Density [kg/m ³]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Porosity [-]	Thermal Conductivity [W/mK]	Heat Capacity [J/(kg °C)]
Organic Soil	1300 ¹	4.80E-5 ²	0.40 ³	0.49 ⁴	1900 ¹
Asphalt	2240 ⁵	5.00E-7 ⁶	0.05 ⁶	1.20 ⁵	921 ⁵
Concrete	2100 ⁵	1.00E-7	0.12 ⁷	1.10 ⁵	950 ⁵
Waste Material	589 ²	8.30E-6 ²	0.40 ⁸	2.45 ^a	2358 ^a
Sand	2080 ⁹	6.10E-5 ²	0.41 ¹⁰	3.34 ⁹	1483 ⁹
Till	2330 ²	2.20E-6 ²	0.30 ¹⁰	3.69 ⁹	1141 ⁹
Limestone	2700 ¹¹	7.00E-6 ²	0.03 ¹¹	2.60 ¹²	852 ¹³
Water	- ^b	1.00E3	-	- ^b	- ^b
HDPE	950 ^c	1.00E-9 ¹⁴	0.00 ^d	0.42 ^c	2300 ^c
Steel	7900 ^c	1.00E-9	0.00 ^d	54.00 ^c	448 ^c

¹ Van Wijk & De Vries (1963) ² Lepage (1996) ³ Caron et al. (2015)⁴ Côté & Konrad (2005) ⁵ Stempunar et al. (2012) ⁶ Vivar & Haddock (2006) ⁷ Kim et al. (2010)⁸ Nastev (1995) ⁹ Hamdhan & Clarke (2010) ¹⁰ Todd & Mays (2004) ¹¹ Tran Ngoc et al. (2014)¹² Bédard et al. (2018) ¹³ Nasr (2016) ¹⁴ Beaudry et al. (2019)^a Waste material thermal properties were estimated using porosity proportion of the till.^b Groundwater density and thermal parameters are function of temperature.^c HDPE and steel pipe specifications, such as the thermal parameters and the density, were obtained from the manufacturer.^d HDPE and steel pipe porosity is set to represent a perfectly impervious solid.

6.2.3 Local geothermal parameters

Various studies have worked specifically on the analysis of thermal conductivity of drilling samples and outcrops of the St. Lawrence Lowlands sequence (Nasr, 2016; Nasr et al., 2018). Bédard et al. (2018) also developed a global cartography of thermal conductivity in St. Lawrence Lowlands. Thermal conductivity and heat capacity of loose deposits (Nasr, 2016; Clauser, 2011; Hamdhan & Clarke, 2010), organic soils (Van Wijk & De Vries, 1963; Herb et al., 2008) and road infrastructure materials (Stempunar et al., 2012) have also been the subject of several works. All of which are presented in Table 6.1.

A Geothermal gradient was measured to 1.62°C/100 m in boreholes located 12 km north of the site (Quebec. Minister of Energy and Natural Resources, 2020), while Beaudry et al. (2019) measured a geothermal gradient of 2.30°C/100 m on a site 20 km southeast of the studied site. Consequently, the geothermal gradient used in this study is 2.00 °C/100 m). At last, a geothermal flux of 0.052 W/m² was used as well and was calculated according to Fourier's law.

6.2.4 Ground heat load

Energy and load demand of each thermal system is essential to simulate the real behavior of SCWs within a given area. Thus, daily energy demand along with building heat and cooling loads were obtained with *SIMEB* (Hydro-Québec, 2013) software using a typical build environment and climate for the city of Montreal. The sizing of each building was shaped from public information available. Total heating, cooling and net annual energy demand for each of the buildings are presented in Table 6.2.

Subsequently, distributions of net ground load over one year are shown in Fig. 6.4, where positive charges represent cooling loads and negative charges represent heating loads. To obtain net ground load, a COP value was added to the simulated building loads, using Eq. 6.1 and Eq. 6.2. To simplify the analysis, a constant COP of 3.0 in heating and 3.6 in cooling was used. Others assumptions have been made, such as the absence of cooling energy in Building D (church), supported by the building age (1939), as well as the fact that schools are considered close during the weekend and the summer period. During that time, thermal loads are close to null, explaining the unusual ground load patterns for systems B and C in Fig 6.4.

$$Q_{GH} = Q_{HP} \left(1 - \frac{1}{COP_H} \right) \quad (6.1)$$

$$Q_{GC} = Q_{HP} \left(1 + \frac{1}{COP_C} \right) \quad (6.2)$$

where Q_{GC} and Q_{GH} are the heat extracted or injected into the ground, Q_{HP} is the building heat or cooling load demand at the heat pump, and where COP_H and COP_C are the heating and cooling performance coefficient of the heat pump. Once the ground loads were determi-

Tableau 6.2 Annual estimate energy required for Père-Marquette Centre (A), Père-Marquette High School (B), Madeleine-de-Verchères Primary School (C), St-Jean-Berchmans Church (D) and Residential Building (E).

Building	Annual Heating Energy [kWh]	Annual Cooling Energy [kWh]	Net Annual Energy [kWh]
A	473 032	235 333	708 365
B	485 944	159 223	645 167
C	232 685	59 419	292 104
D	452 366	0	452 366
E	163 662	28 977	192 639

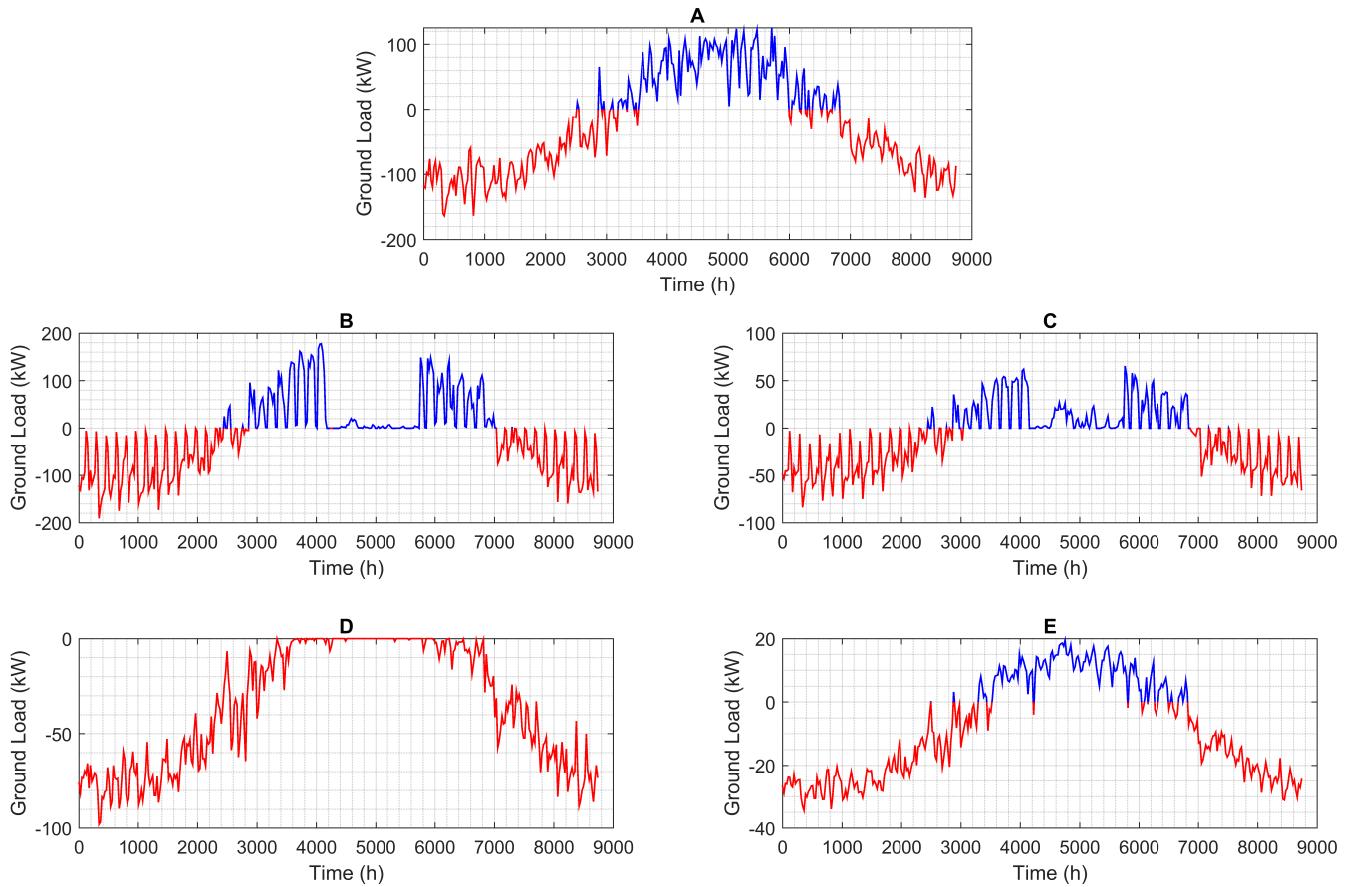


Figure 6.4 Distribution of ground load over an extended period of 1 year for Père-Marquette Centre (A), Père-Marquette High School (B), Madeleine-de-Verchères Primary School (C), St-Jean-Berchmans Church (D) and Residential Building (E). Cooling loads are exposed in blue and heating loads in red.

ned, an appropriate number of wells was defined. As done frequently for hybrid systems, the GHEs were designed to cover at least 80% of the building's heating peak. Using a ground load of 1 kW/10 m of SCW and a depth of 295 m, this leads to a maximum of 29.5 kW per SCW. Total length of the heat exchanger was calculated using the total depth minus five meters at the end of the borehole to allow installation of a sedimentation chamber.

In the end, a total of 14 SCW was used to cover buildings thermal energy demand, namely four (4) wells for system A, four (4) wells for system B, two (2) wells for system C, three (3) wells for system D and one (1) well for system E. Each of the buildings is also associated with one (1) adjacent 150-meter-long IW, returning the pumped water from the bleeding to the original aquifer, for a total of 5 IWs.

6.3 Thermo-hydrogeological numerical model

Using the information presented in the previous section, a 3D finite element model was built to simulate the hydraulic and thermal behavior over an extended period of 10 years. The numerical model couples heat transfer and groundwater flow in the software *Comsol Multiphysics*, which can adequately simulate the conditions observed on the site (Beaudry et al., 2019; Nguyen et al., 2015, 2017; Eppner et al., 2017). Two improvements are brought to these numerical models. First, the simulation domain is represented by a full three-dimensional model instead of an axisymmetric model. This allows quantifying the magnitude of regime changes as a function of 3D coordinates. Secondly, integration of various infrastructures in the numerical model enables the comparison of thermal disparities, and their possible interferences, between SCW and building for instance.

The boundary conditions and part of the geometry of the numerical model can be seen in both Fig. 6.5a and Fig. 6.5b. If there is no boundary specification in the figure, a zero-flow limit has been used. The choice of these boundary conditions is based on the SCW models of Beaudry et al. (2019); Nguyen et al. (2015, 2017) and Eppner et al. (2017), and employs the same successful modeling strategy to represent the fluid circulation within the SCW. For more information on the latter, the reader is invited to refer to Beaudry et al. (2019).

6.3.1 Regional thermal and hydraulic conditions

Hydraulic flow in aquifers was considered as a saturated flow in a porous medium, where equations of continuity and Darcy's law prevail. Both equations are, respectively, represented by Eq. 6.3 and Eq. 6.4, which are function of fluid density (ρ), specific storage (S_s), pressure (p), time (t), vector of Darcy's velocity (\mathbf{u}), temperature-dependent hydraulic conductivity (K), gravitational acceleration (g), and elevation (z).

$$\rho S_s \frac{\partial p}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) \quad (6.3)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{-K}{\rho g}(\nabla p + \rho g) \quad (6.4)$$

As far as thermal conditions are concerned, advective heat transfer mechanism is considered to be predominant, both in the well and in the ground. Natural convection and boundary layer effects between the fluid and the well are neglected (Beaudry et al., 2019). Since advection depends on Darcy's equations (Eq. 6.4), heat transfer equation in the model is given by

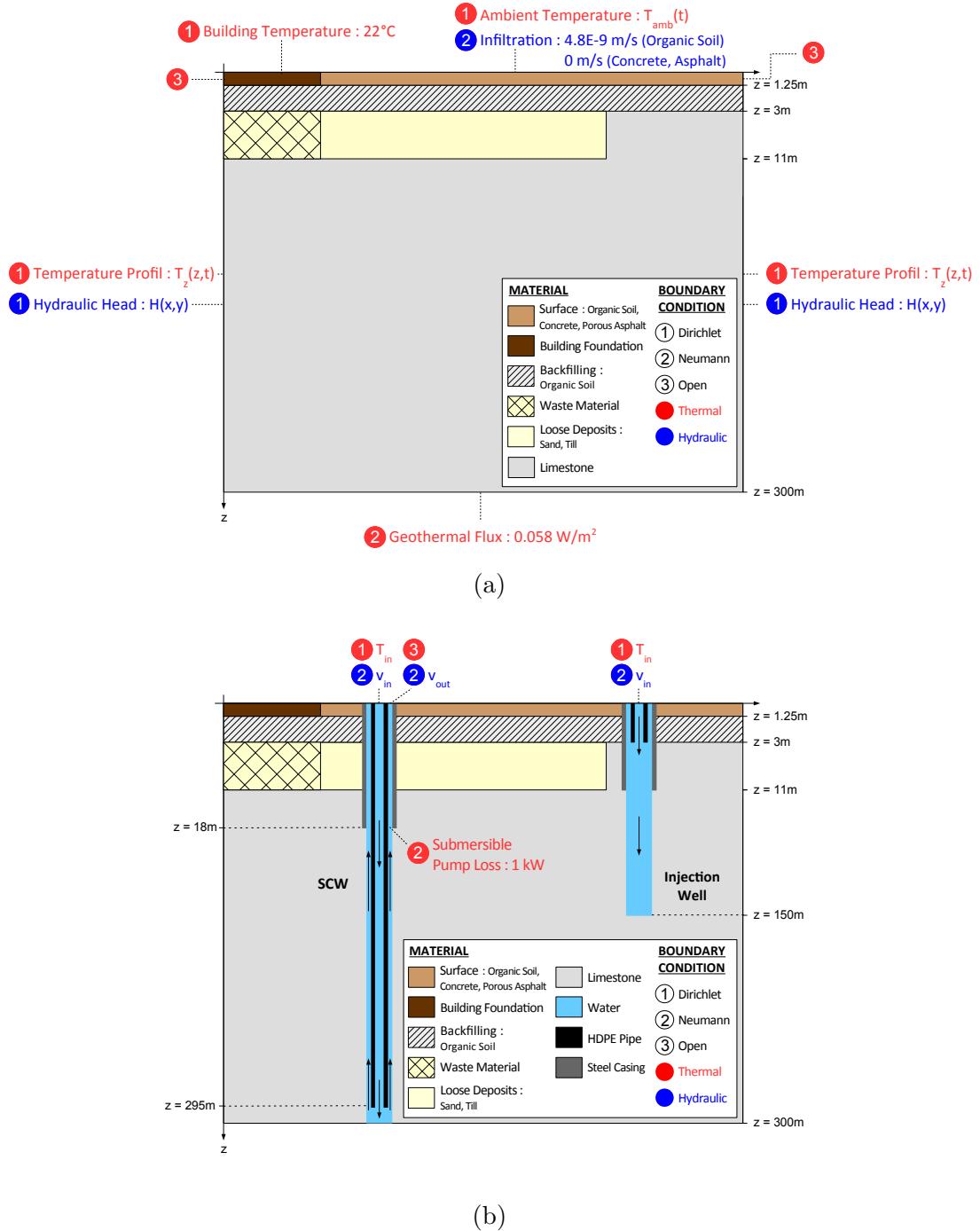


Figure 6.5 (a) Regional thermal and hydraulic conditions applied to the boundaries of the model (not to scale). (b) Regional thermal and hydraulic conditions applied to the boundaries of the model for SCW geothermal systems and IWs (not to scale). Zero-flux boundary condition is applied if not specified.

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_w \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \nabla T) \quad (6.5)$$

where T is the temperature, $(\rho C_p)_{eq}$ is the volumetric heat capacity of the equivalent porous medium, $(\rho C_p)_w$ is the volumetric heat capacity of groundwater and k_{eq} is the thermal conductivity of the equivalent porous medium.

6.3.2 Hydraulic boundary conditions

As seen in Fig. 6.5a, two main conditions govern the regional hydraulic flow : (1) a hydraulic head varying in both x and y on lateral borders and (2) an infiltration boundary on the upper border. Infiltration is assumed to be zero on areas where material is an impervious surface (concrete and asphalt) and 4.8E-9 m/s on pervious surface (organic soil), which correlates to the effective infiltration from Lepage (1996). Flow conditions in the geothermal well, v_{in} and v_{out} , are function of pumping flow (V), cross-sectional area (A_{in} , A_{out}) and bleeding flow (β), as indicated by Eq. 6.6 and Eq. 6.7. Pumping flow is equal to 143.3 L/min and bleeding flows are defined as 35% for building A, 30% for building B and 25% for buildings C, D, E of the pumping flow rerouted to the IW. To speed up calculation time, pumping and bleeding flow are constant over time. These velocity conditions are applied to the upper boundaries of the well, as shown in Fig. 6.5b and given by :

$$v_{in} = \frac{\dot{V}(1 - \beta)}{A_{in}} \quad (6.6)$$

$$v_{out} = \frac{\dot{V}}{A_{out}} \quad (6.7)$$

Furthermore, geometry of modeled SCWs has been modified to a concentric annular space of equivalent cross-sectional area, with a 295-meter long re-injection tube and an 18-meter long pumping tube. The modification of the geometry reduces the amount of mesh elements and accelerates computation time. To validate and optimize the number of elements, calibration of the mesh was performed simulating the data from Beaudry et al. (2019).

6.3.3 Thermal boundary conditions

Five boundary conditions were used for the regional thermal boundary conditions. A temperature profile was applied to lateral borders, where the profile is a function of geothermal gradient (1). A correction for the first 30 meters was made to take account of the seasonal

variations in ambient temperature. The latter, applied to the upper border, derives from meteorological data for the last ten years and varies depending on material of the different domains (2). Temperature of organic soil (Van Wijk & De Vries, 1963), concrete (Ovik et al., 1999) and asphalt (Asefzadeh et al., 2017) are not identical over time and are 5 to 10°C higher than ambient temperature on average with a maximum temperature of 42°C. Average building foundations temperature was assumed to be constant at 22°C (3). An open boundary condition was applied to the first meters of the model, to create a buffer transition between the lateral and top boundary condition (4). Lastly, a geothermal flux of 0.058 W/m² was applied to the lower border of the model (5).

Heat transfer conditions in the well are applied to the top of the injection tube and are induced by the thermal load imposed on the system. The condition follows Eq. 6.8, which is a function of the thermal loads injected or extracted from the ground, Q_g , pumping rate, V , and volumetric heat capacity of the groundwater $(\rho C_p)_w$. These conditions are a function of time and are calculated by the solver at each time step.

$$\Delta T = \frac{Q_g}{V(\rho C_p)_w} \quad (6.8)$$

with

$$T_{in} = T_{out} + \Delta T \quad (6.9)$$

where T_{in} and T_{out} are respectively the inlet and outlet SCW temperature. Three conditions have been established for heat pumps : “heating on”, “cooling on” or “system off”. In “heating on” or “cooling on” mode, the heat pump is activated for heating or cooling and a heat flow for heating/cooling is applied to the boundary. The “system off” mode is activated when the energy demand is zero. Finally, a condition to take into account the heat emitted by the submersible pumps (1 kW) has been established at the limit of the incoming flow, at a depth of 18 m. This condition considers the mechanical energy dissipated in the fluid (Beaudry et al., 2019).

6.3.4 Time dependent analysis and initial conditions

Once the model was built and operational, three stages of studies were subsequently carried out. A first study step used the numerical model without the geothermal systems for a simulation time of 50 years (438 000h) with a large maximum time step, i.e. 1000 h. The 50-year use is related to the age of the district, where most buildings were constructed in the

late 1960s. Regional conditions observed in Fig. 6.5a are the hydraulic and thermal conditions applied in the study. This study step serves as initial conditions for subsequent studies to take account of effects of urbanization over time. Following studies use the final values of the first study as a zero condition. The second study step acts as a blank model, simulating the study site without SCW systems. This step is simulated over a period of 10 years (87 600 h) with a tighter maximum time step, i.e. 24 hours. Regional conditions in Fig. 6.5a are hydraulic and thermal conditions applied in the second study, which are the same as the previous study. The third and final step simulates a scenario case where all SCW and IW are operational. This step consists of a simulation over a period of 10 years (87 600 h) with a maximum time step of 24 hours, identical to the second study. All boundary conditions shown in Fig. 6.5a and Fig. 6.5b are active.

6.4 Results

Some key observations can be drawn from the results simulated with the numerical model and they will be covered in the following sections. Firstly, thermal impacts induced by SCW operation will be discussed in section 6.4.1. Secondly, thermal influence caused by the existing infrastructure and their implications in SCW will be investigated in section 6.4.2. The validation of thermal operation of SCWs will then be verified in section 6.4.3. Finally, evaluation of hydraulics impacts associated to SCW will be examined in section 6.4.4, to better understand the hydraulic ground dynamics.

6.4.1 Thermal impact associated to SCWs

By analyzing temperature as a function of time and depth, one can demonstrate the global thermal evolution in the aquifer and characterize the extent of local thermal changes induced by the operation of SCWs. In that respect, Fig. 6.6 shows simulated ground temperature for periods of 1, 5 and 10 years as a function of three depths, 15, 50 and 200 m.

A quick look at Fig. 6.6 shows the extent of two different thermal zones covering the study site : warmer regions, in red, and colder regions, in blue. Warmer areas characterize the heat loss of various buildings and infrastructure since they are mostly located under their foundations. At a depth of 15 m, an average temperature of 12.4°C that covers more than 70% of the surface is observed. Oppositely, colder areas define soils and surfaces with less anthropogenic impact, such as municipal parks and surrounding vegetation (see Fig. 6.2). They occupy the remaining 30% of the territory at an average temperature between 8°C and 8.3°C.

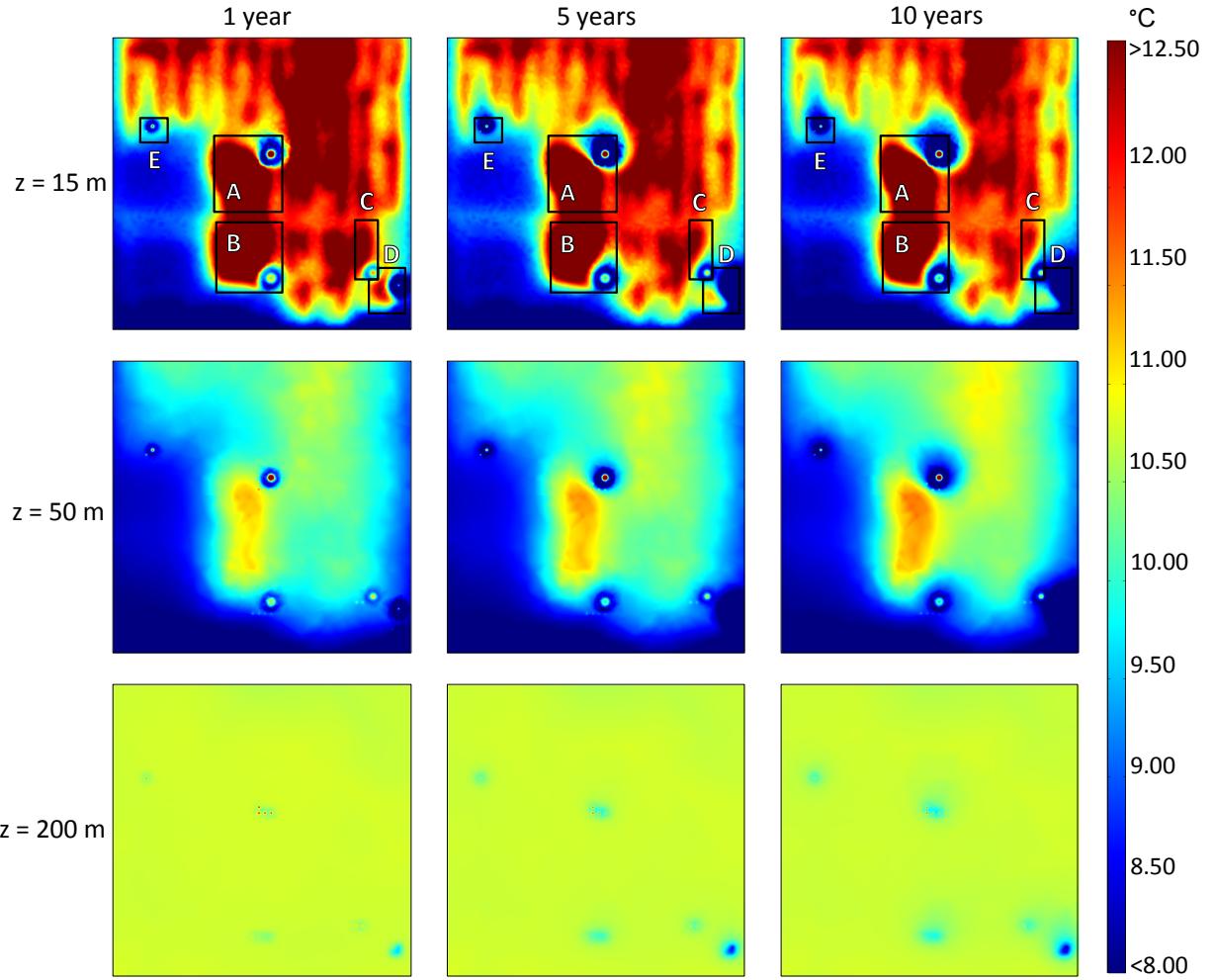


Figure 6.6 Temperature evolution simulated for three different time periods (columns) as a function of three depths (lines). Black boundaries outline the territorial boundaries established in Fig. 6.2 for each of the 5 buildings. The depth of SCWs is 300 m while IW depth is 150 m. Each tile has a size of 500 m × 500 m. Results are recovered in July, when a high cooling demand occurs.

Fig. 6.6 also displays four colder concentric temperature zones, pictured as blue rings. Located within the black boundaries of Buildings site A, B, C and E, they illustrate thermal plumes caused by geothermal operations. The rings are located slightly afar, downstream of the SCWs, and are centered on the IWs, which are depicted as small red dot (warmer temperature). This is due to the fact that results are recovered in July, when a high cooling demand occurs (except for building D) and when warmer water is reinjected into the aquifer. However, as previously observed with Fig. 6.4, the overall energy demand of the buildings is slightly higher in heat extraction, which explains that around each IW, a concentric ring of colder groundwater is observed.

Therefore, at a depth of 15 m, most of the thermal changes generated by SCWs originate from IWs and the latter is causing more thermal alterations than SCWs. More precisely, the re-injection of water pumped from the SCWs during the bleeding process is inducing these thermal changes, as no water is extracted from the IWs. Dimensions of plumes varies depending on the associated buildings. For instance, the plumes associated to buildings A and B are more obvious and apparent, extending over an area of 5740 and 2450 m², respectively, after 10 years. With greater energy needs, they generate greater temperature drops (about 5 to 6°C) on a larger surface. Changes induced by systems C, E are less significant, the decrease being closer to 2°C. As for building D, its thermal plume is not completely displayed, hidden by other thermal disparities.

Thermal modifications are particularly prominent at a depth of 15 m ; however, they reduce considerably with depth. At 50 m below the surface, building heat losses lead to a mean temperature of 10.5°C with a maximum temperature of 11.5°C. Thermal plumes and ring sizes are also shrinking around IWs, their areas reducing from 10% to 50% compared to a depth of 15 m. At a depth of 200 m, building heat losses are simply no longer apparent and only a slight decrease in temperature around geothermal borehole is perceived. Still, at 200 m, there is a noticeable change : a substantial increase in global regional temperature, averaging 10.4°C. It is explained by the combination of the geothermal gradient and the underground heat flux, which warms the ground with depth. Recall that SCWs are 300 m deep. As for thermal plumes, they can no longer be caused by IWs, since they are shallower (150 m). Alterations are now being caused by SCWs explaining the new distribution of plumes, currently distributed over several locations points. Moreover, one can see that the thermal plume induced by the system of building D is now well defined at 200 m, producing the highest temperature drop of the five systems. The explanation lies in the fact that Building D is the only building with no cooling load and the most unbalanced energy demand, causing greater thermal alterations in the area, even if the system is smaller than other systems (A or B).

At last, thermal plumes expand quickly over time, with the expansion from Year 1 to Year 5 being greater than Year 5 to Year 10. At 15 m depth, building A thermal plume expands over 3450 m² between Year 1 and 5, but only 2290 m² over the last five years. Similar observations are also noticed for buildings B, C and D. A rapid progression from the beginning of the operations is observed, but it eventually decreases and reaches a plateau. In contrast, building heat loss remains relatively stable over time and regions contain more or less the same proportion of territory. However, a subtle thermal decrease is noted. At 15 m, global surface temperature reduces from 10.7°C to 10.2°C between Year 1 and 10. Building heat losses slowly mitigate over the years, gradually supplanted by IWs alterations. Although,

some irregularities are exhibited, specifically at 50 m, where thermal disparities from buildings develop roughly at the same rate as IWs thermal plumes. This phenomenon could be attributed to the decreasing thermal effects of geothermal systems with depth, taking longer to compensate building heat losses.

It is worth emphasizing that Fig. 6.6 does not show thermal impact caused by the SCW operation alone, as it combines alterations generated by buildings, roads and other infrastructure elements. To isolate and underline SCW effects, the solutions of two models were subtracted, one using SCW and the other without SCW. Hereof, Fig. 6.7 presents results of temperature difference at three periods (1, 5 and 10 years) and at three depths (15, 50 and 200 m).

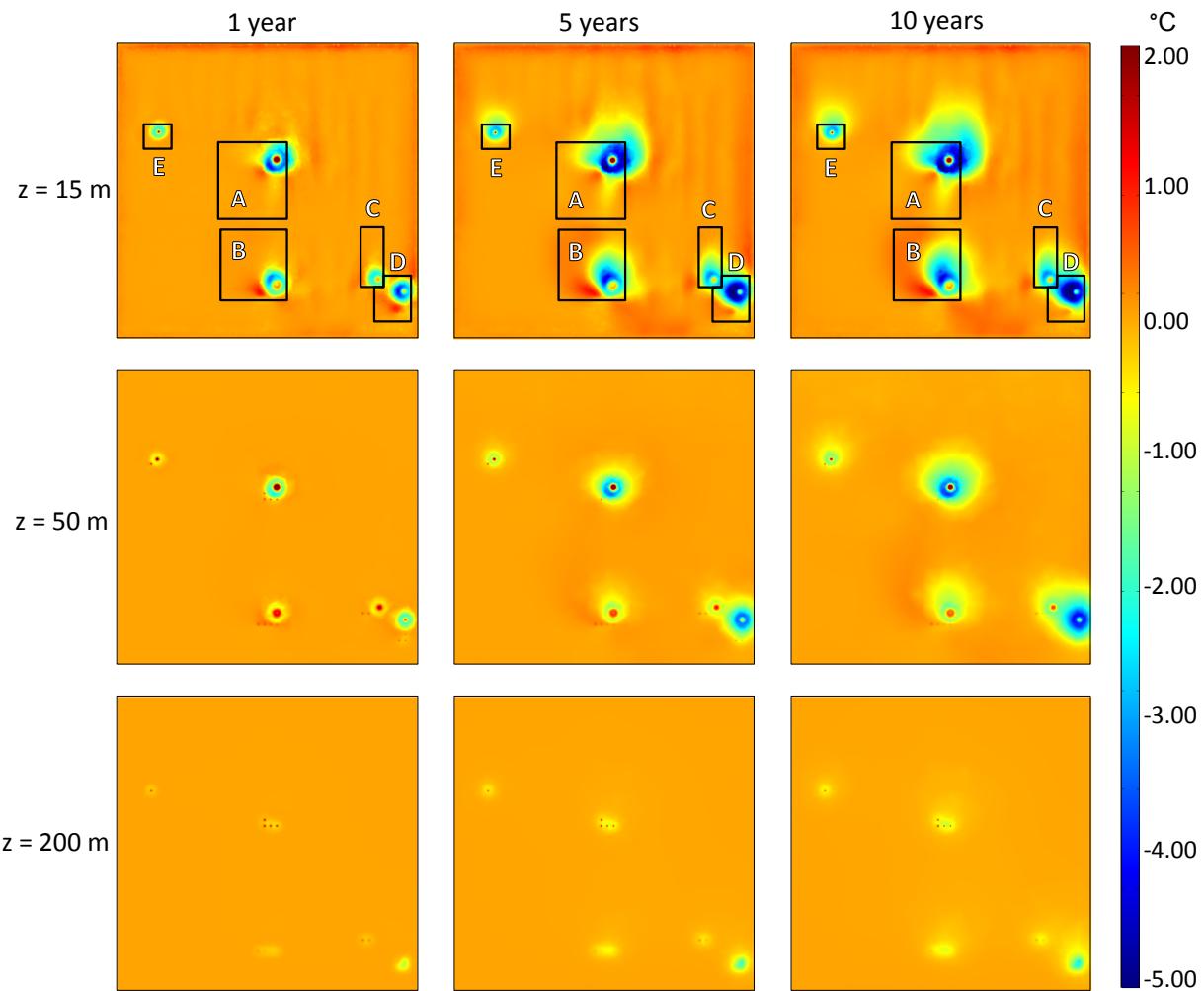


Figure 6.7 Temperature difference between a simulation with and without SCWs, for three different time periods (columns) as a function of three depths (lines). Black boundaries outline the territorial boundaries established in Fig. 6.2 for each of the 5 systems. The depth of SCWs is 300 m while IW depth is 150 m. Each tile has a size of 500 m × 500 m.

At first glance, one can notice the size of the orange zone (i.e. a zero temperature difference). A zero temperature difference is observed when both models (with/without SCWs) have the same temperature at the same time and depth. As Fig. 6.7 was developed to highlight the thermal plumes and remove any other thermal alteration, it was expected to observe most of the area covered with a zero temperature difference. Nonetheless, Fig. 6.7 explicitly shows the evolution of thermal plumes over time in the numerical model. At 15 m, two main temperature reductions are observed, again in a ring-shaped pattern. Gradually expanding over time, it covers a much larger territory at the end of the simulation. In blue, a temperature drop of 5°C is visible, which after 10 years extends over a radius of 30 m for site A, 10 m for site B and 20 m for site D. In light green, a drop of 2°C is observed up to 85 m for site A, 50 m in site B and 30 m in site D. Building sites C and E have less dispersed thermal plumes. Their 5°C reduction areas are negligible and the 2°C radii varies between 10 m to 20 m from boreholes. Moreover, plumes also decrease with depth, as observed previously with Fig. 6.6. At 200 m, the only visible changes are circumscribed around SCWs. One should note that Fig. 6.7 clearly highlights alterations caused by system D at all depths, despite the fact that in Fig. 6.6, systems A and B appeared to be the most prominent situations at 15 m and 50 m.

Thermal plumes shapes corresponds to the direction of the regional flow, namely from the bottom of the figure to the top. The exception concerns system C and D, where thermal interference is seen. This interference could be problematic, leading to an imbalance in the system. Other thermal conflicts are also displayed, where plumes from IWs expand towards SCWs. Cross-interference between IWs and SCWs is precarious due to the low temperature of the pumped water and could cause heat pumps to shut down. To avoid the risk of thermal short-circuiting, two solutions are possible : reduce buildings thermal loads to decrease the size of thermal alterations, or move the wells away to minimize hydraulic interference. It is worth noting that in this work, a minimum distance of 15 m was used between IWs and SCWs, which is considered rather conservative (Orio, 1999), but a larger distance could be profitable.

As land limitations are significant in dense urban areas, confining thermal alterations to their operating territories will greatly reduce the risk of interference with neighboring infrastructure. Results suggest that thermal changes for depths greater than 15 m are mostly contained within the boundary areas of the buildings lots, defined by the black contours. Nevertheless, performing a well positioning could easily constrain thermal modifications, especially near the surface, where it is more problematic. To support that statement, Fig. 6.8 displayed SCW thermal effects in a three-dimensional view after 10 years of dynamic operation. The isotherm displayed difference of temperature between two different models, one with SCWs and one

without. Plumes are cone-shaped and their size modulate in accordance with the heat loads of their respective buildings. Most of the radii remains contained within the territory of the buildings site, as observed previously in Fig. 6.7. Systems B, C and E only slightly affect the temperature field, while systems A and D stand out widely. Fig. 6.8b and 6.8c shows that both systems exceed their territorial limits (in red), by about 50 m and 20 m, respectively. However, their thermal plumes only transcend territorial boundaries at a shallow depth, i.e. in the first 15 meters. With greater depth, the plume shrink and is enclosed to the vicinity of boreholes and respect boundaries.

It is worth noting that temperature differences are still linked to the IWs location. No cone extends more than half the depth of the domain (150 m), which corresponds to the total length of the IWs. These observations confirm the previous conclusion that most of the thermal influence comes from IWs. In comparison, thermal changes coming from IWs are also shown in Fig. 6.8b and 6.8c. Their influence radii are less than 10 m and is limited to the first few meters from the surface. Recall that thermal plumes are centered on warmer areas due to the fact that results are recovered in July. Moreover, to prevent thermal interference or thermal contamination, relocating systems, and more specifically IWs, could be easy and would minimize thermal alterations. Consideration for forthcoming structures in the vicinity is crucial to ensure sustainability of the ground thermal capacity.

6.4.2 Building thermal impacts

The second area of investigation of the present work is related to thermal impacts induced by infrastructure on the study site. While we already know that urbanization modifies thermal conditions of underground regime (Bayer et al., 2019), their effects on the operation of SCWs are still unclear. Fig. 6.6 showed earlier that thermal impacts caused by buildings have bigger and wider extent than those from SCW, significantly affecting most of the territory. Unlike geothermal systems, that generate a reduction in overall ground temperature, an increase up to 6°C on subsurface temperature is observed due to the heat loss of the buildings basement.

6.4.3 SCWs operation temperature

Validating the good operation of the heat pumps is essential to ensure occupants thermal comfort and low operation costs. In this context, Fig. 6.9 presents the temperature at the inlet and outlet of an intermediate heat exchanger which are, for simplicity, assumed equal to the heat pump entering water temperature (EWT) and leaving water temperature (LWT). Note that difference between LWT and EWT agrees with calculation of Eq. 6.5, where the lowest temperature in a year corresponds to the greatest demand in heating and vice versa.

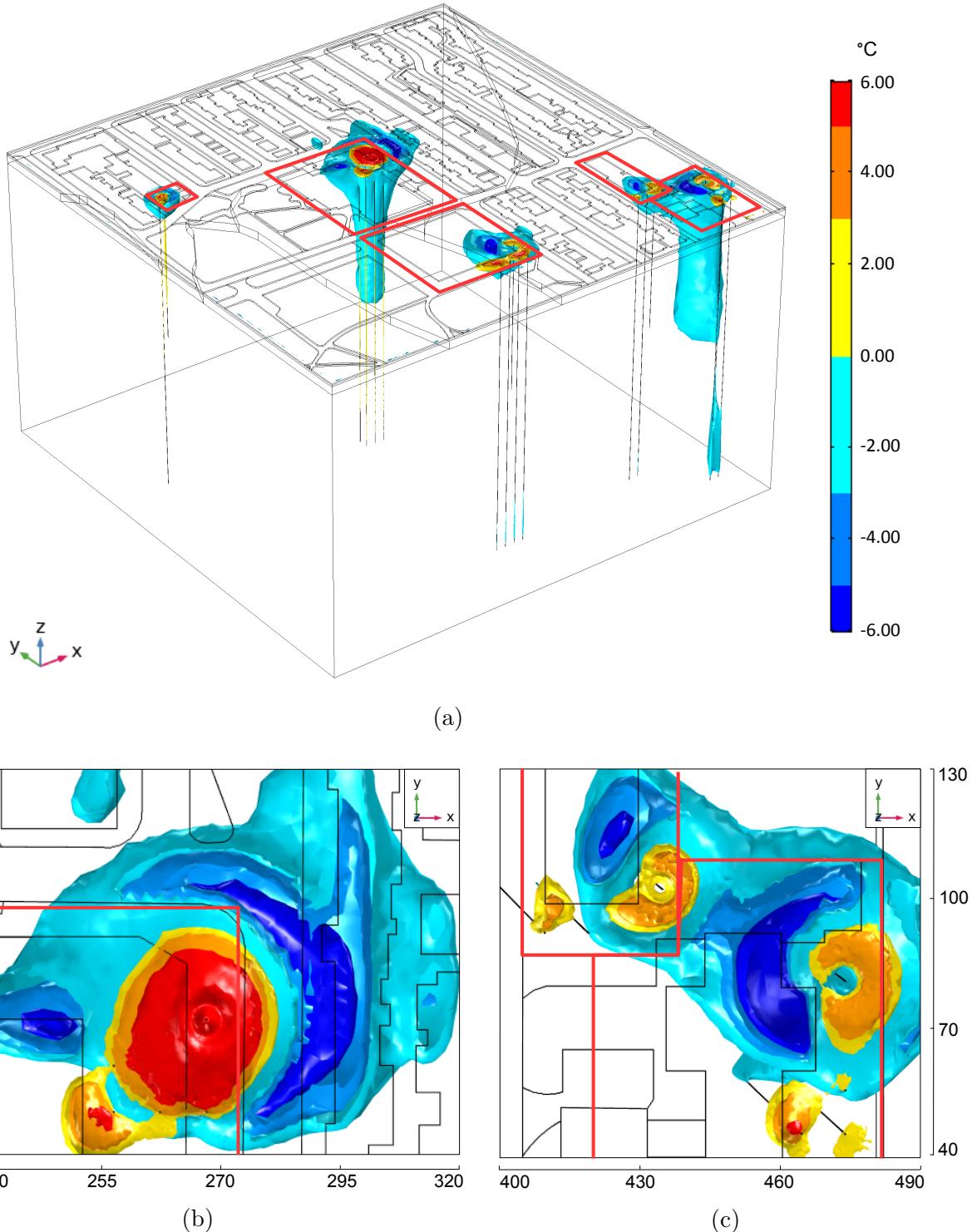


Figure 6.8 (a) Three-dimensional visualization of temperature difference between a simulation with and without SCWs. Results are presented for a simulation time of 10 years. The two lower figures present a closed caption of (b) building A and (c) buildings D and E. Local scale is in meters.

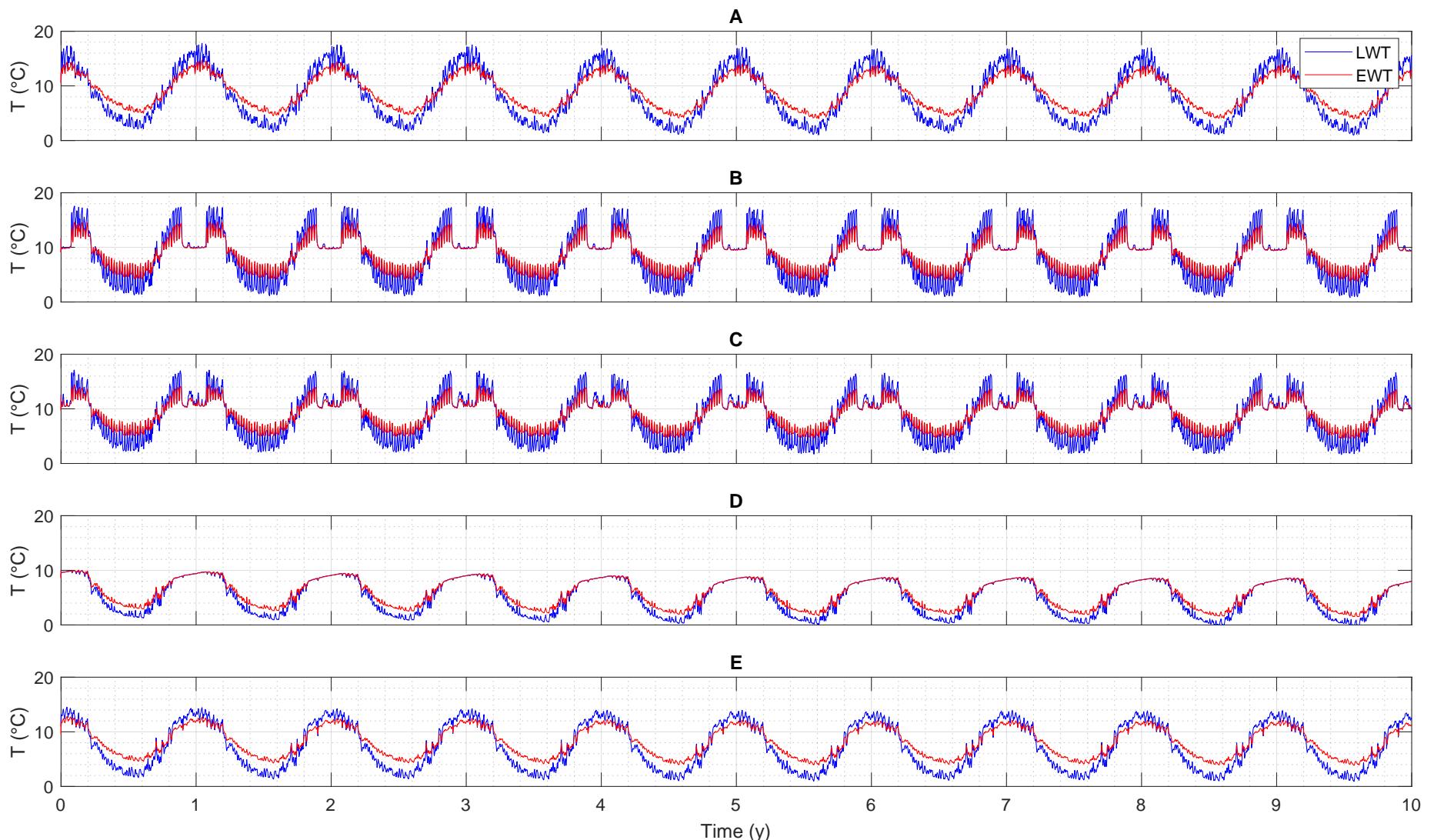


Figure 6.9 Monitored inlet and outlet temperature for Père-Marquette Centre (A), Père-Marquette High School (B), Madeleine-de-Verchères Primary School (C), St-Jean-Berchmans Church (D) and Residential Building (E).

Also, recall that simulations were carried out with constant and bleed rates. The bleed stimulates SCWs performance by discharging a fraction of the pumped water, which enhance advective heat transfer around boreholes (Spitler et al., 2002). For the most part, results in Fig. 6.9 shows a slight drop in temperature over time. This is explained by the building's thermal load imbalance, where heating loads are greater than cooling loads (see Fig. 6.4). Fig. 6.9 also confirms the viability of the geothermal systems on a period of 10 years and a proper GHE design. Note, however, that buildings B, C and E show a small temperature drift of 0.44°C, 0.56°C and 0.70°C, respectively. Systems A and D present a more significant thermal drift, with a decrease of 1.19°C and 1.13°C, justified by a higher unbalance thermal demand.

Maximum LWTs never exceed 18°C. This moderate value constraint thermal propagation in surrounding areas. Conversely, minimum temperatures observed are slightly above the operating threshold of 0°C. Lowest LWTs varies between -0.13°C and 1.62°C. Nevertheless, these values have a low potential to compromise the proper operation of the heat pumps, especially if a boiler is used as a backup system. Note however that raising the bleed rate from 25% to 30% has the potential to significantly raise the minimum LWT. Also, increasing cooling loads has the potential to increase the groundwater temperature around the SCWs in summer, boost minimum LWTs, reduce thermal drift and risks of unplanned shutdowns. Nonetheless, values presented in Fig. 6.9 show the potential of SCWs in an urban context and validate their proper operation over a simulation period of 10 years.

6.4.4 SCW hydraulic impacts

Now that regional thermal disparities have been discussed, the next aspect investigated concern hydraulic impacts of SCWs. In this perspective, Fig. 6.10a) displays simulated hydraulic heads. Additionally, Fig. 6.10b) presents difference in hydraulic head between two models, one with and one without SCW systems, to underline hydraulic modifications caused by SCWs operations. Both figures are shown after 10 years of simulation and for depths of 15 m, 50 m and 200 m.

In Fig. 6.10a), one could easily notice the regional hydraulic flow. Higher piezometric values (60.7 m) are shown at the bottom of the model and lower values (58.5 m) at the top, which are correlated with the groundwater flow that runs from the bottom to the top of the figure. At 15 m and 50 m depth, five local disturbances are observed. Situated inside building territories, they correspond to hydraulic modifications caused by the SCWs and IWs. As indicated by the gray horizontal lines, these disturbances induce, at the same time, a local rise and drop in hydraulic head. Rises occur at IWs and drops occur at SCWs. The areas affected are directly

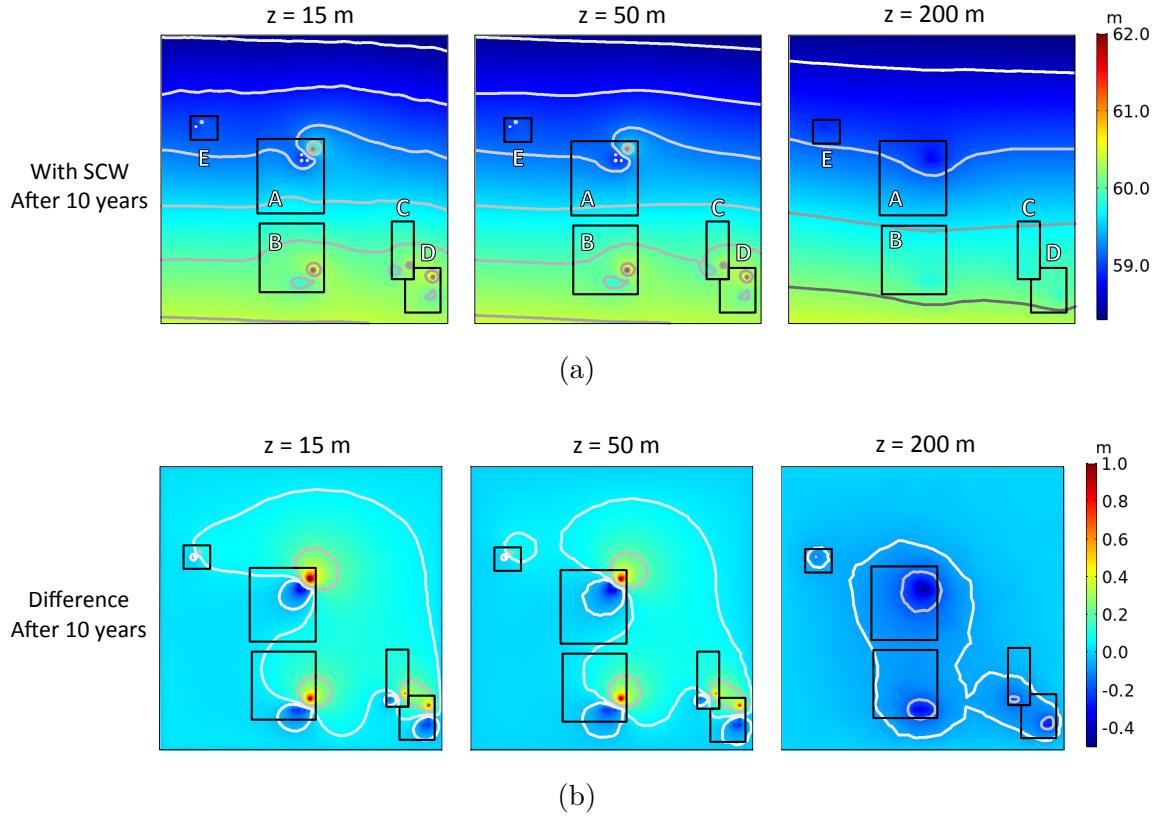


Figure 6.10 (a) Hydraulic head and (b) hydraulic head difference between a model with and without SCWs/IWs. Results are presented for three different depths (columns) for a simulation time of 10 years. Black boundaries correspond to the territorial boundaries established in Fig. 6.2 for each of the five buildings.

proportional to the number of SCWs on each site. Sites A and B have a greater impact on the simulation results, both having four SCWs, when compared to the other three systems. Hydraulic alterations slightly decrease with depth, although, in terms of value and surface coverage modifications, they are about the same at 15 m and 50 m. At 200 m, only a reduction in hydraulic head is observed and is explained by the fact that IWs are shallower (150 m). One could also notice that hydraulic impacts generated by buildings and roads are minimal at every depth.

Fig 6.10b) helps quantifying the hydraulic modifications induce by the wells. Three large hydraulic regions can be distinguished, both at a depth of 15 m and 50 m. In dark blue, a reduction of the hydraulic head of only 0.5 m is seen around the SCWs. In red, an increase from 0.5 m to 1.0 m is observed around IWs. Unsurprisingly, hydraulic alterations decrease with the distance of the wells, where higher hydraulic head are observed closer to IW and inversely to SCW.

In hindsight, hydraulic impact of geothermal systems are relatively low at a regional scale for both SCWs and IWs, a result that corroborates the study of Beaudry et al. (2019). The explanation leads to the basic principle of how SCW works, where extraction and re-injection essentially take place in the same borehole. Since most (65-75%) of the pumped water is returned to the aquifer through the same SCW, only slight hydraulic changes are observed. Alterations are mainly caused by the bleeding operation, where a fraction of the pumped water (25-35%) is discharged in the IWs. This operation results in a small localized change of the piezometric surface.

To complement the previous observations, Fig. 6.11 defines and underlines the hydraulic influence radius in three dimensions. Results are presented after 10 years of dynamic simulation, where colored isotherms illustrate hydraulic head difference between subtracted results from two different models, one with SCW and one without. From Fig. 6.11, one can notice two sets of cones. Greener cones start at the surface and cease at a depth of 150 m. They define hydraulic alterations caused by the IWs due to water injection. Oppositely, bluer cones begin at the base of the models and reduce closer to the surface. The latter shows alterations caused by water withdrawal in the SCWs. As observed in Fig. 6.10, systems A and B generated the greatest radii of influence. The radius goes up to 35 m in the case of building A (Fig. 6.11b) and 25 m with building B (Fig. 6.11c). Both of them would need to be moved to constrain their influence radii in their domain, where a hydraulic drawdown of 0.35 m is observable beyond their respective borders. However, it can be noted that such a value is modest, even insignificant, when assessed on a regional scale. On a final note, regional groundwater flow is also illustrated in Fig. 6.11 where the flow lines clearly illustrate the hydraulic interference between the SCWs and IWs (Fig. 6.11b-6.11d).

At last, the results presented in Fig. 6.10 and Fig. 6.11 suggest that hydraulic alterations induced by geothermal operations are lower at a regional scale than thermal alterations. Although the radii of influence are not narrower, the observed alterations are almost insignificant at a regional scale. Therefore, risks of hydraulic problems caused by operation of SCWs and their companion IWs are deemed low.

6.5 Discussion

From an urban development perspective, it remains important to recall the sizes and dimensions of the different geothermal structures simulated in this work. Four of the five systems are considered to be large-scaled structures supporting broad municipal and institutional buildings. Previous results confirm the viability of these designs in the study area, however, in the event of a large deployment of SCW, it is reasonable to assume that the majority of

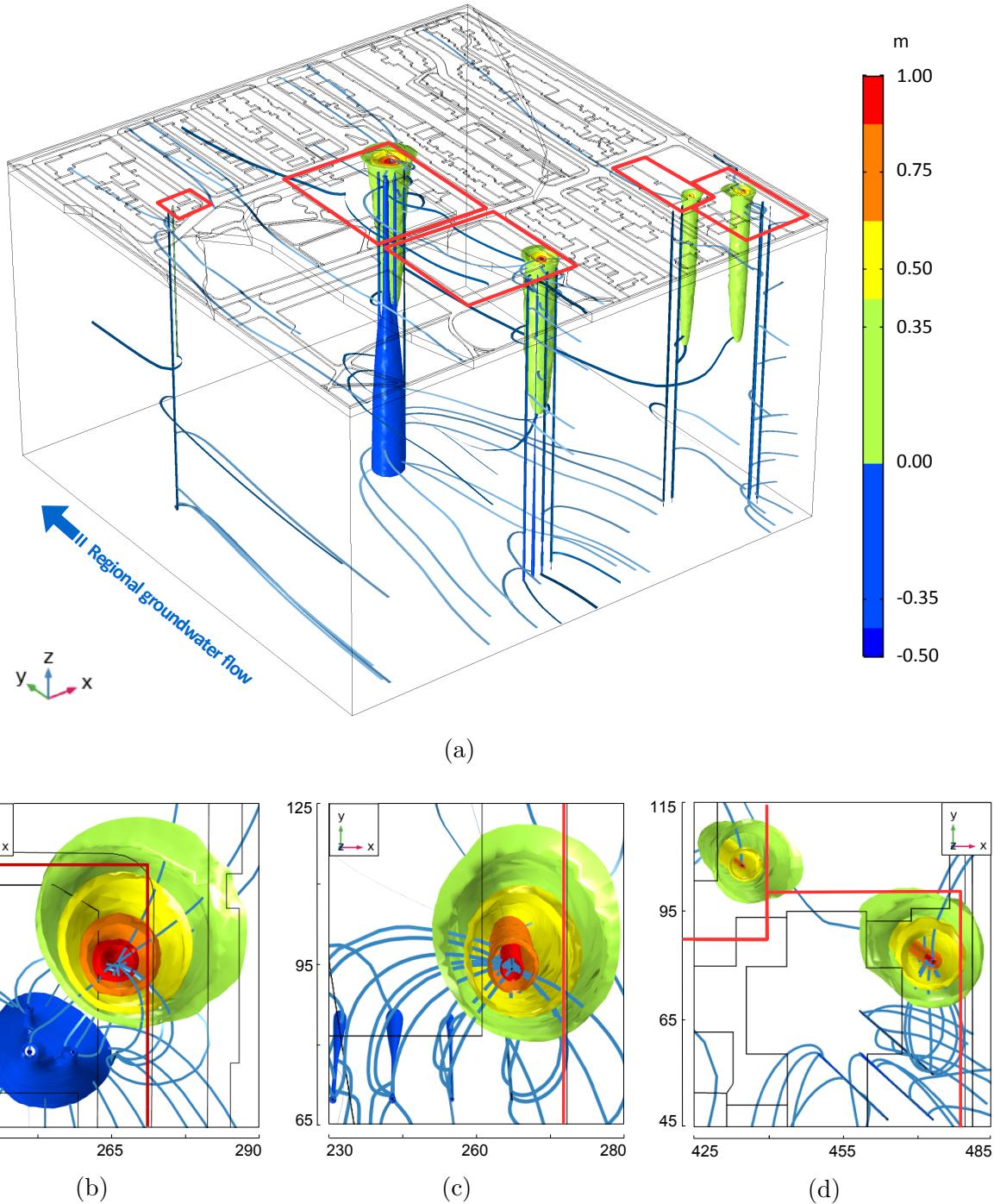


Figure 6.11 Three-dimensional hydraulic head difference between a simulation with and without SCWs. Results are presented after 10 years of simulation. Blue lines represent flow lines while red boundaries display territorials limits. a) Whole simulation domain, b) close view of site A, c) close view of site B, d) close view of sites D and E. Local scale is in meters.

the additional systems would be connected to smaller residential buildings, such as building E. The latter is a typical residential plex-unit with a geothermal system intended to heat about ten apartments. From the previous figures, one can observe that modifications in hydraulic and thermal regimes are minimal for this size of system. The installation of multiple residential systems could be easily carried out in a dense urban context, with the possibility of avoiding hydraulic and thermal interference between geothermal systems.

Managing larger systems requires more consideration, although it is unlikely that a significant number of large buildings will be equipped with SCW in the same vicinity, which greatly reduces the risk of interference (thermal or hydraulic). Nevertheless, it would be optimal to always position systems with consideration to their current interference, but also with consideration for forthcoming structures in the vicinity.

A minimum distance of 15 m between SCW and IWs was employed in this numerical model and it would be cautious to carefully respect this value. In fact, increasing the minimum distance would be justified and appropriate, since thermal interference has been observed between those wells. With this in mind, it could be highly beneficial to carry out the bleeding process with an alternative method since the majority of thermal and hydraulic impacts are generated by IW. Other techniques, such as discharging the extracted water directly into the municipal water system or using it as domestic water, are working properly (Spitler et al., 2002). Those modifications would also decrease the installation costs by reducing the number of boreholes required, and would be satisfactory to favor the potential of SCW structures.

6.6 Conclusion

Operation of standing column wells in a dense and urban environment obviously leads to changes in underground thermal and hydraulic regimes. In this work, a large three-dimensional finite element model was built to simulate thermal and hydraulic changes due to installation of several SCW systems in a borough of the City of Montreal. The model, covering an area of $250,000\text{ m}^2$, has been designed to represent as much urban infrastructure as possible. Operation of five geothermal systems associated to the major institutional buildings of the area was simulated and included a total of 14 SCWs and 5 IWs. Various thermal and hydraulic properties were identified from an exhaustive bibliographic review.

Results obtained indicate that the five systems can be operated over a period of 10 years without noticeable degradation of the SCWs performance. Results also demonstrated that thermal alterations have a wider and greater extend than hydraulic alterations. In both cases, alterations decrease with depth and, with proper positioning, can be confined to the

territorial limits of a given lot. The results also show that risks of interference between different systems are possible, but remain mostly limited. In any case, thermal influence of urbanization, generated by buildings over the years, further impacts ground temperature when compared to SCW. Alterations induced by these infrastructure are considerably broader and larger. At last, the study demonstrates that the operation of SCW systems in an urban and densely populated context is viable in short and long term, where the use of smaller SCW systems, such as residential buildings, results in minimal changes in thermal and hydraulic regimes. Nevertheless, deployment of larger systems must be executed with more care and location of future structures must be carried out carefully.

6.7 Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Service de la gestion et de la planification immobilière de la Ville de Montréal for their financial support during the development of this research.

CHAPITRE 7 DISCUSSION ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

Les travaux de ce mémoire visaient en premier lieu à identifier les sources d'énergie non conventionnelles et leurs potentiels d'implantation dans le parc immobilier de la Ville de Montréal. Pour répondre à cette problématique, une cartographie numérique a été développée. Un modèle numérique a ensuite été développé afin d'examiner l'influence à long terme de l'exploitation des systèmes PCP, en se concentrant sur les influences thermiques et hydrauliques sur les sites voisins. Le présent chapitre discute des résultats complémentaires associés à ces objectifs, dont les limites d'utilisation et les lignes directrices pour des projets pilotes.

7.1 Limite d'utilisation des résultats de la cartographie numérique

Tout d'abord, il est important de souligner que les résultats associés à la cartographie ont été acquis à l'aide des données disponibles et de l'état actuel des connaissances en matière d'évaluation des émissions de GES. Idéalement, l'obtention de nouveaux résultats, de nouvelles données ou l'éventuel développement de meilleures méthodes d'évaluation pourrait conduire à la révision et la réévaluation des valeurs présentées dans ce mémoire. En outre, les valeurs de pondération utilisées pour les calculs des pointages du chapitre 5 ont été établies de façon à représenter le mieux possible l'importance des paramètres des technologies étudiées. Ces critères ont été définis suite à une recherche bibliographique, tels que présentés dans les chapitres précédents. Néanmoins, les notes obtenues pour chacune des technologies doivent être employées avec précaution, puisque celles-ci dépendent du système de pondération retenu. Même si le choix des facteurs de pondération a été justifié par le niveau d'influence des paramètres, peu ou pas de références bibliographiques ne stipulent ou ne permettent de fixer avec exactitude des pondérations associées à des critères de dimensionnement.

Il est donc important de comprendre les limitations associées à l'utilisation de la cartographie numérique ; cet outil ayant été construit spécifiquement pour filtrer et dépister les bâtiments les plus propices à la conversion des quatre technologies étudiées. De plus, deux aspects liés à la mécanique des bâtiments ont été éliminés de l'analyse, soit l'emplacement de la salle mécanique et la facilité de conversion des systèmes. Certains systèmes thermiques sont plus souples et faciles à rénover. Certains détiennent même des PAC dans leurs configurations actuelles, favorisant grandement leur conversion. Néanmoins, les raisons liées à l'exclusion de ces paramètres sont expliquées par le manque d'information disponible et l'impossibilité d'en tenir compte. Ces informations sont toutefois capitales pour un dimensionnement adéquat et devront être ajoutées pour les prises de décision finale.

7.2 Analyse de sensibilité des facteurs de pondération de la cartographie

Afin d'évaluer l'influence des facteurs de pondérations utilisés lors des calculs de potentiels d'implantation des diverses technologies, des analyses de sensibilité sur ces paramètres ont été réalisées. Puisque l'influence des pondérations est directement corrélée à la valeur de pointage final, cet exercice est nécessaire pour vérifier que le remaniement léger de ces facteurs n'entraîne pas de modifications trop importantes sur les classements. Il permet ainsi de tester la robustesse des valeurs utilisées dans le calcul. Ces analyses ont été réalisées seulement pour la technique de récupération depuis les eaux usées ainsi que celle avec les PCP. Les autres techniques n'ont pas produit assez de résultats (récupération énergétique depuis les transports souterrains) ou ne contenaient pas assez de paramètres (récupération énergétique depuis les eaux de surface) afin de réaliser ce type d'analyse.

Récupération depuis les eaux usées

Le calcul utilisé pour ce type de récupération énergétique contenait cinq paramètres, dont trois paramètres secondaires. Étant donné le manque de données concernant deux des paramètres secondaires (longueurs de canalisations disponibles et longueurs à réparer), ceux-ci ne peuvent être modifiés sans impacter trop fortement les bâtiments où l'information est soit manquante, soit insuffisante. Les trois autres paramètres peuvent donc être modifiés soit : (1) la distance à la source (2) la diminution des GES et (3) les conditions des canalisations. Toutefois, de façon logique, la pondération pour la distance à la source devrait toujours être égale ou supérieure aux deux autres paramètres, celui-ci étant primordial et névralgique à la rentabilité de ce type de système. À l'opposé, la pondération pour les conditions des canalisations ne devrait jamais être supérieure à 20%, ce paramètre étant accessoire à l'analyse.

Dans cette optique, neuf scénarios ont été analysés et les valeurs de pondérations du pointage de potentiel de conversion ont été modifiées. Les pondérations des nouveaux scénarios sont toutes proportionnées dans la perspective d'obtenir un maximum théorique de 100 points. Tous les scénarios sont présentés en triplet, où le premier chiffre représente le pointage accordé à la distance à la source, le deuxième chiffre à la réduction des GES et le troisième chiffre aux conditions des canalisations. Tous les scénarios sont comparés au scénario initial, correspondant au triplet « 50-30-15 », soit 50 points pour la distance à la source, 30 pour la réduction des GES et 15 pour les conditions des canalisations. Les résultats pour l'ensemble des bâtiments identifiés sont disponibles en annexe D, qui rassemble les pondérations, les différents pointages et les classements associés. La Fig. 7.1 présente les classements des différents pointages calculés pour les neuf scénarios en fonction des bâtiments identifiés.

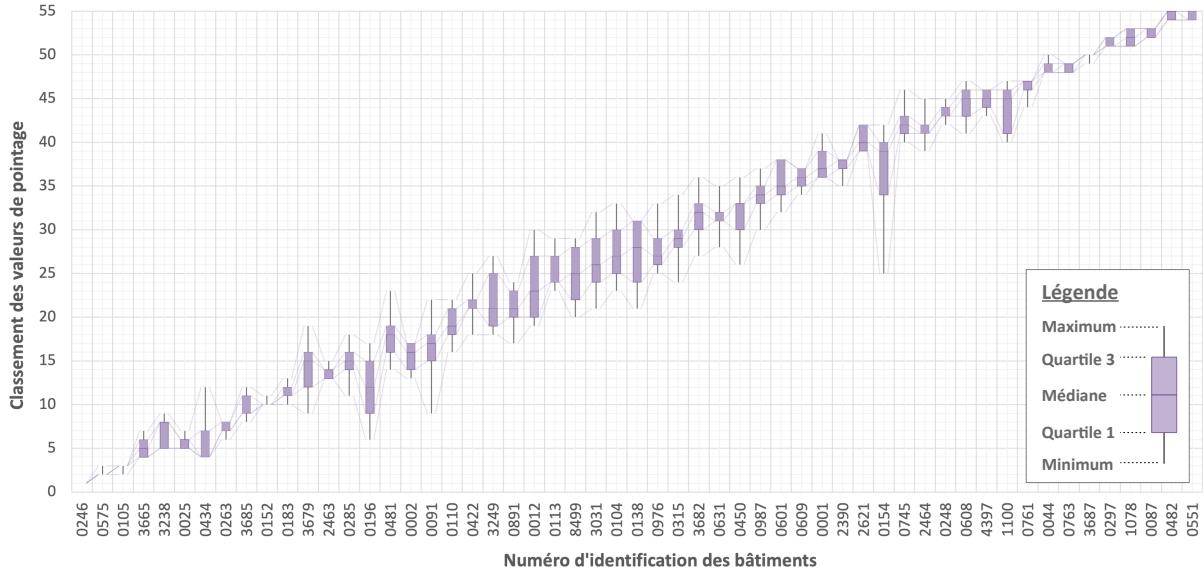


Figure 7.1 Classements des différentes valeurs de pointages pour les neuf scénarios de l’analyse de sensibilité (eaux usées). Les valeurs de classements sont associées aux numéros d’identification des différents bâtiments.

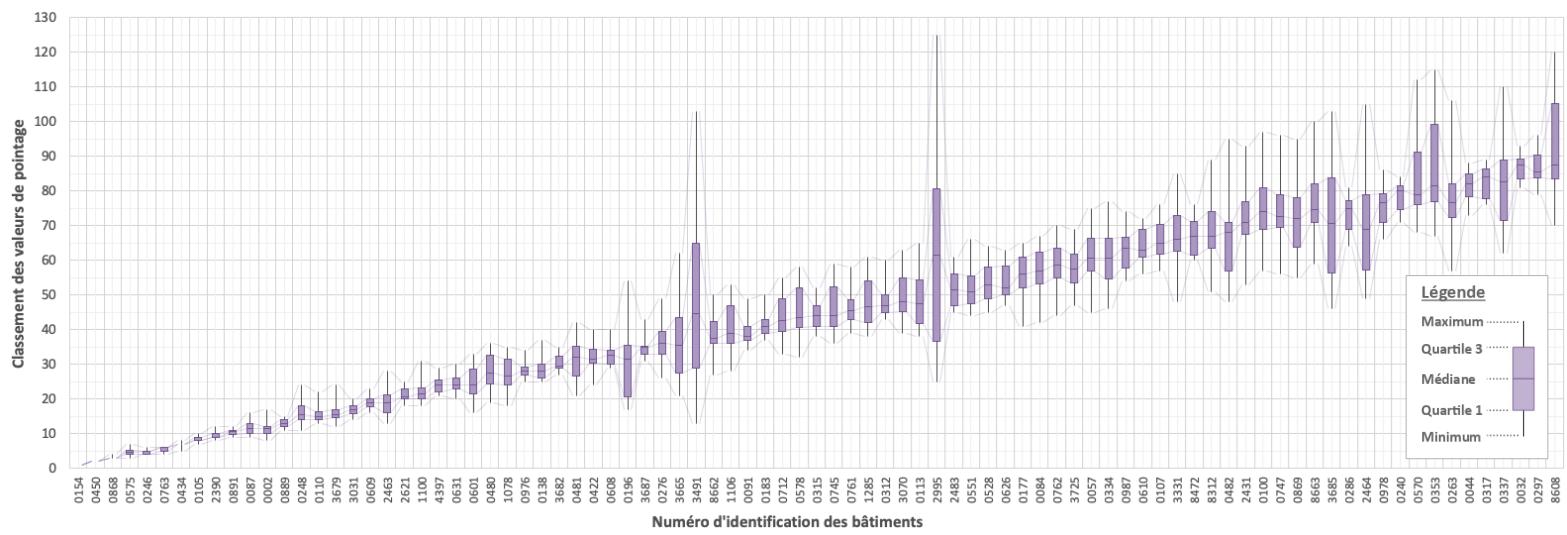
Comme prévu, les modifications des pondérations entraînent inévitablement des changements dans le classement du potentiel de conversion des bâtiments. Plus le poids des valeurs est modifié (augmentation ou diminution), plus le remaniement du classement est important. Par exemple, une modification de 5 points ou moins sur le total n’entraîne pratiquement pas de changement sur le classement et ce, peu importe le paramètre modifié. Les bâtiments varient de 1 à 2 rangs, au maximum, comparativement au scénario initial. En revanche, une modification de plus 20 points entraîne de plus larges variations. D’ailleurs, l’édifice # 0154 enregistre le bond le plus important, soit 13 rangs, tandis que la moyenne des changements dans le classement s’établit autour de 2 rangs. Cependant, la majorité des changements se situe au milieu du peloton, où de petites modifications sur les pointages, qui sont plus serrés, entraînent davantage de variations dans le classement. Aux extrémités, peu de mouvement est observé (Fig. 7.1). Dans cette perspective, les bâtiments aux meilleurs potentiels d’intégration se situent presque toujours en haut du classement et les pires vers la fin, ce qui diminue le risque associé aux valeurs de pondérations choisies. Finalement, il est intéressant de constater que les valeurs médianes des neuf scénarios, présenté à la Fig. 7.1, reproduisent, dans l’ensemble, les valeurs du scénario 1. Ainsi, les pondérations utilisées pour le calcul des systèmes de récupération depuis les eaux usées de la méthodologie du chapitre 4 seraient adéquates pour la précision du présent travail.

Puits à colonne permanente

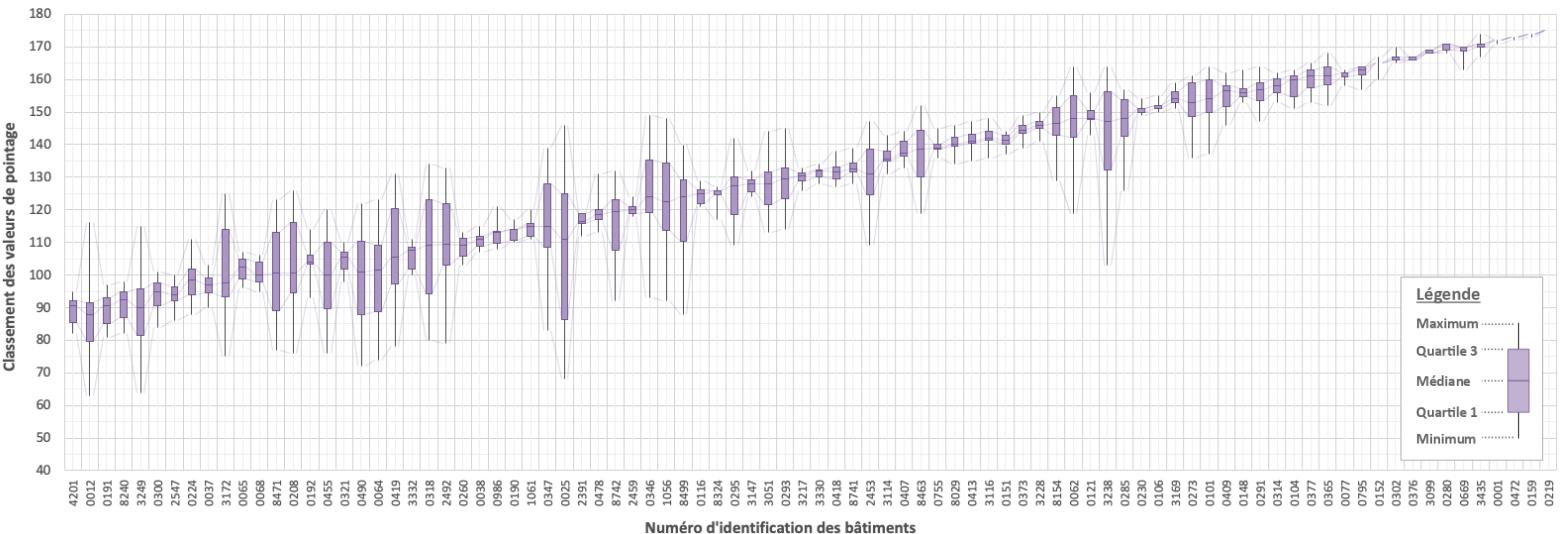
Le calcul pour la technique de récupération énergétique à l'aide des PCP contenait six paramètres, dont trois paramètres secondaires. À l'instar de la récupération depuis les eaux usées, une certaine logique doit être respectée dans cette pondération. Chacun des trois paramètres secondaires ne devrait pas être supérieur à 5 points, respectivement, afin d'influencer le pointage uniquement de façon mineure. En outre, les pondérations associées à la conductivité thermique et la conductivité hydraulique du roc devraient être similaires l'une à l'autre et, conjointement, elles devraient correspondre à approximativement le tiers du poids du calcul. Cependant, les facteurs de pondération de la conductivité thermique devraient toujours être supérieurs à celle de la conductivité hydraulique, puisque cette dernière joue un rôle moins primordial lors de la conception du système.

Quinze scénarios différents ont été analysés et les facteurs de pondérations du potentiel de conversion ont été modifiés en conséquence. À l'instar de la précédente méthode, les pondérations des nouveaux scénarios sont toutes proportionnées dans la perspective d'obtenir un maximum théorique de 100 points et le calcul est réalisé par une somme pondérée des valeurs continues. Tous les scénarios sont présentés en triplet, où le premier chiffre représente le pointage accordé à la conductivité thermique du roc, le deuxième chiffre à la conductivité hydraulique du roc et le troisième à la réduction des émissions de GES et le nombre de puits. Tous les scénarios sont comparés au scénario initial, correspondant au triplet « 20-10-60 », soit 20 et 10 points, respectivement, pour la conductivité thermique et hydraulique, 60 pour la réduction des GES et le nombre de puits. Les résultats pour l'ensemble des bâtiments identifiés sont disponibles en annexe D, qui rassemble les pondérations, les différents pointages et les classements associés. La Fig. 7.2 présente les classements des différents pointages calculés pour les treize scénarios en fonction des bâtiments identifiés.

Tel qu'observé précédemment, plus le poids des valeurs de pondération est modifié (augmentation ou diminution), plus les altérations dans le classement sont élevées. Une faible modification (>10 points) entraîne très peu de changement dans le classement (1 à 3 rangs, maximum, pour l'ensemble des édifices). Modifier les pondérations de plus de 20 points change plus largement les résultats des classements. Cependant, la majorité des changements se situe au milieu du classement et peu de variation est observée aux extrémités. Les valeurs médianes des treize scénarios, présentés à la Fig. 7.2, reproduisent dans l'ensemble les valeurs de classement du scénario 1 et les valeurs employées lors du calcul des systèmes PCP de la méthodologie du chapitre 4 seraient donc adéquates pour la précision du présent travail.



(a)



(b)

Figure 7.2 Classements des différentes valeurs de pointages pour les quinze scénarios de l'analyse de sensibilité (PCP). Les valeurs de classements sont associées aux numéros d'identification des différents bâtiments.

7.3 Discussion sur le modèle numérique

7.3.1 Choix du Centre Père-Marquette et de la technologie de conversion

Il est d'abord nécessaire de revenir sur le choix de la technologie (PCP) et du bâtiment (Centre Sportif Père-Marquette) employé lors de la réalisation du chapitre 6. En effet, ces deux paramètres sont à la base du modèle numérique et les raisons de ces deux sélections résultent de plusieurs constats importants.

La sélection de la technologie des PCP pour le modèle numérique s'était essentiellement basée sur les résultats du chapitre 5. Des quatre types de technologies étudiés, le plus grand nombre de conversions potentielles concernait les systèmes PCP puisque 175 bâtiments sur 250 respectent les critères minimums d'implantation. Comparativement aux autres technologies, ces résultats indiquaient un meilleur potentiel de conversion et une plus grande facilité de déploiement sur l'île et, plus généralement, la grande région de Montréal. De plus, les PCP présentent certains atouts intéressants dans un contexte urbain dense, tel que la proximité de la source et le modeste espace nécessaire à leur installation. L'utilisation de cette technologie dans le modèle numérique a également permis de répondre à certains questionnements concernant les risques d'interférences hydrauliques et thermiques sur les sites voisins et les possibilités de propagation ou de pollution thermique.

À l'instar du choix de la technologie employée dans le modèle numérique, le premier critère dans le choix du bâtiment concernait le potentiel d'implantation de la technologie. Dans le cas du Centre Père-Marquette, la classification du chapitre 5 le situait à la 15e position sur les 175 bâtiments identifiés (en ce qui concerne le pointage calculé), soit dans le premier quartile. Ceci s'explique notamment par sa grande superficie et sa consommation annuelle élevée en gaz naturel (6 384 GJ/an), qui se traduit par des émissions de GES significatives (324 091 kg CO₂eq./an).

Puisque le bâtiment sélectionné dans le modèle pouvait éventuellement être transformé en projet pilote, l'accessibilité du terrain et l'espace disponible pour la mise en place d'une unité mobile de test devaient être considérés avec attention. Afin de faciliter le suivi d'un éventuel projet pilote, les zones centrales ont donc été privilégiées et les zones en périphérie ont été écartées, étant plus difficilement accessibles. Dans un souci d'optimisation budgétaire et de temps, un projet pilote nécessitant un nombre important de déplacements pour l'acquisition de données, la localisation du centre sportif était jugée idéale, autant géographiquement que géologiquement. Effectivement, afin de simuler l'impact régional en milieu urbain des systèmes, il était nécessaire d'avoir un bâtiment situé dans un milieu où une forte densité résidentielle était observée. Dans cette optique, le Centre Père-Marquette est situé dans l'ar-

rondissement Rosemont-La-Petite-Patrie, soit le troisième arrondissement le plus populeux de la ville (8 457 habitants au km²). Même dans ce contexte de forte densité, la superficie du terrain du bâtiment était plus que satisfaisante et l'espace disponible était largement supérieur à celle nécessaire à la construction des puits.

Finalement, compte tenu des précisions sur le contexte géologique et du potentiel géothermique, il apparaissait important de réaliser le modèle numérique sur un secteur de l'île où les formations de calcaires (Trenton, Black River) étaient localisées. Effectivement, ces formations couvrent une forte proportion de l'île et les résultats observés peuvent être plus aisément généralisés au reste du territoire. La Ville de Montréal ayant en ligne de mire l'implantation de plusieurs projets pilotes, l'extrapolation des résultats était essentielle au développement du modèle. Les rives ont d'ailleurs été exclues pour leur contexte géologique particulier. Leur proximité avec le fleuve St-Laurent et la rivière des Prairies pourraient toutefois en faire de bons emplacements pour la technique d'échange thermique avec les eaux de surface.

7.3.2 Validation du maillage

L'importance d'un bon maillage est névralgique à l'obtention de résultats valides : un maillage grossier peut entraîner et dissimuler des erreurs de calcul, tandis qu'un maillage trop fin permet de meilleurs résultats, au détriment du temps de calcul. Dans cette optique, plusieurs simulations ont été réalisées préalablement aux résultats finaux du modèle numérique, et ce, afin d'optimiser le maillage. Un test d'indépendance, qui consiste à raffiner itérativement celui-ci, a également été effectué. Enfin, une comparaison a été réalisée entre les températures d'extraction et d'injection d'un PCP modélisé et celle de la méthode bidimensionnelle de Beaudry et al. (2019). Afin d'effectuer une calibration du maillage, une différence de $\Delta 1^{\circ}\text{C}$ entre les deux conditions frontières a été appliquée, soit $T_{in} = T_{out} + 1^{\circ}\text{C}$.

Individuellement, les volumes de maillage pour les PCP (4051 m³) comprennent 187 509 éléments et tous les éléments sont à quatre noeuds (Lagrange - linéaire). Les volumes pour les puits d'injections sont plus petits (1992 m³) avec un total de 75 144 éléments et ils sont également à quatre noeuds (Lagrange - linéaire). Finalement, le maillage régional a été réalisé sensiblement de la même façon, dans une perspective d'avoir une résolution suffisante et une précision intéressante pour un coût de calcul relativement bas. Néanmoins, le maillage régional est beaucoup plus grossier, le degré de précision diminuant avec l'étendue du domaine. De plus, la couche superficielle (fondations, infrastructures, etc.) est considérablement plus fine que les domaines plus profonds (roc et dépôts meubles). Le maillage comprend un volume total de 7.50E7 m³, 4 947 677 éléments de maillages et 3 818 694 degrés de liberté. Tous les éléments sont à quatre noeuds (Lagrange - linéaire.)

7.3.3 Validation du comportement hydraulique

Trois vérifications différentes ont été réalisées afin d'examiner le comportement hydraulique dans les puits (PCP et injection). Cet exercice est effectué afin de faire un contrôle qualité du modèle numérique et de s'assurer que le comportement hydraulique est valide et cohérent dans les domaines simulés. Chacune de ces vérifications est accomplie dans une perspective d'éliminer ou de réduire les problèmes numériques et de valider qu'il n'y a pas eu d'erreur dans la définition des éléments du maillage. Les vérifications considèrent :

1. le profil de vitesse vertical dans le PCP ;
2. le profil de débit horizontal traversant les parois du tuyau d'extraction ;
3. le bilan hydraulique global.

Le profil de vitesse verticale permet de vérifier que l'eau (extraite et réinjectée) dans le puits possède une vitesse verticale constante. La constance de ce paramètre permet de démontrer qu'une quantité négligeable d'eau traverse la paroi de la conduite d'extraction, celle-ci agissant comme une frontière imperméable, et respecte les conditions imposées sur le modèle. Dans la même perspective, le profil de débit horizontal permet également d'analyser l'imperméabilité de la conduite de PDHE. Un débit négligeable comparativement au débit d'injection doit être observé afin de valider l'écoulement hydraulique dans le puits. Finalement, le bilan hydraulique permet de valider que le bilan de masse est nul en tout temps. L'équation 7.1 est utilisée afin d'exprimer les débits pénétrant les frontières du modèle comparativement aux débits des domaines. Selon la loi de la conservation de masse, un bilan de masse nul implique une différence nulle entre le premier terme et le second terme.

$$\sum_{j=1}^n \vec{q}_j \cdot \vec{n} \cdot A_j - \sum_{i=1}^m S_{si} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \cdot V_i = 0 \quad (7.1)$$

où q est le débit qui pénètre la frontière par unité de superficie (m/s), n est la normale à la frontière, A est la superficie pénétrée (m^2), S_s est l'emmagasinement spécifique de l'aquifère (m^{-1}), h est la charge hydraulique (m) et V est le volume du domaine (m^3). Les variables j et i symbolisent, respectivement, les frontières et les domaines du modèle. Les indices n et m représentent, respectivement, le nombre total de frontières et les domaines du modèle.

7.3.4 Validation du comportement thermique

Avec les mêmes perspectives que le comportement hydraulique, deux vérifications ont été réalisées afin de valider le comportement thermique à l'intérieur du puits en considérant :

1. la différence de température à l'injection des puits (PCP et injection) ;
2. le bilan d'énergie global.

La première vérification est effectuée afin de valider que la température de réinjection est bien le résultat de l'équation 6.8. Cette vérification est effectuée dans les PCP et dans les puits d'injection. La seconde vérification permet de vérifier que l'énergie introduite dans les puits correspond à la somme de l'énergie quittant les puits et l'énergie emmagasinée dans le modèle. Selon la loi de la conservation de masse, un bilan de masse nul implique une différence de zéro entre le premier terme et le second terme.

$$\sum_{j=1}^n \vec{q}_j \cdot \vec{n} \cdot A_j - \sum_{i=1}^m V_i \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \rho_i \cdot C_{pi} = 0 \quad (7.2)$$

où \vec{q} est le transfert thermique à la frontière par superficie (W/m^2), \vec{n} est la normale à la frontière, A est la superficie pénétrée (m^2), ρ est la masse volumique (kg/m^3), C_p est la chaleur spécifique (J/kg.K) et T est la température ($^\circ \text{C}$). Les variables j et i symbolisent, respectivement, les frontières et les domaines du modèle. Les indices n et m représentent, respectivement, le nombre total de frontières et les domaines du modèle.

7.3.5 Limitation du modèle numérique

Saignée continue

Le principe de saignée dans les PCP est réalisé afin de favoriser la venue d'eau souterraine du roc vers les puits et stimuler l'extraction de chaleur par advection du milieu géologique. Tel que mentionné au chapitre 6, un pourcentage du volume extrait par les PCP est réinjecté dans les puits d'injection. Afin de diminuer le temps de calcul, une saignée constante dans le temps a été utilisée pour l'obtention des résultats. En réalité, la saignée est séquentielle et généralement activée lorsque la température d'entrée à la PAC atteint une valeur limite maximale en climatisation ou minimale en chauffage. Elle se désactive ensuite lorsque la température de l'eau s'abaisse ou s'élève à une valeur prédéfinie.

Une saignée constante entraîne certaines difficultés techniques lors des opérations des PCP, notamment en ce qui concerne la gestion des eaux évacuées, où une saignée continue peut faire déborder les puits d'injection. De plus, l'utilisation d'une saignée constante maximise le court-circuit thermique entre les PCP et les puits d'injection, le panache thermique de ceux-ci étant considérablement plus large que lors d'une opération par séquence. Cette approche de modélisation est considérée comme conservatrice, car, en surestimant l'impact véritable sur le domaine, les valeurs observées dans la simulation pourraient être plus importantes que

celle d'un projet réel. Certaines précautions sont néanmoins à prendre en compte avec les valeurs finales du modèle numérique.

Pour pallier ces limitations, il est possible d'implanter des fonctions séquentielles qui activeront ou désactiveront le fonctionnement de la saignée dans le modèle en fonction de la température d'extraction (Nguyen et al., 2012). Afin de diminuer les instabilités numériques causées par l'activation de la saignée, une période de transition entre une saignée nulle et une saignée activée peut être associée avec une fonction Heaviside lissée (Croteau, 2011). Ces ajouts se font toutefois au détriment du temps de calcul du modèle numérique. Si la précision demandée devait être plus élevée que celle nécessaire à l'établissement de la cartographie des technologies, l'ajout d'une saignée par séquence pourrait permettre de raffiner la simulation du comportement thermique et hydraulique du système.

Modèle d'écoulement souterrain

Une hypothèse rapidement établie lors de la construction du modèle fut de considérer le domaine comme étant un domaine poreux et saturé en tout temps. Cette hypothèse permet de simplifier le modèle en utilisant les équations de Darcy sur la totalité des domaines, notamment dans les conduites des puits. Cette justification s'établit, entre autres, sur le fait que le modèle d'écoulement de Darcy permet de calculer adéquatement le temps de résidence de l'eau dans le puits et le transfert de chaleur horizontal.

Intégrer les écoulements libres (équations de Navier-Stokes) dans les puits pourrait permettre d'augmenter la précision des résultats, en ajoutant l'impact de la variation de densité de l'eau, la rugosité des domaines ou la turbulence. Néanmoins, en ce qui concerne le coûts de calcul numérique, il est difficilement justifiable d'intégrer ces équations. Dans un modèle tridimensionnel, les équations de Navier-Stokes demandent la résolution de deux équations (mouvement et conservation de la masse), pour quatre variables dépendantes et requiert une stabilisation numérique (non linéaires), ce qui entraîne un coût de calcul énorme. Par comparaison, l'équation (linéaire) de Darcy ne nécessite qu'une seule variable dépendante (pression). L'inclusion de ses paramètres serait donc réalisée aux dépens du temps de calcul, et ce pour un gain de précision relativement faible et difficilement quantifiable. L'utilisation des équations de Navier-Stokes demande effectivement d'établir des valeurs adéquates de rugosité dans les conduites, afin de calculer la turbulence de l'eau. Il est cependant encore difficile d'établir avec précision ces valeurs, ce qui augmente considérablement la difficulté d'utilisation de ce modèle d'écoulement.

7.4 Cartographie conjointe des quatre technologies étudiées

Les Fig. 7.3 et 7.4 présentent les résultats de localisation des bâtiments aux meilleurs potentiels pour chacune des technologies étudiées, à l'exception de la récupération énergétique depuis les transports souterrains qui n'en compte qu'un seul. Le classement pour chacun des bâtiments est présenté par le chiffre situé sous l'icône de localisation et correspond aux couleurs associées aux technologies, soit le rose pour les PCP, le vert pour la récupération depuis les égouts et l'orange pour la récupération depuis les eaux de surfaces. Parmi les résultats de ces figures, 12 bâtiments figurent un potentiel attrayant pour l'implantation de deux ou même trois des technologies. La cartographie distingue ces bâtiments en conséquence avec des icônes adaptées. Un total de 50 bâtiments est donc identifié sur les deux figures ci-dessous.

Les conclusions du chapitre 6 démontrent que les risques d'interférences entre plusieurs systèmes PCP sont possibles, mais restent relativement faibles, et ce, même pour les bâtiments de plus large superficie, tels que les édifices municipaux envisagés dans le projet. Transposer les résultats du modèle numérique doit être réalisé avec parcimonie et précaution, puisqu'il est généralement difficile d'extrapoler les résultats associés sur un autre territoire. Néanmoins, spécifiquement pour les bâtiments identifiés dans les Fig. 7.3 et 7.4, le risque d'interférence entre les bâtiments peut être considéré comme nul, chacun des bâtiments respectant une distance (>300 m) plus qu'acceptable entre eux pour évacuer la majorité des risques inhérents.

Cependant, par souci d'éclaircir les résultats, une large quantité de bâtiments n'ont pas été intégrés à la cartographie des deux figures ci-dessous. Dans l'éventualité où plusieurs bâtiments dans un environnement voisin comporteraient un potentiel d'implantation intéressant pour les systèmes PCP, il serait important de bien calculer la distance entre chacun des bâtiments afin d'évaluer les risques de contaminations thermiques ou hydrauliques entre les différents systèmes géothermiques. Dans ces conditions, il pourrait s'avérer pertinent de varier le type de technologie à planter afin d'écartier l'incertitude face à cette problématique. Par exemple, convertir un des bâtiments identifiés vers les PCP et l'autre bâtiment, situé à proximité, vers un système de récupération depuis les égouts pourrait s'avérer une option.

Toujours est-il que le nombre de bâtiments potentiels pour une conversion vers les PCP est considérablement supérieur à toutes les autres technologies étudiées dans ce présent travail. Il pourrait s'avérer que deux bâtiments situés près l'un de l'autre aient uniquement un potentiel de conversion vers les PCP. Dans ce contexte, une étude économique et énergétique devrait être réalisée afin de déterminer quel bâtiment pourrait être le plus profitable. Si les bâtiments sont particulièrement près l'un des autres, dimensionner un système unique afin de fournir en énergie l'ensemble des bâtiments pourrait aussi être une option viable.

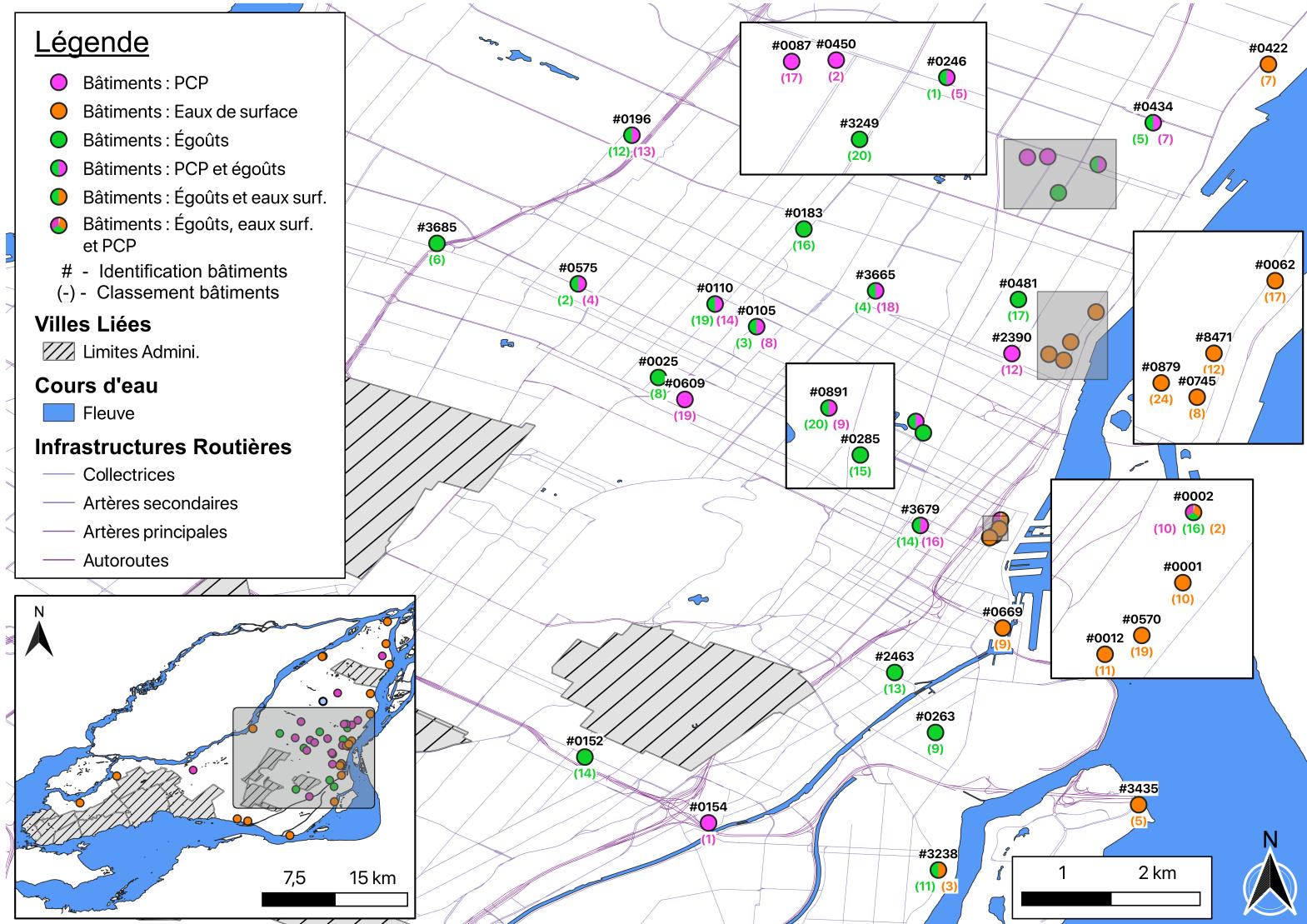


Figure 7.3 Localisation des 50 bâtiments du parc immobilier de la ville de Montréal dont le potentiel d'implantation pour les sources d'énergie non-conventionnelles identifiés sont les plus élevés.

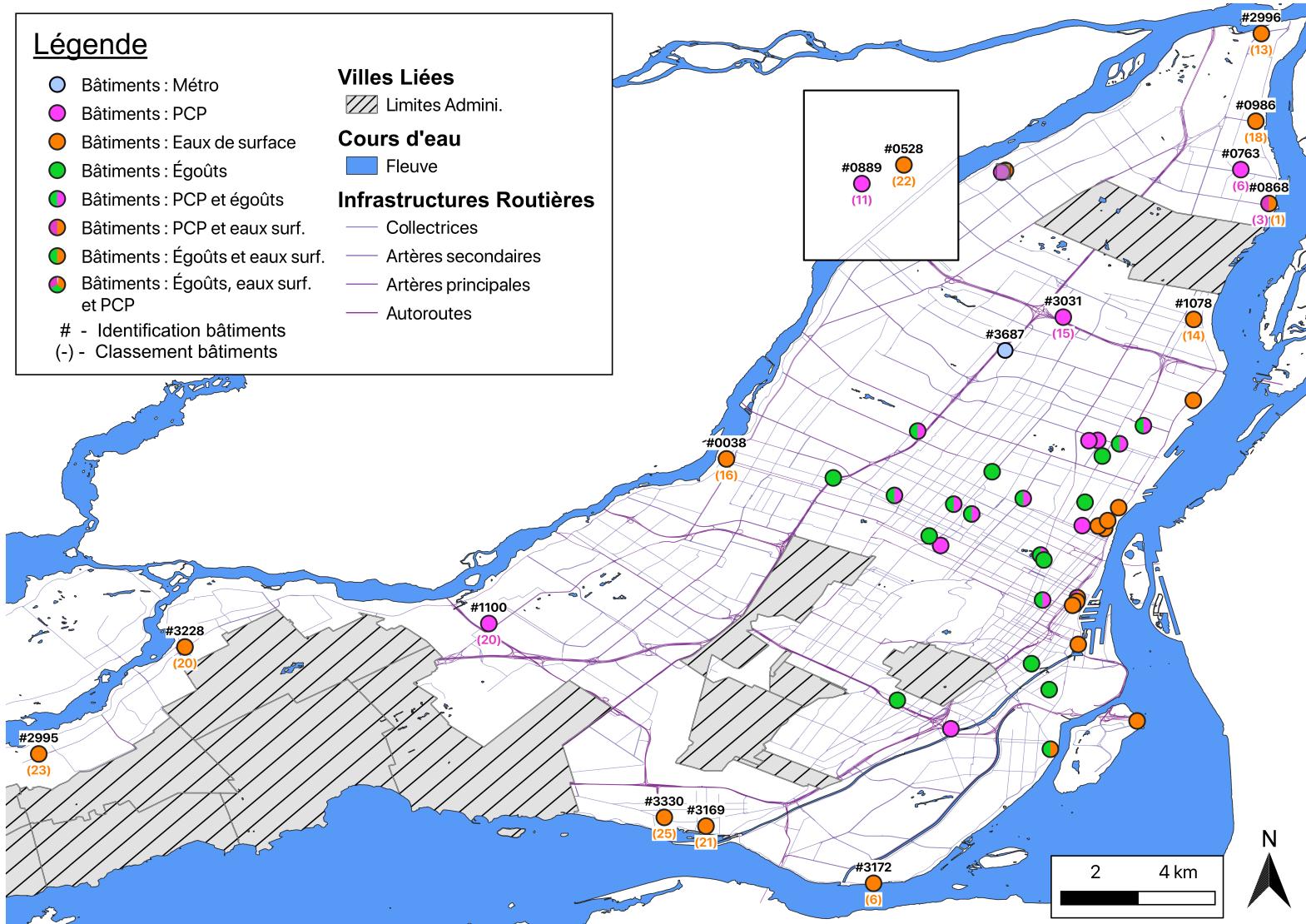


Figure 7.4 Localisation des 50 bâtiments du parc immobilier de la ville de Montréal dont le potentiel d'implantation pour les sources d'énergie non-conventionnelles identifiés sont les plus élevés.

7.5 Lignes directrices pour des projets pilote

Suite aux recherches effectuées et aux résultats obtenus, certaines lignes directrices pour les projets pilotes peuvent être tracées afin de faciliter leurs déploiements dans le parc immobilier. Peu importe la technologie de récupération envisagée, l'obtention de données énergétiques complètes et actualisées est impérative et une gamme de données historique (> 5 ans) est préférable afin de pallier les variations saisonnières annuelles. Une distribution journalière sur une année complète serait idéale, cependant, détenir les valeurs de puissance en pointe (en kW) et de la demande énergétique (en kWh ou GJ) pourrait s'avérer suffisant pour un dimensionnement préliminaire. En outre, les informations concernant le type de système thermique actuellement utilisé ainsi que l'emplacement de la salle mécanique dans le bâtiment sont deux aspects non considérés dans ce travail et il serait essentiel de les intégrer avant tout projet de conversion d'un système vers une autre source énergétique. D'autres informations complémentaires pourraient faciliter la conversion et devraient être obtenues, telles que la superficie et l'année de construction du bâtiment ou encore les factures énergétiques actualisées.

Récupération énergétique depuis les eaux usées

Les lignes directrices pour ce type de récupération énergétique ne couvriront que les configurations où l'EC est situé dans les égouts, soit la configuration étudiée dans ce projet. La première information à avoir pour l'implantation de ce type de système est la distance exacte entre les collecteurs et la salle mécanique du bâtiment. Tel qu'indiqué, cette distance devrait être limitée à un maximum de 250 m, soit 500 m de conduites totales et une attention particulière devrait être portée aux obstacles entre les bâtiments et la source. Il est important de considérer la distance totale de canalisations, et non la distance la plus courte, ces deux valeurs pouvant être significativement différentes.

Trois paramètres essentiels liés aux canalisations devraient également être connus lors du dimensionnement d'un système : le débit dans les canalisations (supérieur à 15 L/s, idéalement entre 20 et 30 L/s), le diamètre des tubulures (plus grand que 440 mm) et la longueur de canalisations disponible. Ce dernier critère est évalué en fonction de la longueur d'EC nécessaire pour pallier la demande énergétique d'un bâtiment, sachant qu'une valeur moyenne de récupération énergétique de 1 à 2 kW/m de tubulures est habituellement observée. Pour déterminer la longueur d'EC nécessaire, une analyse énergétique et économique devrait être réalisée afin de déterminer si le dimensionnement du nouveau système devrait couvrir la totalité de la demande énergétique. En général, il est de pratique courante de couvrir un certain pourcentage de la pointe (60-80%) et de pallier l'excédent avec un système auxiliaire

moins onéreux à l'installation (électricité), afin de diminuer les investissements initiaux (Hackel et al., 2009). Toutefois, réduire de façon trop importante la taille des systèmes peut potentiellement entraîner des périodes de remboursement plus longues (Nguyen et al., 2014).

L'état des canalisations pourrait aussi être une information intéressante à avoir afin de lier les travaux de restauration aux travaux de modifications et diminuer les investissements nécessaires. Finalement, il est important de considérer la puissance énergétique en chauffage des bâtiments envisagés qui doit être supérieure à 150 kW. Dans l'éventualité où cette puissance ne serait pas atteinte, il serait possible d'associer d'autres bâtiments connexes ou voisins au projet, via un réseau de chaleur urbain, ce qui diminuerait également les investissements nécessaires. Avant même l'implantation de ce type de système, il serait essentiel d'avoir l'accord des autorités responsables de la station d'épuration et de la gestion des eaux usées. Bien que le risque soit faible, il existe effectivement un lien entre la purification et la baisse de température des eaux usées. Afin d'éviter d'augmenter les risques financiers, ou même sanitaires, leur acceptation de la technologie y joue un rôle capital.

Récupération énergétique depuis les réseaux de transports souterrains

À la vue du très faible nombre de résultats obtenue pour ce type de récupération, il est difficilement possible d'envisager la réalisation de projets pilotes. D'autant plus que l'aspect financier de ces échangeurs est particulièrement contraignant, leurs coûts initiaux pouvant facilement atteindre rapidement plusieurs millions de dollars.

Cependant, bien que cette configuration n'ait pas été étudiée dans le contexte de ce projet (manque de données publiques), récupérer la chaleur de la ventilation pourrait s'avérer intéressant, ou du moins, plus intéressant que la configuration nécessitant l'installation d'échangeurs dans les tunnels. Dans cette perspective, l'obtention de données géographiques des différentes stations d'évacuation de la ventilation pourrait être un premier pas.

Récupération énergétique depuis les eaux de surface

Les lignes directrices pour ce type de système ne couvriront que les configurations de systèmes indirects en boucles ouvertes ou les systèmes hybrides, soit les deux configurations étudiées dans ce projet. À l'instar des échangeurs avec les eaux usées, la première information à détenir serait la distance entre la source et le bâtiment envisagé. La distance maximale à la rive serait de 500 m, mais idéalement moins de 100 m. Une attention particulière devrait être portée au dénombrement des obstacles entre les bâtiments et la source. En outre, choisir un bâtiment directement sur la rive faciliterait l'implantation de ce type de technologie.

Ensuite, détenir une gamme de valeurs de la température annuelle du plan ou du cours d'eau serait essentiel, avec les températures maximales et minimales de la source. Cette gamme de température permettra d'obtenir (1) le potentiel énergétique du plan d'eau et (2) la longueur totale de canalisations à installer. La température des cours d'eau étant fortement influencée par leurs profondeurs, plusieurs dizaines de mètres pourraient être nécessaires afin d'obtenir la température idéale. Cette distance influence majoritairement le spectre de rentabilité du système, où une longue distance peut s'avérer rapidement trop dispendieuse pour en justifier l'installation. C'est dans cette perspective qu'une demande énergétique minimum de 1000 MWh/an devrait être obtenue. Dans le cas du Fleuve St-Laurent et de la Rivière-Des-Prairies, une attention particulière à la profondeur devrait être exécutée pour déterminer si la gamme de températures observée est adéquate. En outre, de la même façon que pour les systèmes de récupération depuis les eaux usées, une analyse économique devrait être réalisée pour déterminer la longueur d'EC total. Couvrir un certain pourcentage de la pointe (60-80%) pourrait diminuer la longueur d'EC nécessaire et donc les investissements initiaux. Pallier l'excédent avec un système auxiliaire moins onéreux à l'installation (électricité) permettrait d'accélérer le seuil de rentabilité du système. Finalement, l'accessibilité à une variété de résultats géochimiques du plan d'eau permettrait de quantifier le potentiel de colmatages du système et ainsi d'en qualifier les risques. Une fois de plus, il est important de souligner que bien que cette technologie ait été utilisée sur plusieurs projets d'envergures, très peu d'entre eux ont été réalisés dans des fleuves ou rivières, où le débit est élevé. Des considérations supplémentaires doivent être ajoutées ce qui peut complexifier les travaux.

Puits à Colonne Permanente

Comparativement aux autres technologies étudiées, l'une des particularités des PCP provient du fait que la source énergétique est située sur le site même. Cette caractéristique réduit les problèmes de canalisations circulant à l'extérieur du site, tel que dans les échanges thermiques avec les eaux usées ou de surface. Cependant, un espace nécessaire sur le lot doit être présent, puisque, en moyenne, les PCP doivent être espacés de 10 m et les puits d'injections de 15 m. Détenir les limites territoriales précises (cadastres) sur lequel le bâtiment est situé peut donc s'avérer très pertinent, et ce, afin de déterminer s'il est possible ou non d'installer ce type de système. Occasionnellement, lorsque l'espace libre est particulièrement limité, tel que dans un milieu très dense, il serait possible de forer les puits sur le domaine public, tel que sur les trottoirs ou en bordure de rue, mais cela nécessite l'obtention de l'accord des services municipaux concernés. La problématique est généralement atténuée, sinon éliminée, pour les plus petits bâtiments, où un seul PCP et un seul puits d'injection sont nécessaires.

En outre, en déterminant la situation cadastrale du bâtiment, il est également pertinent d'établir si le site est situé sur un territoire où la législation sur la construction est plus restrictive (site patrimonial, milieu naturel protégé, écoterritoires, etc.) pour éviter un surcoût des travaux ou des contraintes administratives additionnelles. De plus, la réalisation d'une étude sur la localisation préalable des puits avant les travaux de forages est indispensable. Dans cette optique, il est pertinent de placer les puits le plus près possible de la salle mécanique, pour réduire les coûts de tuyauterie, et de bien déterminer les obstacles en surface (arbres, chaussées, etc.) afin de faciliter les opérations de forage.

Une large variété de paramètres devrait être obtenue afin d'établir un dimensionnement robuste du système. L'obtention d'une description du milieu géologique et de la stratigraphie lors du forage est primordiale, et ce, afin de caractériser le roc et les dépôts meubles. Un essai de pompage permettrait de déterminer les paramètres hydrogéologiques du site (débit d'eau, conductivité hydraulique), tandis qu'un essai de réponse thermique serait idéal pour avoir les paramètres thermiques du sous-sol (conductivité thermique, gradient de température). Par ailleurs, une attention doit être portée à l'épaisseur des dépôts meubles, qui nécessitent d'être cuvelé dans leur ensemble et à la profondeur de la nappe, qui complexifie l'installation de la pompe submersible lorsque trop profonde.

La détermination du nombre de puits nécessaires est réalisée en fonction de la puissance du bâtiment, pour couvrir la pointe maximale en chauffage. À l'instar des précédents systèmes, une analyse économique devrait être réalisée pour déterminer si couvrir un certain pourcentage de la pointe (60-80%) pourrait être plus rentable afin de diminuer les investissements initiaux. Pallier l'excédent avec un système auxiliaire moins onéreux à l'installation (électricité) permettrait d'accélérer le seuil de rentabilité du système. La longueur moyenne d'un PCP varie entre 300 et 400 m, mais certains puits plus profonds sont aussi observés (500 m). Cette longueur permet d'acquérir de 30 à 50 kW par puits foré et, conjointement à une PAC ($COP_{chauf}=3.6$ et $COP_{clim}=3.0$), de 21,7 à 36,0 kW en climatisation et 50,0 à 66,7 kW en chauffage. Il est possible d'installer des systèmes PCP sur des bâtiments consommant moins, en effectuant des forages plus courts, toutefois, la rentabilité sera obtenue sur une plus longue période.

CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Afin de réduire ses émissions de GES, la Ville de Montréal a décidé d'entreprendre le remplacement des systèmes thermiques au mazout et au gaz naturel de son parc immobilier par une énergie moins polluante et renouvelable. Pour pallier le fait que les systèmes géothermiques conventionnels les plus couramment utilisés ne sont pas idéaux pour les paramètres géologiques et hydrogéologiques de la région, il a été proposé d'identifier et d'étudier d'autres sources d'énergie dites non conventionnelles. Les sources non conventionnelles identifiées étaient : les échanges thermiques avec les eaux usées, autour et dans les canalisations d'égouts ; dans les lignes de métro, en intégrant des EC dans les structures de soutènement ; avec les eaux de surface, ainsi que les PCP, une configuration alternative aux PBF et aux PBO.

L'objectif général de cette recherche était donc d'identifier et de quantifier le potentiel d'implantation de ses sources d'énergie non conventionnelles dans le parc immobilier existant de la Ville de Montréal. Plus spécifiquement, il était question de cartographier les bâtiments favorables à l'installation des systèmes énergétiques identifiés selon le type de sources, leur consommation énergétique et leur localisation. En outre, un aspect régulièrement négligé dans la conception des systèmes géothermiques est lié à l'interférence thermique et hydraulique entre les structures souterraines, qui pourrait entraîner une perte de durabilité et d'efficacité des systèmes. Par ailleurs, un manque d'informations était observé, puisque peu d'analyses ont été effectuées afin d'en quantifier les effets à long terme. Pour répondre à l'objectif général, il était donc également nécessaire d'examiner l'influence à long terme de l'implantation et de l'exploitation de ces technologies, en se concentrant plus particulièrement sur les conséquences thermiques et hydrauliques du domaine régional.

Dans cette optique, une revue de littérature a préalablement été réalisée afin de répertorier les technologies de récupération énergétique à la Ville de Montréal et, plus largement, à la grande région de Montréal. Conjointement à l'identification des technologies, les caractéristiques énergétiques des bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal ont également été établies. L'analyse a permis de répertorier un total de 774 bâtiments, dont 250 utilisaient un système thermique au gaz naturel, au mazout, au propane ou à la vapeur d'eau. Conséquemment, ces 250 bâtiments pourraient bénéficier d'une conversion énergétique de leur système thermique vers une source moins polluante, en matière d'émission de GES. À l'aide de ces résultats, l'élaboration d'une cartographie numérique a été réalisée, permettant de caractériser les zones et les bâtiments potentiels pour une conversion vers les technologies

identifiées. Cette cartographie a permis d'établir une classification et une quantification du potentiel d'implantation des différentes technologies dans les bâtiments du parc immobilier.

Des quatre types de systèmes étudiés, les PCP étaient les systèmes les plus facilement déployables sur l'île de Montréal. En effet, ces systèmes affichaient plusieurs avantages pour des milieux urbains denses, tels que la proximité de la source et l'espace nécessaire à l'installation. Dans ces circonstances, 175 bâtiments, sur les 250 initialement identifiés, pourraient être éventuellement convertis vers la technologie. Les systèmes de récupération énergétique depuis les eaux usées présentaient également un bon potentiel d'implantation, avec un total de 55 bâtiments identifiés. L'avantage de cette technologie résidait dans la grande quantité de canalisations dans la région, permettant des distances relativement courtes avec les bâtiments. En revanche, les systèmes de récupération depuis les eaux de surface démontraient une capacité moindre que les deux autres technologies, avec 24 édifices répertoriés. Ces résultats seraient expliqués par le faible nombre de bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal situé près des cours d'eau majeurs de la région. Finalement, la récupération d'énergie dans les tunnels de métro, bien qu'intéressant au niveau énergétique, illustrait le plus faible potentiel d'implantation pour la municipalité, où un seul bâtiment s'est distingué.

Suite à la cartographie et les résultats de classification, une analyse transitoire sur un bâtiment du parc immobilier a ensuite été réalisée. Cette analyse a permis d'examiner l'influence de l'exploitation des systèmes PCP sur un domaine régional. Le choix du bâtiment s'est arrêté sur le Centre Père-Marquette, situé dans l'arrondissement Rosemont-la-Petite-Patrie, qui présentait un fort potentiel de conversion énergétique, tant en matière de diminution d'émissions polluantes que pour l'espace disponible.

Afin de réaliser cette analyse, un modèle tridimensionnel par éléments finis a été construit sur le logiciel *Comsol Multiphysics* pour simuler le comportement thermique et hydraulique de l'installation. Le modèle, couvrant une superficie de 250 000 m², impliquait un ensemble de cinq systèmes géothermiques, quatorze PCP et cinq puits d'injection. En effet, en plus du système du Centre Père-Marquette, quatre autres systèmes ont été ajoutés au modèle pour augmenter le potentiel d'interactions des systèmes et simuler les modifications des régimes en place advenant une implantation importante dans le quartier. Aucun travail n'étant planifié lors de la réalisation du modèle, les propriétés thermiques, hydrauliques et géomécaniques du sol ont été identifiées à l'aide d'une recherche bibliographique.

Les résultats de la simulation ont indiqué la viabilité des cinq systèmes simulés sur dix années d'opération, sans dégradation notable des performances des PCP. Ils ont également démontré que les modifications thermiques avaient une portée plus large et importante que les modifications hydrauliques, entre autres expliquées par la façon dont sont opérés les systèmes.

En outre, les altérations provoquées par les puits d'injections ont été significativement plus importantes que celles provenant des PCP. Néanmoins, les altérations diminuaient rapidement avec la profondeur. Avec un positionnement adéquat initialement, elles pouvaient être restreintes aux limites territoriales des sites d'opération.

De plus, les résultats de la simulation ont aussi confirmé que les risques d'interférence entre les systèmes seraient possibles, mais restaient superficiels. Pour diminuer les risques, il serait souhaitable de positionner les puits d'injection le plus loin possible des PCP. Finalement, l'exploitation des systèmes PCP dans un contexte urbain et dense serait viable à court et à long terme. L'utilisation de systèmes plus petits, tels que les bâtiments résidentiels, entraînait des changements minimes des régimes thermique et hydraulique. Cependant, le déploiement de systèmes plus larges devrait être effectué avec plus d'attention et de rigueur. Afin de garantir la viabilité des systèmes géothermiques, une bonne conception était essentielle, ce qui impliquerait un positionnement efficace des puits afin de diminuer les risques d'interférence.

Puisque le projet pilote du Centre Père-Marquette est maintenant concrétisé et qu'un système PCP est effectivement en voie d'être installé afin de remplacer complètement, ou partiellement, le système thermique actuel, il serait intéressant de comparer les données énergétiques réelles et les résultats obtenus par la simulation. Cette comparaison permettrait la calibration du modèle numérique et d'en valider les valeurs résultantes. Idéalement, une variété d'informations devrait être récupérée lors des travaux d'installation incluant, mais sans limiter, une étude hydrogéologique, pour la détermination de la conductivité hydraulique du site et des débits d'eau sur le site (essai de pompage, etc.), une description du milieu géologique et de la stratigraphie lors du forage, ainsi qu'un essai de réponse thermique afin de déterminer la conductivité thermique du roc.

Certaines recommandations pourraient être apportées pour améliorer la précision du modèle, telles que l'utilisation d'une saignée séquentielle ou l'ajout d'une couche de roc fracturé sous les dépôts meubles. L'emploi d'un roc fracturé augmenterait l'advection de chaleur et la récupération énergétique sur le domaine, la conductivité hydraulique étant améliorée. En outre, utiliser un profil de distribution énergétique horaire, au lieu d'un profil quotidien, permettrait de simuler sur un pas de temps considérablement plus court et d'améliorer la résolution des résultats. Même si les temps de calcul étaient amplifiés, la nécessité d'un haut degré de précision pourrait justifier l'ajout de ces paramètres.

RÉFÉRENCES

- Adam, D. & Markiewicz, R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Géotechnique*, 59(3), 229–236.
- Akashi, Y. & Watanabe, T. (2003). Energy and Cost Performance of a Cooling Plant System with Indirect Seawater Utilization for Air-Conditioning in a Commercial Building. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2(1), 67–73.
- Alcaraz, M., Vives, L., & Vazquez-Suné, E. (2017). The T-I-GER method : A graphical alternative to support the design and management of shallow geothermal energy exploitations at the metropolitan scale. *Renewable Energy*, 109, 213–221.
- Alekseiko, L. N., Slesarenko, V. V., & Yudakov, A. A. (2014). Combination of wastewater treatment plants and heat pumps. *Pacific Science Review*, 16(1), 36–39.
- Amis, T., Robinson, C. A. W., & Wong, S. (2010). Integrating geothermal loops into the diaphragm walls of the Knightsbridge Palace Hotel project. In *Proceeding 11th DFI/EFFC International Conference Geotechnical Challenges in Urban Regeneration*.
- Ampofo, F., Maidment, G., & Missenden, J. (2004a). Underground railway environment in the UK Part 1 : Review of thermal comfort. *Applied Thermal Engineering*, 24(5-6), 611–631.
- Ampofo, F., Maidment, G., & Missenden, J. (2004b). Underground railway environment in the UK Part 2 : Investigation of heat load. *Applied Thermal Engineering*, 24(5-6), 633–645.
- Ampofo, F., Maidment, G., & Missenden, J. (2004c). Underground railway environment in the UK Part 3 : Methods of delivering cooling. *Applied Thermal Engineering*, 24(5-6), 647–659.
- Asefzadeh, A., Hashemian, L., & Bayat, A. (2017). Development of statistical temperature prediction models for a test road in Edmonton, Alberta, Canada. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5), 369–382.
- Attard, G., Bayer, P., Rossier, Y., Blum, P., & Eisenlohr, L. (2020). A novel concept for managing thermal interference between geothermal systems in cities. *Renewable Energy*, 145, 914–924.
- Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., & Eisenlohr, L. (2016). Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. *Science of the Total Environment*, (pp.9).
- Baardsen, B. (2011). The market for heat pumps in Norway. *IEA Heat Pump Centre Newsletter*, 29(1), 11–2.

- Bailer, P. & Pietrucha, U. (2006). District heating and district cooling with large centrifugal chiller - heat pumps. In *Proceeding 10th International Symposium on District Heating and Cooling* (pp. 3–5). Hanover.
- Banks, D. (2012). *An Introduction to Thermogeology : Ground Source Heating and Cooling*. John Wiley & Sons, 2 edition.
- Barla, M. & Di Donna, A. (2018). Energy tunnels : concept and design aspects. *Underground Space*, 3(4), 268–276.
- Barla, M., Di Donna, A., & Perino, A. (2016). Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics*, 61, 104–113.
- Bayer, P., Attard, G., Blum, P., & Menberg, K. (2019). The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 17–30.
- Bayer, P., de Paly, M., & Beck, M. (2014). Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal geothermal heating and cooling. *Applied Energy*, 136, 445–453.
- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L., & Blum, P. (2012). Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1256–1267.
- Beaudry, G., Pasquier, P., & Marcotte, D. (2019). The impact of rock fracturing and pump intake location on the thermal recovery of a standing column well : model development, experimental validation, and numerical analysis. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(8), 1052–1068.
- Becchio, C., Cognati, S. P., Delmastro, C., Fabi, V., & Lombardi, P. (2016). The role of nearly-zero energy buildings in the transition towards Post-Carbon Cities. *Sustainable Cities and Society*, 27, 324–337.
- Bendelius, A. G. (1976). Aerodynamic and thermodynamic evaluation for the Atlanta subway system. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*.
- Berg, A., Grimm, M., & Stergiaropoulos, K. (2017). Geothermal usage in inner city tunnels - A study of the Fasanenhof subway tunnel in Stuttgart Germany. In *Proceedings of the 12th IEA Heat Pump Conference 2017*.
- Bertrand, A., Aggoune, R., & Maréchal, F. (2017). In-building waste water heat recovery : An urban-scale method for the characterisation of water streams and the assessment of energy savings and costs. *Applied Energy*, 192, 110–125.
- Blum, P., Campillo, G., & Kölbel, T. (2011). Techno-economic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Energy*, 36(5), 3002–3011.

- Bose, J. E., Ledbetter, C. W., & Partin, J. R. (1979). Earth coils and geo-thermal wells used as solar energy storage devices. In *Proceedings of the Silver Jubilee Congress* (pp. 797–801).
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122.
- Braud, H. J., Klimkowski, H., & Oliver, J. (1983). Earth-Source Heat Exchanger for Heat Pumps. *Transactions of the ASAE*, 26(6), 1818–1822.
- Buhmann, P., Moormann, C., Westrich, B., Pralle, N., & Friedemann, W. (2016). Tunnel geothermics - A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 8, 1–7.
- Bédard, K., Comeau, F.-A., Raymond, J., Gloaguen, E., Comeau, G., Millet, E., & Foy, S. (2018). *Cartographie de la conductivité thermique des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Rapport INRS R1789, INRS, Québec.
- Bériault, A. & Simard, G. (1978). Carte hydrogéologique de l'île de Montréal et des îles Perrot et Bizard.
- Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers : a review. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389–1406.
- Canada. Environnement et Changement climatique (2011). Données climatiques historiques : Climat.
- Caron, J., Price, J., & Rochefort, L. (2015). Physical properties of organic soil : Adapting mineral soil concepts to horticultural growing media and histosol characterization. *Vadose Zone Journal*, 14(6), vzh2014.10.0146.
- Chai, Y., Sun, T., Han, H., Cao, F., & Liu, Y. (2017). Modularly Design for Waste Heat Recovery System in Subway Based on Air Source Heat Pump. *Procedia Engineering*, 205, 273–280.
- Chao, S., Yiqiang, J., Yang, Y., Shiming, D., & Xinlei, W. (2012). A field study of a wastewater source heat pump for domestic hot water heating. *Building Services Engineering Research and Technology*, 34(4), 433–448.
- Chen, X., Zhang, G., Peng, J., Lin, X., & Liu, T. (2006). The performance of an open-loop lake water heat pump system in south China. *Applied Thermal Engineering*, 26(17), 2255–2261.
- Choi, H.-k., Yoo, G.-j., Lim, K.-b., Lee, S.-h., & Lee, C.-h. (2012). Characteristic analysis of bleeding effect on standing column well (SCW) type geothermal heat exchanger. *Journal of Central South University*, 19(11), 3202–3207.

- Choi, W., Ooka, R., & Nam, Y. (2018). Impact of long-term operation of ground-source heat pump on subsurface thermal state in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 38, 429–439.
- Ciani, J. (1978). *Sea/Lake Water Cooling for Naval Facilities*. Technical Report CEL-TN-1528, Civil Engineering Laboratory - Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme, California.
- Cipolla, S. S. & Maglionico, M. (2014). Heat Recovery from Urban Wastewater : Analysis of the Variability of Flow Rate and Temperature in the Sewer of Bologna, Italy. *Energy Procedia*, 45, 288–297.
- City of Montreal (2013). *Montréal's 2013-2020 plan to reduce citywide greenhouse gas emissions*. Technical report, City of Montreal, Montréal.
- Clauser, C. (2011). Thermal storage and transport properties of rocks, II : Thermal conductivity and diffusivity. Publisher : Springer Netherlands.
- Coalition Canadienne de l'Energie Geothermique (2012). *État de l'industrie canadienne de la géothermie 2011 : Analyse du marché et enquête de l'industrie*. Final Report, Coalition Canadienne de l'Energie Geothermique.
- Cockram, I. J. & Birnie, G. R. (1976). The ventilation of London underground railways. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Paper H* (pp. 11–27).
- Comeau, F.-A., Bédard, K., & Malo, M. (2012). *Les régions de Nicolet et de Villeroy : État des connaissances pour le stockage géologique du CO₂*. Final Report R-1332, INRS, Québec.
- Comeau, F.-A. & Raymond, J. (2018). *Revue de la littérature sur les règlements et les normes relatifs aux systèmes de pompes à chaleur géothermique face à la protection des prélevements d'eau*. Technical report, Institut national de la recherche scientifique, Québec.
- Costerton, J. W., Lewandowski, Z., DeBeer, D., Caldwell, D., Korber, D., & James, G. (1994). Biofilms, the customized microniche. *Journal of Bacteriology*, 176(8), 2137–2142.
- Croteau, J. E. (2011). *Évaluation des paramètres influençant les températures d'opération des puits à colonne permanente*. Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal.
- Culha, O., Gunerhan, H., Biyik, E., Ekren, O., & Hepbasli, A. (2015). Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings : A key review. *Energy and Buildings*, 104, 215–232.
- Côté, J. & Konrad, J.-M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 443–458. Publisher : NRC Research Press.

- Davies, G., Boot-Handford, N., Curry, D., Dennis, W., Ajileye, A., Revesz, A., & Maidment, G. (2019). Combining cooling of underground railways with heat recovery and reuse. *Sustainable Cities and Society*, 45, 543–552.
- Davies, G., Boot-Handford, N., Grice, J., Dennis, W., Rami, R., Nicholls, A., & Maidment, G. (2017). Metropolitan Integrated Cooling and Heating. In *Proceedings of the ASHRAE Winter Conference* Las Vegas.
- de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Q. M. (2020). Municipal drinking water distribution facilities.
- Edinger, J. E., Duttweiler, D. W., & Geyer, J. C. (1968). The Response of Water Temperatures to Meteorological Conditions. *Water Resources Research*, 4(5), 1137–1143.
- Eliadis, C. (2003). Deep Lake Water Cooling A Renewable Technology. *Electrical Line*, 9(3), 26–28.
- Engie (2013). District heating and cooling systems.
- Eppner, F. (2016). *Évolution thermo-hydro-géochimique d'un puits à colonne permanente conduisant à la précipitation et à la dissolution de la calcite*. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- Eppner, F., Pasquier, P., & Baudron, P. (2017). A coupled thermo-hydro-geochemical model for standing column well subject to CO₂ degassing and installed in fractured calcareous aquifers. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 11, 14–27.
- Eslami-nejad, P. & Bernier, M. (2009). Impact of grey water heat recovery on the electrical demand of domestic hot water heaters. In *Proceedings of the International Building Performance Simulation Association* (pp. 681–687).
- Fang, X. & Stefan, H. G. (1996). Long-term lake water temperature and ice cover simulations/measurements. *Cold Regions Science and Technology*, 24(3), 289–304.
- Fermback, G. (1995). Sea water plays key role in Stockholm cooling system. *District Energy*, 81(1), 41–43.
- Fotinos, D. (2003). Deep lake water cooling. In *Proceeding of 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, volume 4 (pp. 2297–2300).
- Franzius, J. N. & Pralle, N. (2011). Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 164(1), 35–40.
- Frijns, J., Hofman, J., & Nederlof, M. (2013). The potential of (waste)water as energy carrier. *Energy Conversion and Management*, 65, 357–363.
- Friotherm (2007). Energy from sewage water : District heating and districtcooling in Sandvika with 2 Unitop at 28C heat pump units.

Frioitherm (2012a). Invisible refrigeration plant is cooling the centre of Paris 8 Unitop refrigeration units in subterranean machine room.

Frioitherm (2012b). Vartan Ropsten - The largest sea water heat pump facility worldwide, with 6 Unitop 50FY and 180 MW total capacity.

Frodl, S., Franzius, J. N., & Bartl, T. (2010). Design and construction of the tunnel geo-thermal system in Jenbach. Planung und Bau der Tunnel-Geothermieanlage in Jenbach. *Geomechanics and Tunnelling*, 3(5), 658–668.

Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K., & Yang, J. (2008). Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles : An application. *Applied Energy*, 85(10), 901–910.

Garcia-Gil, A., Muela Maya, S., Garrido Schneider, E., Mejias Moreno, M., Vazquez-Suné, E., Marazuela, M. A., Mateo Lazaro, J., & Sanchez-Navarro, J. A. (2019). Sustainability indicator for the prevention of potential thermal interferences between groundwater heat pump systems in urban aquifers. *Renewable Energy*, 134, 14–24.

Garcia-Gil, A., Vazquez-Sune, E., Schneider, E. G., Sanchez-Navarro, J. A., & Mateo-Lazaro, J. (2015). Relaxation factor for geothermal use development – Criteria for a more fair and sustainable geothermal use of shallow energy resources. *Geothermics*, 56, 128–137.

Gilbey, M. J., Duffy, S., & Thompson, J. A. (2011). The potential for heat recovery from London underground stations and tunnels. In *Proceedings of CIBSE Technical Symposium, Leicester, UK*.

Globensky, Y. (1987). *Géologie des basses-terres du Saint-Laurent*. MM 85-02. Québec (Province) : Direction générale de l'exploration géologique et minérale, géocontexte inc. edition. OCLC : 1131795417.

Gu, Y., Deng, H., Gao, Y., & Zhang, H. (2011). The potential of urban wastewater heat : The feasibility analysis of using wastewater source heat pump. In *Proceedings of 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection* (pp. 1481–1484). Xi'an, China.

Gunnlaugsson, E. (2012). Scaling in Geothermal Installation in Iceland. In *Proceedings of Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells* Santa Tecla, El Salvador.

Guo, X. & Hendel, M. (2018). Urban water networks as an alternative source for district heating and emergency heat-wave cooling. *Energy*, 145, 79–87.

Guo, Y.-X., Cai, Y.-L., Liang, S.-Q., & Chen, W. (2012). Experimental study on a shower waste water heat recovery device in buildings. In *Vibration, Structural Engineering and Measurement II : Selected, Peer-reviewed Papers*, volume 226-228 of *Applied Mechanics and Materials* (pp. 2402–2406). Shanghai, China : Trans Tech Publications.

- Hackel, S., Nellis, G., & Klein, S. (2009). Optimization of Cooling-Dominated Hybrid Ground-Coupled Heat Pump Systems. *ASHRAE Transactions*, 115(1), 565–580.
- Hahnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., & Blum, P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, 59, 914–925.
- Hakala, A. (2004). Meromixis as a part of lake evolution - observations and a revised classification of true meromictic lakes in Finland. *Boreal Environment Research*, 9(1), 37–53.
- Haldane, T. (1930). The heat pump - an economical method of producing low-grade heat from electricity. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 68(402), 666–675.
- Hamada, Y., Nakamura, M., Saitoh, H., Kubota, H., & Ochifuji, K. (2007). Improved underground heat exchanger by using no-dig method for space heating and cooling. *Renewable Energy*, 32(3), 480–495.
- Hamdhan, I. N. & Clarke, B. G. (2010). Determination of thermal conductivity of coarse and fine sand soils. In *Proceedings World Geothermal Congress 2010* (pp. 1–7). Bali, Indonesia : World Geothermal Congress.
- Hamrick, J. M. (1992). *Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code : Theoretical and computational aspects. Special report in applied marine science and ocean engineering*. Special report 317, Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary.
- Hansen, G. M. (2011). *Experimental Measurement and Analysis of Surface Water Heat Exchangers*. Doctoral dissertation, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- Hepbasli, A., Biyik, E., Eken, O., Gunerhan, H., & Araz, M. (2014). A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems. *Energy Conversion and Management*, 88, 700–722.
- Herb, W. R., Janke, B., Mohseni, O., & Stefan, H. G. (2008). Ground surface temperature simulation for different land covers. *Journal of Hydrology*, 356(3-4), 327–343.
- Herb, W. R. & Stefan, H. G. (2011). Modified equilibrium temperature models for cold-water streams : Equilibrium temperature for cold water streams. *Water Resources Research*, 47(6).
- Herbert, A., Arthur, S., & Chillingworth, G. (2013). Thermal modelling of large scale exploitation of ground source energy in urban aquifers as a resource management tool. *Applied Energy*, 109, 94–103.
- Houben, G. (2003). Iron oxide incrustations in wells. Part 1 : genesis, mineralogy and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 18(6), 927–939.

- Hydro-Québec (2013). SIMEB - Simulation Énergétique des Bâtiments.
- Imberger, J., Loh, I., Hebbert, B., & Patterson, J. (1978). Dynamics of Reservoir of Medium Size. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(5), 725–743.
- INERIS (2017). *Etat des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde*. Rapport d'étude DRS-16-157477-00515A, INÉRIS, France.
- Institut de la Statistique du Québec (2020). Région administrative de Montréal.
- Ji, Z.-G., Morton, M., & Hamrick, J. (2001). Wetting and Drying Simulation of Estuarine Processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(5), 683–700.
- Kahraman, A. & Celebi, A. (2009). Investigation of the Performance of a Heat Pump Using Waste Water as a Heat Source. *Energies*, 2(3), 697–713.
- Kapsalaki, M. (2017). Large scale heat pumps in Europe.
- Kauffman, C., Tébar Less, C., & Teichmann, D. (2012). Corporate greenhouse gas emission reporting : A stocktaking of government schemes. *OECD Publishing*, (pp. 74).
- Kavanaugh, S. & Pezent, M. (1990). Lakewater applications of water-to-air heat pumps. *ASHRAE Transactions*, 96(1), 813–820.
- Kavanaugh, S. P. & Rafferty, K. D. (1997). *Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*. Atlanta, GA : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Atlanta.
- Kim, S.-K., Bae, G.-O., Lee, K.-K., & Song, Y. (2010). Field-scale evaluation of the design of borehole heat exchangers for the use of shallow geothermal energy. *Energy*, 35(2), 491–500.
- Koene, F. & Geelen, C. (2000). Energy piles as an efficient way to store heat. In *Special issue on Netherlands 2000* (pp. 4–6). Energy Research Centre of the Netherlands, Petten, Netherlands.
- Kojima, S. (1990). Road Heating by Subway Waste Heat Recovery Heat Pump. In T. Saito (Ed.), *Heat Pumps* (pp. 781–784). Oxford : Pergamon.
- Kordana, S. (2018). An assessment of the potential for shower water heat recovery. *E3S Web of Conferences*, 45, 1–8.
- Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 763–781.
- Lavoie, R., Malo, M., & Raymond, J. (2015). *Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde*. Rapport Final Rapport 1650, INRS, Québec. OCLC : 1000818496.

- Law, Y. L. E. & Dworkin, S. B. (2016). Characterization of the effects of borehole configuration and interference with long term ground temperature modelling of ground source heat pumps. *Applied Energy*, 179, 1032–1047.
- Lee, C., Park, S., Choi, H.-J., Lee, I.-M., & Choi, H. (2016a). Development of energy textile to use geothermal energy in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59, 105–113.
- Lee, C., Park, S., Won, J., Jeoung, J., Sohn, B., & Choi, H. (2012). Evaluation of thermal performance of energy textile installed in Tunnel. *Renewable Energy*, 42, 11–22.
- Lee, C. M. & Erickson, P. (2017). How does local economic development in cities affect global GHG emissions? *Sustainable Cities and Society*, 35, 626–636.
- Lee, S., Lee, C., Moon, H., Jeong, J., Lee, Y., Kim, H., Han, J., & Jo, S. (2016b). Thermal response performance of the heat exchanger of a standing column well based on the location of the return pipe. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 13(4), 559–573.
- Leerand, T. & Van Ryzin, J. (1995). Air Conditioning with Deep Seawater : A Cost-Effective Alternative for West Beach, Oahu, Hawaii. In *Conference Proceedings Oceans '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment* (pp. 1100–1109). San Diego, California : IEEE.
- Lepage, N. (1996). *Modélisation tridimensionnelle régionale et locale de l'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal et au Centre de Tri et d'Élimination des Déchets de la Ville de Montréal*. Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal.
- Li, C., Mao, J., Zhang, H., Li, Y., Xing, Z., & Zhu, G. (2017). Effects of load optimization and geometric arrangement on the thermal performance of borehole heat exchanger fields. *Sustainable Cities and Society*, 35, 25–35.
- Lines, J. R. (1991). Heat Exchangers in Municipal Wastewater Treatment Plants. *Water Engineering & Management*, 138(9), 28.
- Liu, X., Lau, S.-K., Li, H., & Shen, H. (2017). Optimization and analysis of a multi-functional heat pump system with air source and gray water source in cooling mode. *Energy and Buildings*, 149, 339–353.
- Liu, X., Ni, L., Lau, S.-K., & Li, H. (2013). Performance analysis of a multi-functional Heat pump system in heating mode. *Applied Thermal Engineering*, 51(1), 698–710.
- Looney, C. M. & Oney, S. K. (2007). Seawater District Cooling and Lake Source District Cooling. *Energy Engineering*, 104(5), 34–45.
- Ma, Z. Y., Yan, H., Zhou, X., & Hou, C. (2012). Impact of Carbonate Scaling on the Efficiency of Used Geothermal Water Re-injection from Low-Middle Temperature Geothermal

Fluid in Xianyang Porous Geothermal Field, NW China. *Advanced Materials Research*, 614-615, 307–310.

Mazur, A. (2018). An assessment of the financial efficiency of a heat recovery system from graywater in a hotel. *E3S Web of Conferences*, 45, 1–8.

McCartney, J. S., Rosenberg, J. E., & Sultanova, A. (2010). Engineering Performance of Thermo-Active Foundations. In *GeoTrends : The Progress of Geological and Geotechnical Engineering in Colorado at the Cusp of a New Decade*, Proceedings (pp. 27–42). Denver, CO.

Meggers, F. & Leibundgut, H. (2011). The potential of wastewater heat and exergy : Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings*, 43(4), 879–886.

Mikler, V. (1993). *A theoretical and experimental study of the energy well performance*. Dissertation Doctorale, Pennsylvania State University.

Miller, M. (2020). Understanding air to water heat pump systems : Part 1. Section : HVAC Systems.

Mitchell, M. S. (2014). *Experimental investigations and design tool development for surface water heat pump systems*. Mémoire de maîtrise, Oklahoma State University, Ann Arbor, United States.

Mitchell, M. S. & Spitler, J. D. (2013). Open-loop direct surface water cooling and surface water heat pump systems : A review. *HVAC&R Research*, 19(2), 125–140.

Montambault, P. & Leduc, R. (1980). Quelques aspects statistiques de l'ensoleillement à Montréal, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 34(1), 115–122.

Moormann, C., Buhmann, P., Friedemann, W., Homuth, S., & Pralle, N. (2016). Tunnel geothermics - International experience with renewable energy concepts in tunnelling. *Geomechanics and Tunnelling*, 9(5), 467–480.

Nasr, M. (2016). *Évaluation des propriétés thermiques de la plateforme du Saint-Laurent : mesures au laboratoire et approche diagraphique*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec.

Nasr, M., Raymond, J., Malo, M., & Gloaguen, E. (2018). Geothermal potential of the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin from well log analysis. *Geothermics*, 75, 68–80.

Nastev, M. (1995). *Modeling of landfill gas generation and its migration in wastes and in geological formations*. Research study proposal for Ph. D. degree, Université Laval, Québec.

Newman, L. & Herbert, Y. (2009). The use of deep water cooling systems : Two Canadian examples. *Renewable Energy*, 34(3), 727–730.

- Ng, B., Underwood, C., & Walker, S. (2009). Numerical modelling of multiple standing column wells for heating and cooling buildings. In *Proceedings of Eleventh International IBPSA Conference Glasgow*.
- Nguyen, A., Beaudry, G., & Pasquier, P. (2020). Experimental assessment of a standing column well performance in cold climates. *Energy and Buildings*, 226, 110391.
- Nguyen, A., Pasquier, P., & Marcotte, D. (2012). Multiphysics Modelling of Standing Column Well and Implementation of Heat Pumps Off-Loading Sequence. In *Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Boston* (pp. 7). Boston, USA : COMSOL.
- Nguyen, A., Pasquier, P., & Marcotte, D. (2015). Influence of groundwater flow in fractured aquifers on standing column wells performance. *Geothermics*, 58, 39–48.
- Nguyen, A., Pasquier, P., & Marcotte, D. (2017). Borehole thermal energy storage systems under the influence of groundwater flow and time-varying surface temperature. *Geothermics*, 66, 110–118.
- Nguyen, H. V., Law, Y. L. E., Alavy, M., Walsh, P. R., Leong, W. H., & Dworkin, S. B. (2014). An analysis of the factors affecting hybrid ground-source heat pump installation potential in North America. *Applied Energy*, 125, 28–38.
- Ni, L., Lau, S. K., Li, H., Zhang, T., Stansbury, J. S., Shi, J., & Neal, J. (2012). Feasibility study of a localized residential grey water energy-recovery system. *Applied Thermal Engineering*, 39, 53–62.
- Nicholson, D. P., Chen, Q., de Silva, M., Winter, A., & Winterling, R. (2014). The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 167(3), 118–134.
- Nicholson, N., Alex, C., Anton, P., & Michael, C. (2013). Developments in Thermal Pile and Thermal Tunnel Linings for City Scale GSHP systems. In *Proceeding of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University* Stanford University, California.
- Niewitecka, K. (2018). Possibilities of heat energy recovery from greywater systems. In *E3S Web of Conferences*, volume 30 of *Water, Waterwater and Energy in Smart Cities* (pp. 1–8).
- Ninikas, K., Hytiris, N., Emmanuel, R., Aaen, B., & Younger, P. L. (2016). Heat recovery from air in underground transport tunnels. *Renewable Energy*, 96, 843–849.
- O'Neill, Z. D., Spitler, J. D., & Rees, S. J. (2006). Performance analysis of standing column well ground heat exchanger systems. *ASHRAE Transactions*, 112(2), 633–643. 633.
- Orio, C. D. (1999). Geothermal Heat Pump Applications Industrial/Commercial. *Energy Engineering*, 96(3), 58–79.

- Orio, C. D., Chiasson, A., Johnson, C. N., Deng, Z., Rees, S. J., & Spitler, J. D. (2005). A survey of standing column well installations in northamerica. *ASHRAE Transactions*, 111(2), 13.
- Orio, C. D., Johnson, C. N., & Poor, K. D. (2006). Geothermal standing column wells : ten years in a New England school. *ASHRAE Transactions*, 112(2), 57–. 57.
- Orio, C. D. & Patnaude, Z. J. (2014). Eight Years of Operation of 615 Ton Geothermal Nursing Home in Northern Tier. *ASHRAE Transactions*, 120, 8.
- Ovik, J., Birgisson, B., & Newcomb, D. E. (1999). Characterizing seasonal variations in flexible pavement material properties. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1684(1), 1–7.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., Hegerl, G., Howden, M., Jiang, K., Jimenez Cisneroz, B., Kattsov, V., Lee, H., Mach, K. J., Marotzke, J., Mastrandrea, M. D., Meyer, L., Minx, J., Mulugetta, Y., O'Brien, K., Oppenheimer, M., Pereira, J. J., Pichs-Madruga, R., Plattner, G.-K., Pörtner, H.-O., Power, S. B., Preston, B., Ravindranath, N. H., Reisinger, A., Riahi, K., Rusticucci, M., Scholes, R., Seyboth, K., Sokona, Y., Stavins, R., Stocker, T. F., Tschakert, P., van Vuuren, D., & van Yperle, J.-P. (2014). *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland : IPCC.
- Pahud, D. & Hubbuch, M. (2007). *Mesures et optimisation de l'installation avec pieux énergétiques du Dock Midfield de l'aéroport de Zurich*. Report, University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland.
- Pasquier, P., Nguyen, A., Eppner, F., Marcotte, D., & Baudron, P. (2016). Standing column wells. In *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, number 100 in Woodhead Publishing Series in Energy (pp. 269–294). Duxford, UK : Woodhead Publishing, simon j. rees edition.
- Peer, T. & Joyce, W. (2002). Lake-source cooling. *ASHRAE Journal*, 44(4), 37–39.
- Prest, V. K. & Keyser, J. H. (1982). *Caractéristiques géologiques et géotechniques des dépôts meubles de l'île de Montréal et des environs, Québec*, volume 75-27. Montréal : Centre d'édition du Gouvernement du Canada, commission géologique du canada edition.
- Qu, Y. X., Feng, Y., & Liu, H. (2011). Study on the Growth Characteristics of Fouling in Sewage Source Heat Pump Systems. *Advanced Materials Research*, 374-377, 86–89.

Quebec. Minister of Energy and Natural Resources (2020). Oil and gas geoscience information system.

Québec. MELCC (2020). Liste des stations hydrométriques.

Québec. Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (2018). Stratégie québécoise d'économie d'eau potable 2019 à 2025 - Données Québec.

Rees, S. J. (2016). *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Number 100 in Energy. Woodhead Publishing.

Rees, S. J., Spitler, J. D., Deng, Z., Orio, C. D., & Johnson, C. N. (2004). A study of geothermal heat pump and standing column well performance. *ASHRAE Transactions*, 110(1), 11.

Revesz, A., Chaer, I., Thompson, J., Mavroulidou, M., Gunn, M., & Maidment, G. (2016). Ground source heat pumps and their interactions with underground railway tunnels in an urban environment : A review. *Applied Thermal Engineering*, 93, 147–154.

Revesz, A., Chaer, I., Thompson, J., Mavroulidou, M., Gunn, M., & Maidment, G. (2017). The potential for integration of ground energy from underground railway tunnels. *ASHRAE Transactions*, 123(1).

Revesz, A., Chaer, I., Thompson, J., Mavroulidou, M., Gunn, M., & Maidment, G. (2019). Modelling of heat energy recovery potential from underground railways with nearby vertical ground heat exchangers in an urban environment. *Applied Thermal Engineering*, 147, 1059–1069.

Rinck-Pfeiffer, S., Ragusa, S., Sztajnbok, P., & Vandevelde, T. (2000). Interrelationships between biological, chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells. *Water Research*, 34(7), 2110–2118.

Rivera, J. A., Blum, P., & Bayer, P. (2017). Increased ground temperatures in urban areas : Estimation of the technical geothermal potential. *Renewable Energy*, 103, 388–400.

Rognon, F., Marco, P., Chappuis, B., Moradpour, E., & Calame, N. (2019). Feasibility Study on the Implementation of Energy Recovery Tunnel Segmental Lining in the Lot 3 Tunnel on Railway Line 16 of the Grand Paris Express. In A. Ferrari & L. Laloui (Eds.), *Energy Geotechnics*, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering (pp. 203–210). Cham : Springer International Publishing.

Rybach, L. & Eugster, W. J. (2010). Sustainability aspects of geothermal heat pump operation, with experience from Switzerland. *Geothermics*, 39(4), 365–369.

Sachs, H. & Dinse, D. R. (2000). Geology and the ground heat exchanger : What engineers need to know. *ASHRAE Transactions*, 106, 421.

- Saloranta, T. M. & Andersen, T. (2007). MyLake - A multi-year lake simulation model code suitable for uncertainty and sensitivity analysis simulations. *Ecological Modelling*, 207(1), 45–60.
- Schmid, F. (2008). Sewage water : interesting heat source for heat pumps and chillers. In *Proceedings ofn the 9th IEA Heat Pump Conference*, volume 5.22 (pp. 1–12). Switzerland : Paper.
- Shen, C., Jiang, Y., Yao, Y., & Wang, X. (2012). An experimental comparison of two heat exchangers used in wastewater source heat pump : A novel dry-expansion shell-and-tube evaporator versus a conventional immersed evaporator. *Energy*, 47(1), 600–608.
- Société de Transport de Montréal (2021a). Plan du métro de la Ville de Montréal.
- Société de Transport de Montréal (2021b). Prolongement de la ligne bleue.
- Soltani, M., M. Kashkooli, F., Dehghani-Sanij, A. R., Kazemi, A. R., Bordbar, N., Farshchi, M. J., Elmi, M., Gharali, K., & B. Dusseault, M. (2019). A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society*, 44, 793–818.
- Sonakiya, M., Panchoore, B., & Mishra, N. (2013). Performance Analysis on Heating Conditions of Large Sewage Source Heat Pump System. *International Journal on Emerging Technologies*, 4(2), 27–30.
- Song, Y.-h., Akashi, Y., & Yee, J.-J. (2007). Effects of utilizing seawater as a cooling source system in a commercial complex. *Energy and Buildings*, 39(10), 1080–1087.
- Spitler, J. D. & Bernier, M. (2016). Vertical borehole ground heat exchanger design methods. In *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, number 100 in Woodhead Publishing Series in Energy (pp. 29–61). Duxford, UK : Woodhead Publishing, simon j. rees edition.
- Spitler, J. D., Culling, J. R., Conjeevaram, K., Ramesh, M., & Selvakumar, M. (2012). *Improved Design Tools for Surface Water and Standing Column Well Heat Pump Systems (DE-EE0002961)*. Technical Report Final Scientific Report, Oklahoma State University.
- Spitler, J. D. & Mitchell, M. S. (2016). Surface water heat pump systems. In *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, number 100 in Woodhead Publishing Series in Energy (pp. 225–246). UK : Woodhead Publishing.
- Spitler, J. D., Rees, S. J., Deng, Z., Orio, C. D., & Johnson, C. (2002). *R&D studies applied to standing column well design*. Final Report 1119-RP, ASHRAE, Oklahoma State University.
- Stempihar, J. J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K. E., & Rodezno, M. C. (2012). Porous asphalt pavement temperature effects for urban heat island analysis. *Transportation Research Record*, 2293(1), 123–130. Publisher : SAGE Publications Inc.

- Sumner, J. A. (1948). The Norwich Heat Pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 158(1), 22–29.
- Svensson, T. & Sorman, L.-O. (1983). Pipe heat exchangers on lake bottoms : results of laboratory and field tests. In *Proceedings of International conference on subsurface heat storage in theory and practice* (pp. 679–684). Sweden : Swedish Council for Building Research.
- Thomas, D. & Gudmundsson, J. (1989). Advances in the study of solids deposition in geothermal systems. *Geothermics*, 18(1-2), 5–15.
- Thompson, J. & Maidment, G. (2010). Alternative geothermal heating sources, heat pumps and their application. In *1st IIR International Conference on the Cold Chain and Sustainability. Cambridge, UK*.
- Thompson, J. A., Maidment, G. G., & Missenden, J. F. (2006). Modelling low-energy cooling strategies for underground railways. *Applied Energy*, 83(10), 1152–1162.
- Timea, G., Rusu, T., & Dan, V. (2010). Technological Variations for Domestic Waste Water Heat Recovery. *ProEnvironment/ProMediu*, 3(6), 5.
- Tinti, F., Boldini, D., Ferrari, M., Lanconelli, M., Kasmaee, S., Bruno, R., Egger, H., Voza, A., & Zurlo, R. (2017). Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment. A feasibility study for the Brenner Base tunnel - BBT. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, 182–203.
- Todd, D. K. & Mays, L. W. (2004). *Groundwater Hydrology, 3rd Edition*. New York : John Wiley, 3 edition.
- Toki, Y. (1988). District heating and cooling system utilizing the waste heat from the subway in the city of Sapporo. In *Proceedings. 14 Annual Conference of Industrial Electronics Society*, volume 4 (pp. 1000–1005).
- Tran Ngoc, T. D., Lefebvre, R., Konstantinovskaya, E., & Malo, M. (2014). Characterization of deep saline aquifers in the Bécancour area, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada : Implications for CO₂ geological storage. *Environmental Earth Sciences*, 72(1), 119–146.
- Transition énergétique Québec (2017). *Rapport de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre - Secteur institutionnel - Partie 1 : Composants et mise au point de l'inventaire*. Technical report, Gouvernement du Québec, Québec.
- Université de Winnipeg (2020). Atlas climatique du Canada - Données climatiques (Carte interactive) - Canada.
- Van Wijk, W. R. & De Vries, D. A. (1963). Periodic temperature variations in a homogeneous soil. *Physics of plant environment*, 1, 103–143. Publisher : North-Holland Amsterdam.

- Vasilyev, G., Gornov, V., Kolesova, M., Brodach, M., Polishchuk, V., Piskunov, A., Leskov, V., Dmitriev, A., & Yurchenko, I. (2014). Technical and Economic Aspects of Using Heat Pump Systems for Heating and Cooling of the Moscow Subway's Facilities. *Applied Mechanics and Materials*, 664, 254–259.
- Ville de Montréal (2013). *Plan de réduction des émissions de GES corporatives 2013-2020*. Final Report 1, Ville de Montréal, Montréal.
- Ville de Montréal (2020). Environnement - Anciennes carrières - Carte Interactive.
- Viquerat, P. A., Lachal, B., & Hollmuller, P. (2012). *Connexion des bâtiments de l'ONU au réseau GLN : analyse de la première année de fonctionnement*. Rapport, SIG, Genève.
- Vivar, E. & Haddock, J. (2006). *HMA Pavement performance and durability*. Final Report FHWA/IN/JTRP-2005/14, 2646, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Wanner, O. (2006). Les biofilms s'opposent à la récupération de chaleur. *Eawag : L'institut de Recherche de l'Eau du Domaine des EPF60*, 60(f), 30–32.
- Wanner, O. & Bauchrowitz, M. (2006). Les biofilms sont omniprésents. *Eawag : L'institut de Recherche de l'Eau du Domaine des EPF*, 60(f), 4–7.
- Wanner, O., Panagiotidis, V., Clavadetscher, P., & Siegrist, H. (2005). Effect of heat recovery from raw wastewater on nitrification and nitrogen removal in activated sludge plants. *Water Research*, 39(19), 4725–4734.
- War, J. C. (2011). Seawater Air Conditioning (SWAC) a renewable energy alternative. In *Proceeding of Oceans'11* (pp. 1–9). Kailua-Kona, Hawaii.
- Webb, B. W., Hannah, D. M., Moore, R. D., Brown, L. E., & Nobilis, F. (2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes*, 22(7), 902–918.
- Weijie, Z., Cen, L., & Yanyan, L. (2010). Potential capacity research on application of sewage-source heat pump system in bath centers. *College of Urban Construction*, (pp.8).
- Wemhoff, A. P., Dai, T., & Fleischer, A. S. (2017). The Potential for Thermal Waste Energy Recovery in Industrial Kitchens. (*:unav*).
- Wurdemann, H., Westphal, A., Lerm, S., Kleyböcker, A., Teitz, S., Kasina, M., Miethling-Graff, R., Seibt, A., & Wolfgramm, M. (2014). Influence of Microbial Processes on the Operational Reliability in a Geothermal Heat Store - Results of Long-term Monitoring at a Full Scale Plant and First Studies in a Bypass System. *Energy Procedia*, 59, 412–417.
- Xiaowen, Y. & Lee, W. L. (2009). The use of helical heat exchanger for heat recovery domestic water-cooled air-conditioners. *Energy Conversion and Management*, 50(2), 240–246.

- Yavuzturk, C. & Chiasson, A. (2002). Performance analysis of U-tube, concentric tube, and standing column well ground heat exchangers using a system simulation approach. *ASHRAE Transactions*, 108, 925.
- Yuill, G. & Mikler, V. (1995). *Analysis of the effect of induced groundwater flow on heat transfer from a vertical open-hole concentric-tube thermal well*. Rapport Technique CONF-950104, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHREA), Atlanta, GA.
- Zhang, G., Xia, C., Sun, M., Zou, Y., & Xiao, S. (2013). A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers. *Cold Regions Science and Technology*, 88, 59–66.
- Zhou, W. Z. & Li, J. X. (2004). Sewage Heat Source Pump System's Application Examples and Prospect Analysis in China. In *Proceeding of International Refrigeration and Air Conditioning Conference* (pp. 1–9). Purdue.
- Zogg, R., Roth, K., & Brodrick, J. (2008). Lake-source district cooling systems. *ASHRAE Journal*, 50(2), 55– 55.
- Éditeur officiel du Québec (2014). Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection.

ANNEXE A Données cartographiques

Légende

Zone géologique	Failles régionales
Beauharnois	— ID
Black Riv.	— IV
Cairnside	— NO
Covey Hill	
Deschambault	
G. Mont-Royal	
Laval	
Montérég.	
Nicolet	
Ordovicien	
Rosemont	
St-Michel	
Tétreauville	
Trenton	
Utica	

Plis régionaux

- A
- S

Cours d'eau

- Fleuve

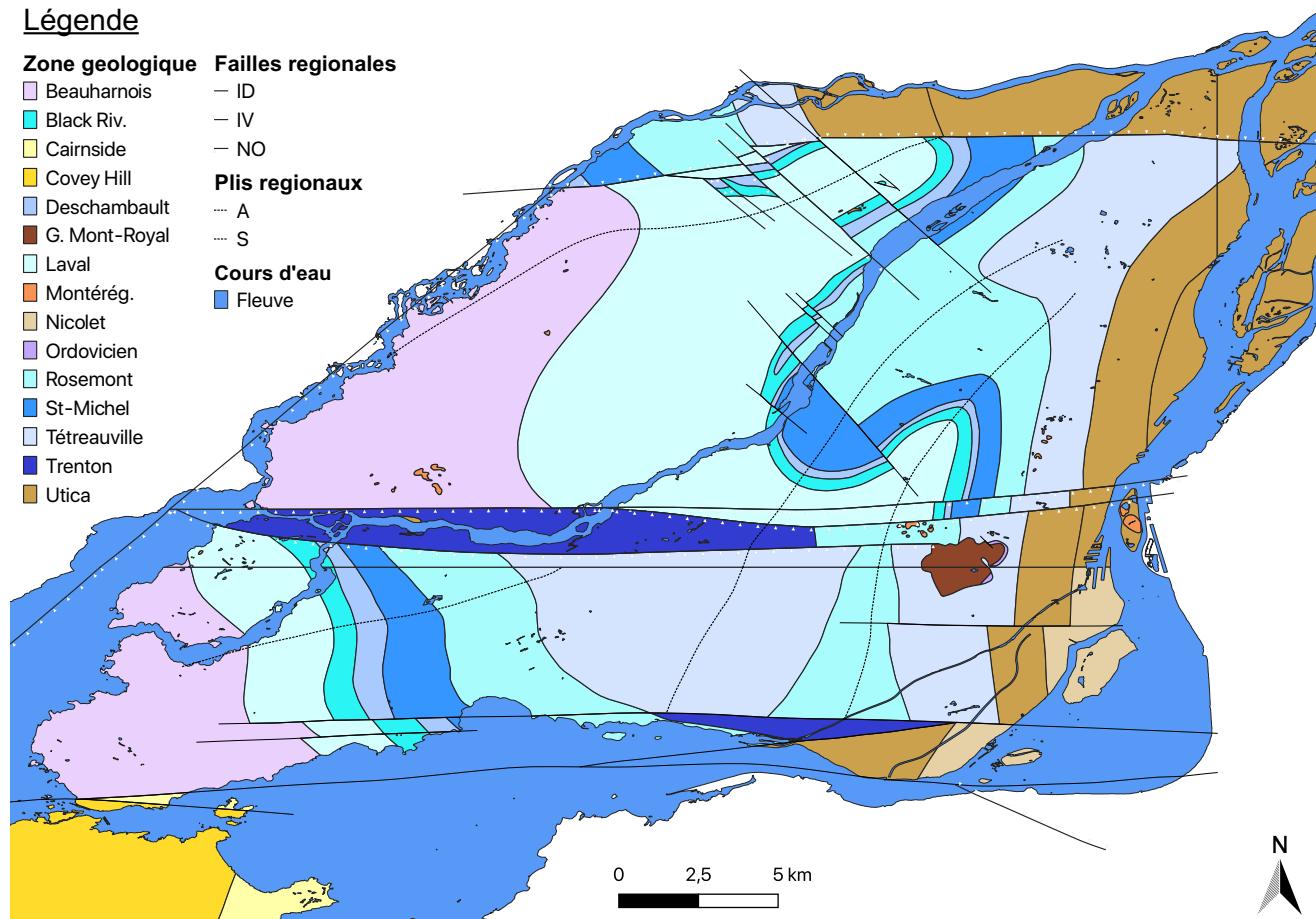


Figure A.1 Principales formations géologiques affleurantes sur l'île. Les différentes failles présentes (normales et inverse) ainsi que les plis géologiques observables (anticlinal et synclinal) sont également identifié. Adapté de Globensky (1987).

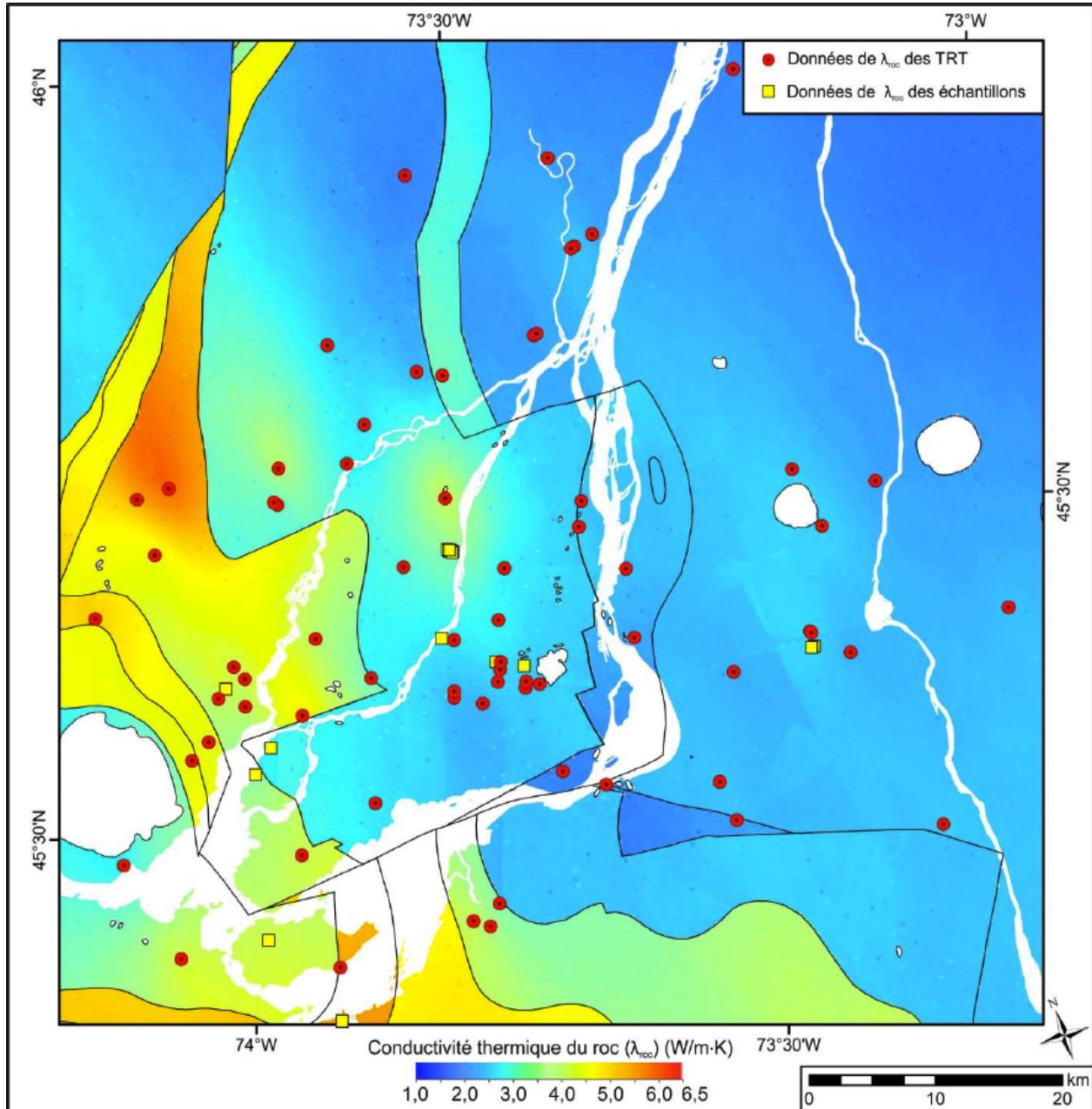


Figure A.2 Simulations géostatistique de la conductivité thermique du roc de l'île de Montréal et ses environs. Tiré de Bédard et al. (2018).

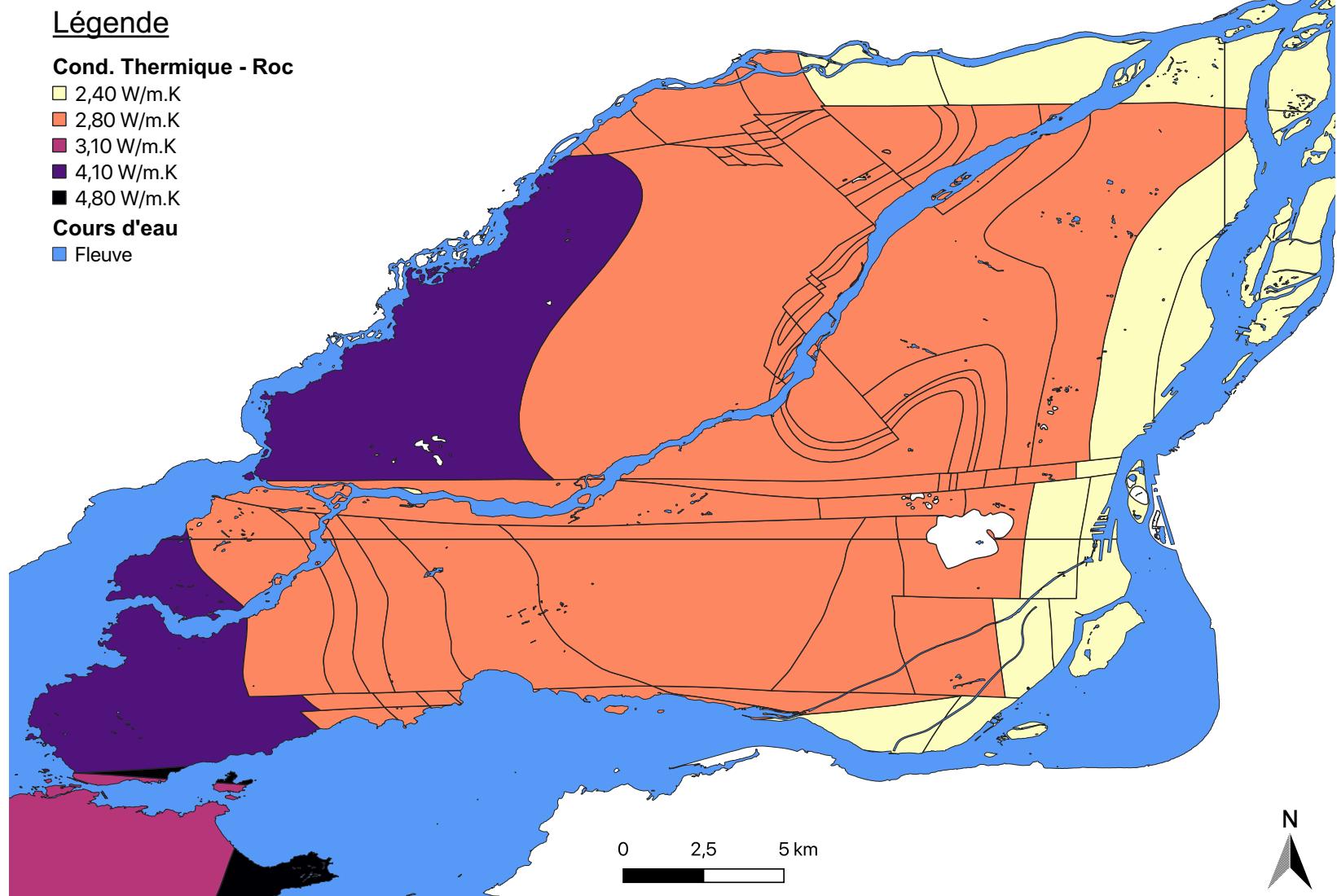


Figure A.3 Conductivité thermique théorique du roc de l'île de Montréal et ses environs.

Légende

Dépôts Meubles

- Till Basal (Ép. Malone)
- Till Intermédiaire (Ép. Malone)
- Till Supérieur (Ép. Fort Covington)
- Till Non-différencié
- Séd. Eaux Profondes (Ép. Mer de Champlain)
- Séd. Eaux Profondes (Ép. Mer de Champlain)
- Séd. Littoraux (Ép. Mer de Champlain)
- Sable (Ép. Fluviaire)
- Argile, limon (Ép. Fluviaire)
- Tourbe, boue organique
- Remblai
- Aucune information
- Aucune information
- Roche en place
- Montérégien

Cours d'eau

- Fleuve

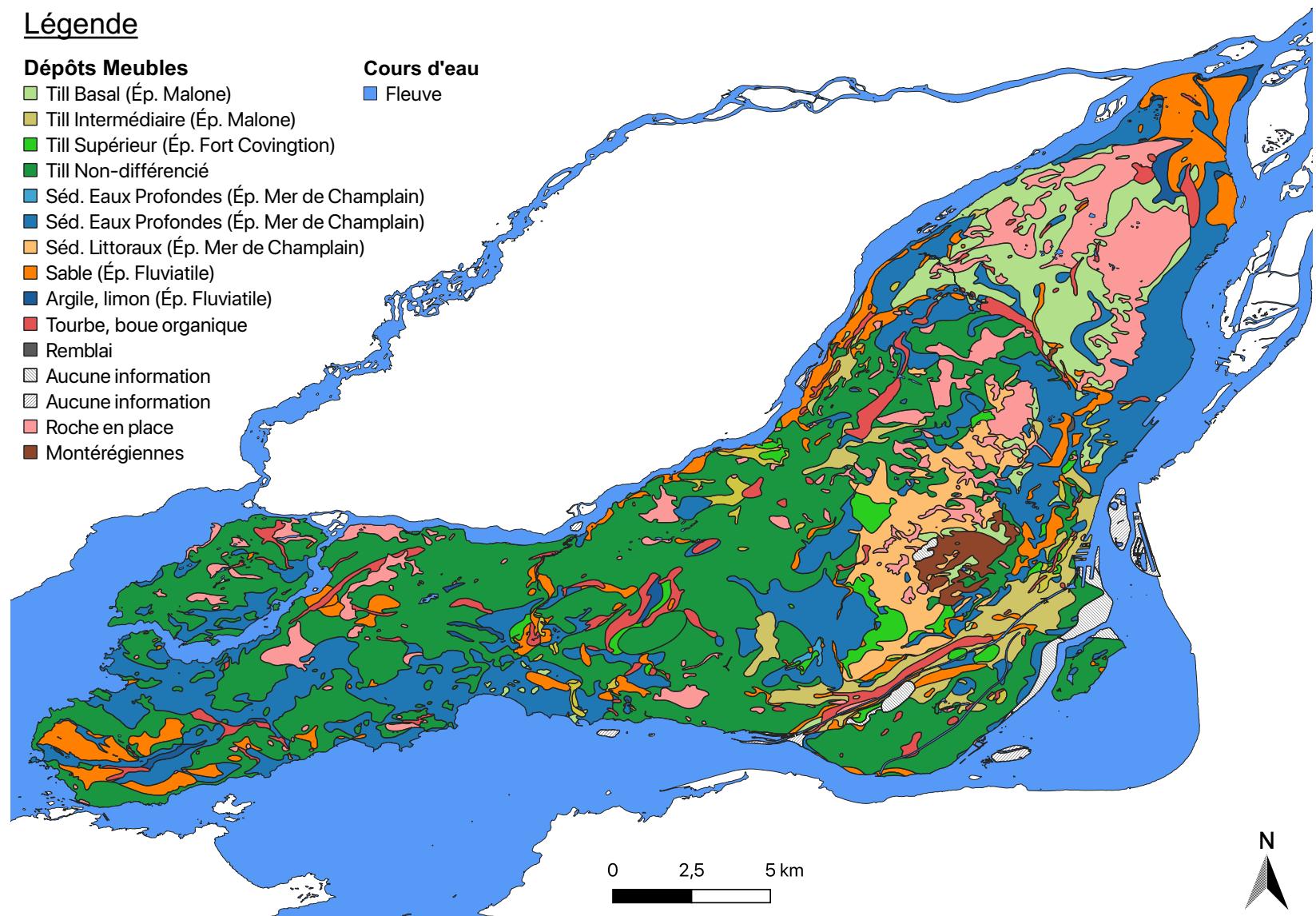


Figure A.4 Géologie des dépôts meubles de l'île de Montréal et ses environs. Adapté de Prest & Keyser (1982).

Légende

Épaisseur Dép. Meubles Cours d'eau

- 0,0 m - 3,0 m
- 3,0 m - 4,0 m
- 4,0 m - 5,0 m
- 5,0 m - 6,0 m
- 6,0 m - 7,0 m
- 7,0 m - 8,0 m
- 8,0 m - 9,0 m
- 9,0 m - 9,0 m
- 9,0 m - 11,0 m
- 11,0 m - 12,0 m
- 12,0 m - 13,0 m
- 13,0 m - 15,0 m
- 15,0 m - 18,0 m
- 18,0 m - 24,0 m
- 24,0 m - 65,0 m

■ Fleuve

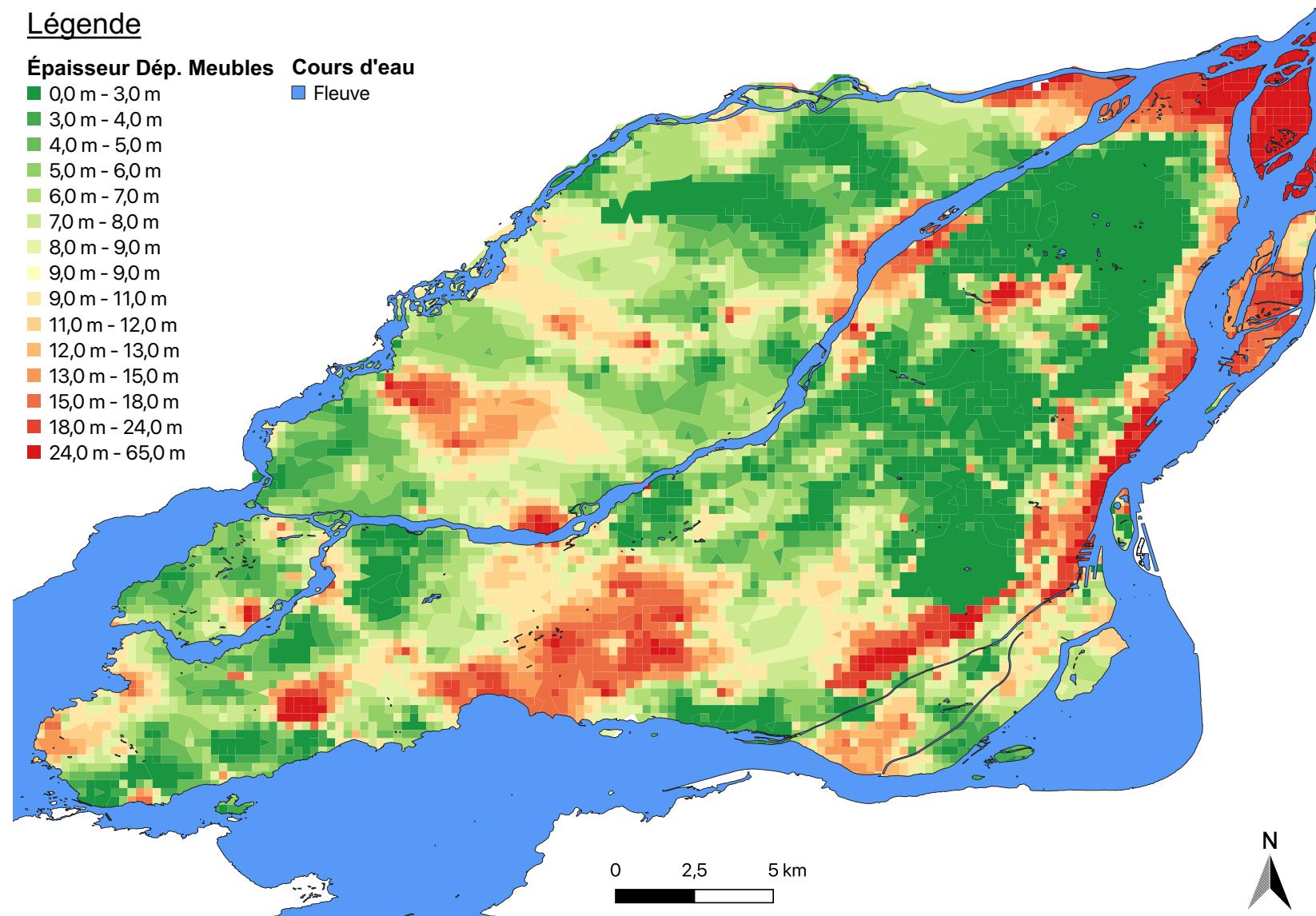


Figure A.5 Épaisseur des dépôts meubles sur l'île de Montréal et ses environs. Adapté de Prest & Keyser (1982).

Légende

Carte Isopière

- 0 m - 15 m
- 15 m - 23 m
- 23 m - 30 m
- 30 m - 30 m
- 30 m - 38 m
- 38 m - 46 m
- 46 m - 55 m
- 55 m - 78 m
- 78 m - 122 m

Prof. Nappe (m)

- -19,82 m - -8,62 m
- -8,62 m - -6,10 m
- -6,10 m - -5,49 m
- -5,49 m - -3,96 m
- -3,96 m - -3,05 m
- -3,05 m - -2,07 m

Cours d'eau

- Ligne de partage des eaux
- Ligne d'écoulement
- Fleuve

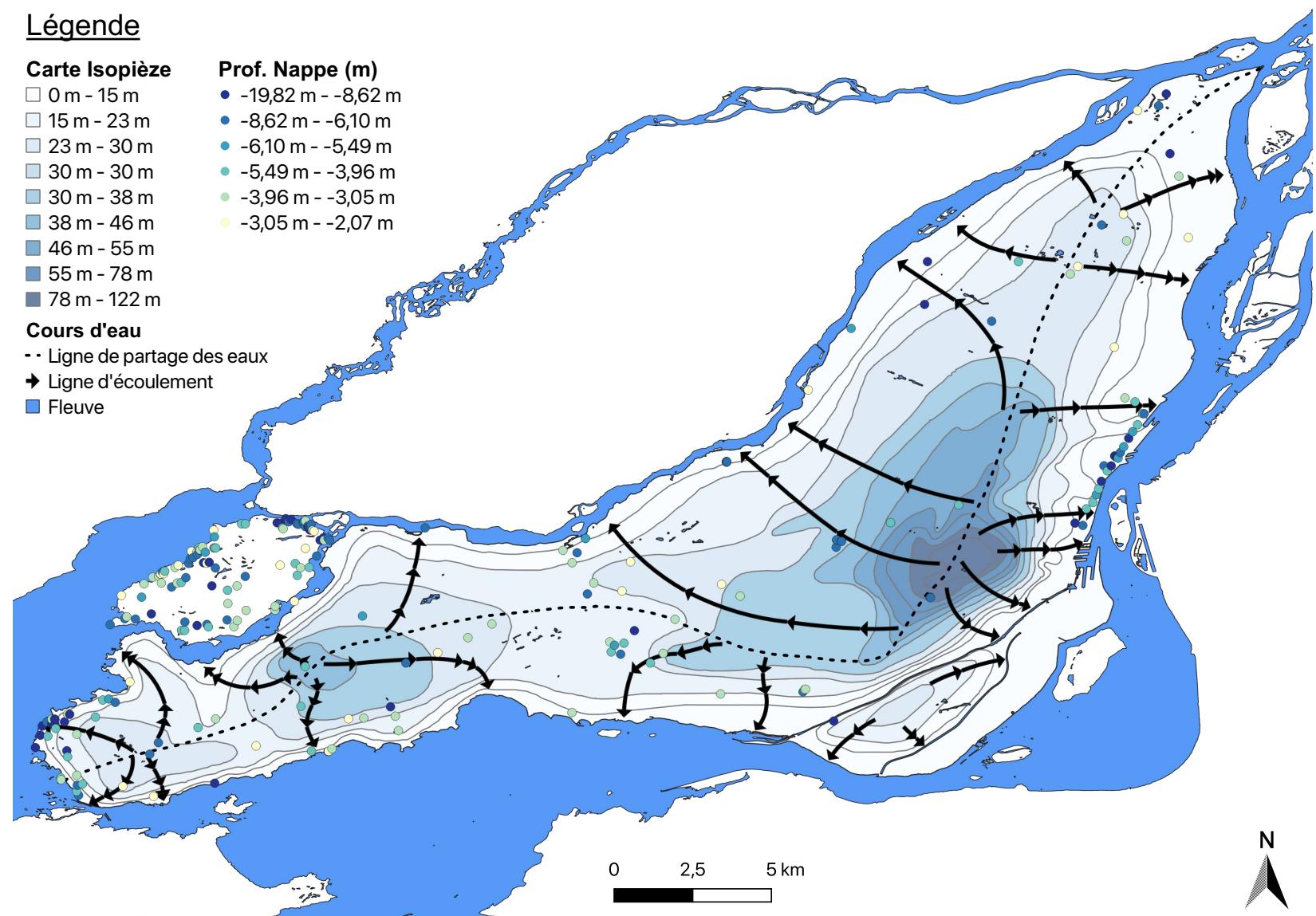


Figure A.6 Carte piézométrique de l'île de Montréal. Adapté de Bériault & Simard (1978).

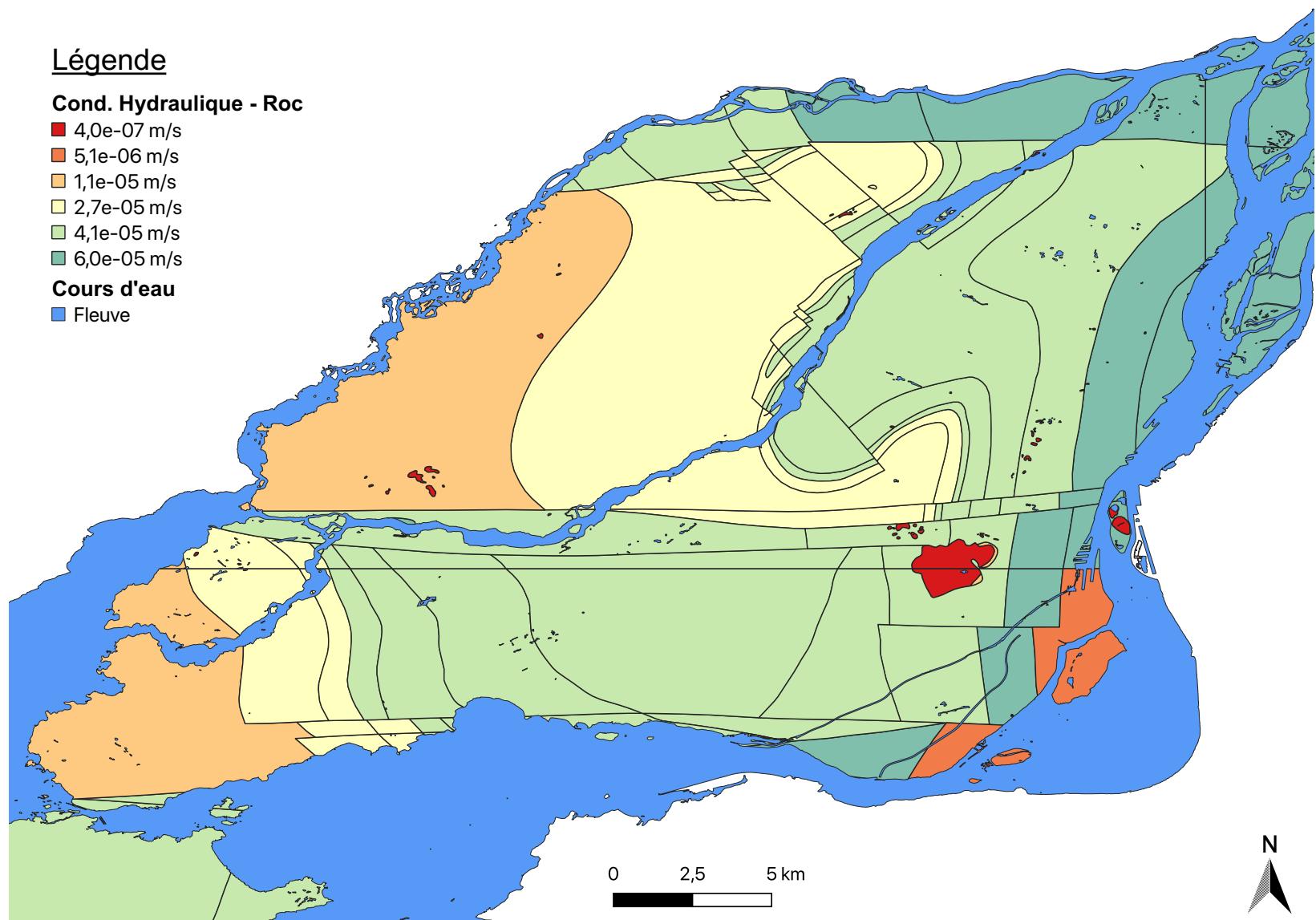


Figure A.7 Conductivité hydraulique théorique du roc de l'île de Montréal et ses environs.

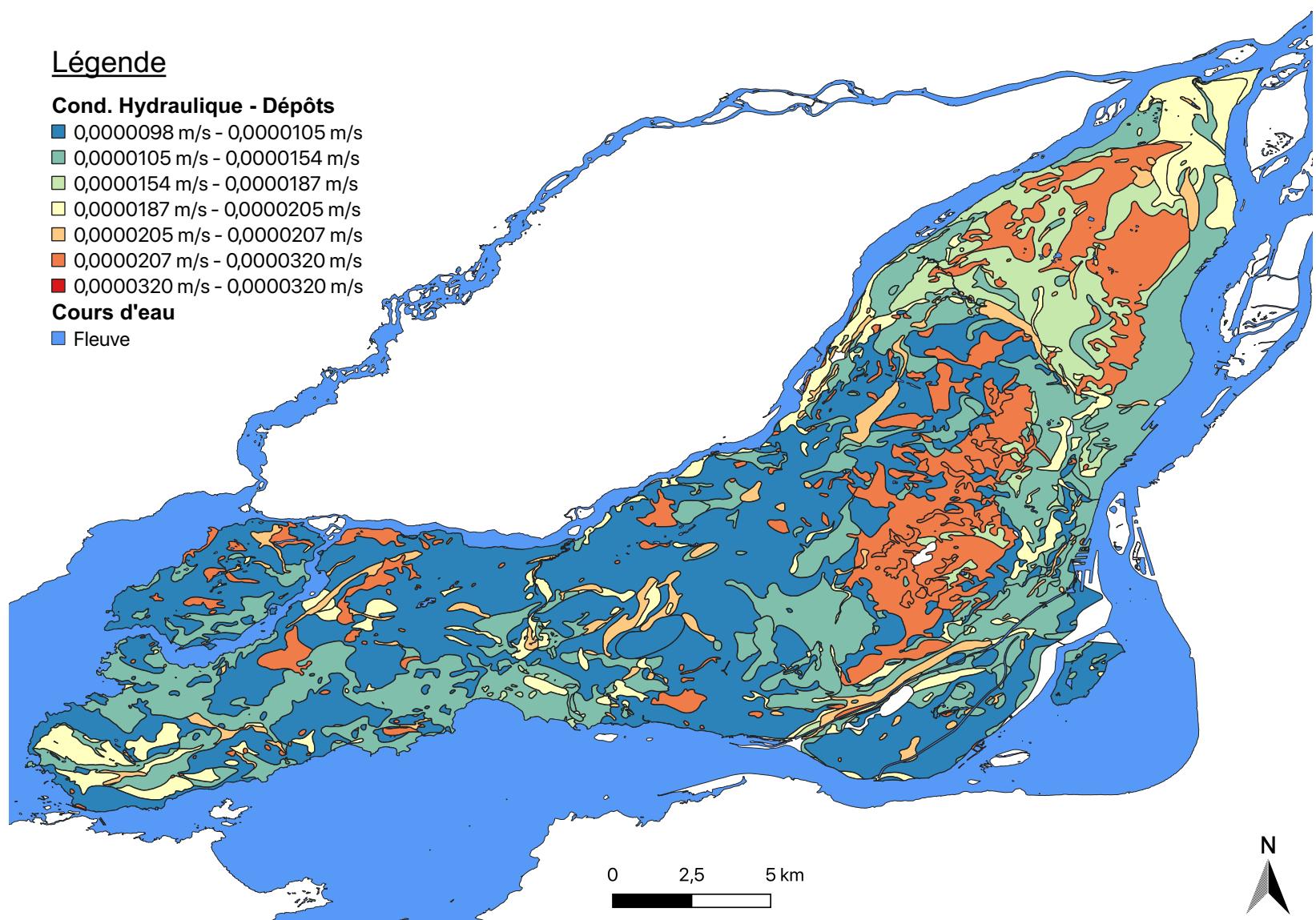


Figure A.8 Conductivité hydraulique théorique des dépôts meubles de l'île de Montréal et ses environs.



Métro



Figure A.9 Cartographie du réseau de transport souterrain de la Ville de Montréal. Tiré de Société de Transport de Montréal (2021a).



Figure A.10 Cartographie de l'extension de la ligne bleue du réseau de transport souterrain de la Ville de Montréal. Tiré de Société de Transport de Montréal (2021b).

Légende

Égoûts

- Classe I
- Classe II
- Classe III

Cours d'eau

- Fleuve

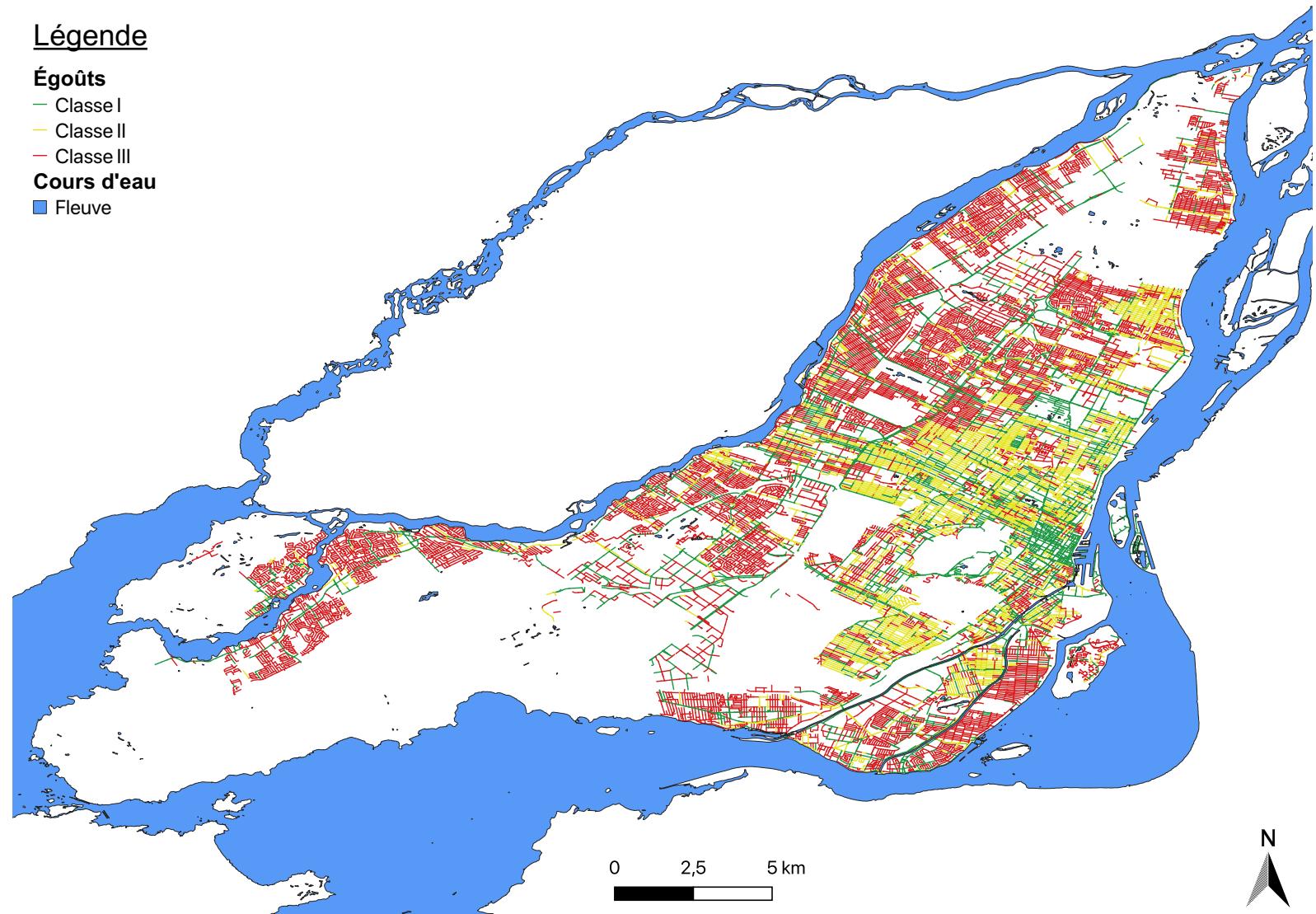


Figure A.11 Cartographie du réseau d'égouts de la ville de Montréal en fonction de la hiérarchie (I,II et III) des canalisations.

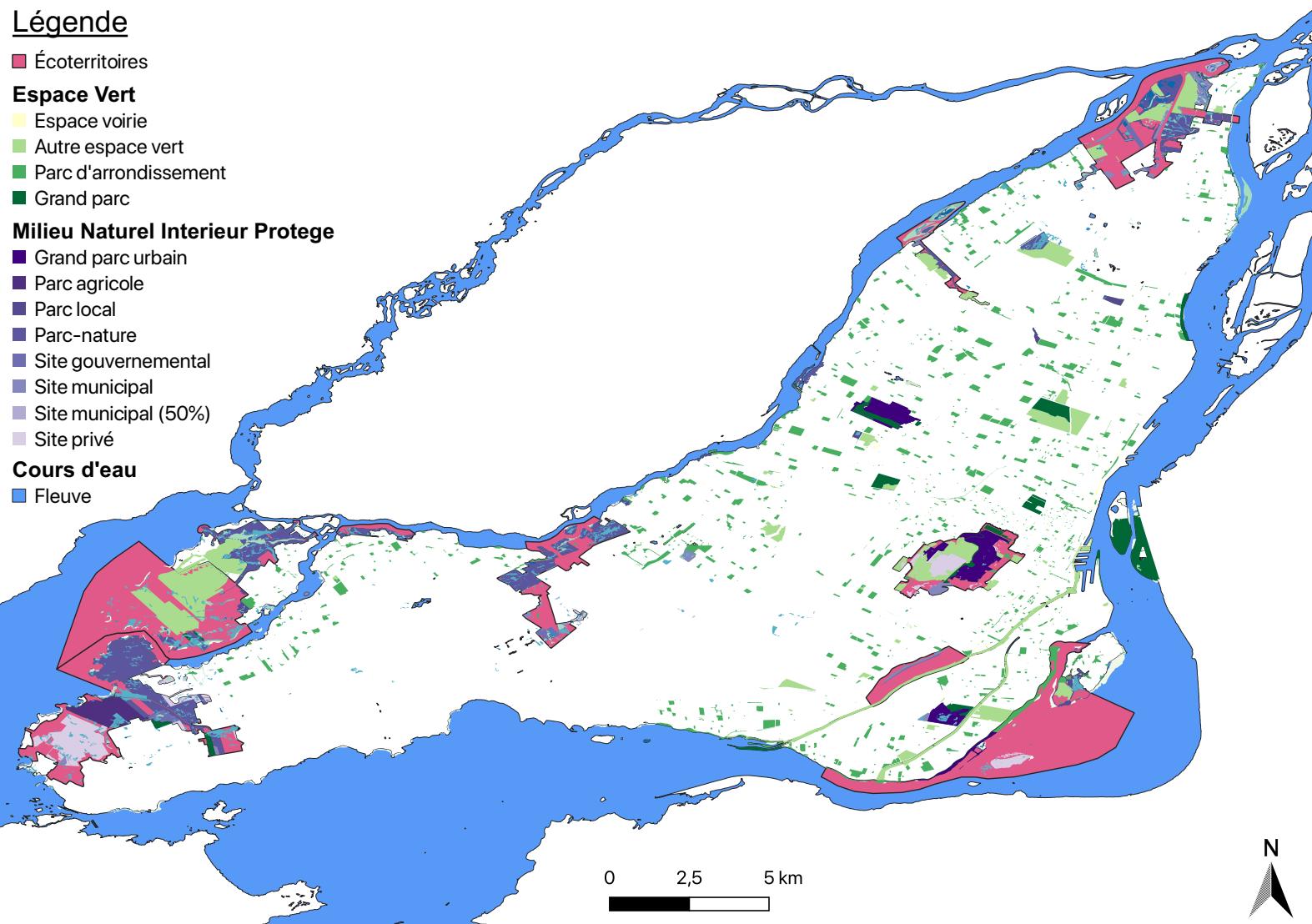


Figure A.12 Cartographie des écoterritoires, des espaces verts et des milieux naturels protégés en fonction de leurs hiérarchies associées.

ANNEXE B Répertoire des bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal

Tableau B.1 – Identification et caractéristiques énergétiques générales des bâtiments du parc immobilier de la Ville de Montréal

# Id.	Eau Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.	Puiss.	Superf.	Inten.	Éner.	Eau Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.
	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[kW]	[m ²]	[GJ/m ²]		[kgCO ₂ eq]						
0001	0,00	10985,12	172,21	0,00	0,00	1167,39	12 324,73	390,81	22813,51	0,54	0,00	7 933,70	8 628,21	0,00	0,00	58 488,27	75 050,19	
0002	0,00	13405,11	0,00	0,00	0,00	6618,57	20 023,68	634,95	25394,60	0,79	0,00	9 681,47	0,00	0,00	0,00	331 601,89	341 283,35	
0012	0,00	7159,07	0,00	0,00	0,00	2096,75	9 255,82	293,50	14051,97	0,66	0,00	5 170,44	0,00	0,00	0,00	105 050,58	110 221,02	
0025	0,00	3994,92	7255,61	0,00	0,00	0,00	11 250,53	356,75	16057,41	0,70	0,00	2 885,22	363 518,66	0,00	0,00	0,00	366 403,88	
0028	0,00	562,20	493,08	0,00	0,00	0,00	1 055,28	33,46	916,81	1,15	0,00	406,03	24 704,24	0,00	0,00	0,00	25 110,28	
0029	0,00	244,68	596,47	0,00	0,00	0,00	841,15	26,67	916,81	0,92	0,00	176,71	29 884,28	0,00	0,00	0,00	30 061,00	
0030	0,00	535,14	514,31	0,00	0,00	0,00	1 049,45	33,28	908,94	1,15	0,00	386,49	25 767,89	0,00	0,00	0,00	26 154,38	
0032	0,00	1139,65	1160,35	0,00	0,00	0,00	2 300,00	72,93	1251,52	1,84	0,00	823,08	58 135,41	0,00	0,00	0,00	58 958,50	
0036	0,00	23,00	279,93	0,00	0,00	0,00	302,93	9,61	450,96	0,67	0,00	16,61	14 024,86	0,00	0,00	0,00	14 041,47	
0037	0,00	398,24	1418,53	0,00	0,00	0,00	1 816,76	57,61	1164,86	1,56	0,00	287,61	71 070,61	0,00	0,00	0,00	71 358,23	
0038	0,00	808,32	1135,34	0,00	0,00	0,00	1 943,67	61,63	1581,12	1,23	0,00	583,79	56 882,69	0,00	0,00	0,00	57 466,48	
0044	0,00	1072,72	3652,34	0,00	0,00	0,00	4 725,06	149,83	4062,66	1,16	0,00	774,74	182 988,51	0,00	0,00	0,00	183 763,25	
0054	0,00	36,06	63,59	0,00	0,00	0,00	99,65	3,16	94,59	1,05	0,00	26,05	3 185,82	0,00	0,00	0,00	3 211,87	
0057	0,00	1055,75	2493,36	0,00	0,00	0,00	3 549,10	112,54	5707,11	0,62	0,00	762,48	124 921,44	0,00	0,00	0,00	125 683,92	
0059	0,00	92,89	220,92	0,00	0,00	0,00	313,81	9,95	250,77	1,25	0,00	67,09	11 068,55	0,00	0,00	0,00	11 135,64	
0062	0,00	427,81	930,19	0,00	0,00	0,00	1 358,00	43,06	1471,33	0,92	0,00	308,97	46 604,05	0,00	0,00	0,00	46 913,02	
0064	0,00	3224,39	1149,66	0,00	0,00	0,00	4 374,05	138,70	3772,41	1,16	0,00	2 328,73	57 599,89	0,00	0,00	0,00	59 928,62	
0065	0,00	1011,11	1317,41	0,00	0,00	0,00	2 328,52	73,84	1772,19	1,31	0,00	730,25	66 004,47	0,00	0,00	0,00	66 734,72	
0068	0,00	1570,02	1724,98	0,00	0,00	0,00	3 295,00	104,48	2259,02	1,46	0,00	1 133,90	86 424,70	0,00	0,00	0,00	87 558,60	
0076	0,00	363,89	0,00	0,00	97,17	0,00	461,07	14,62	294,05	1,57	0,00	262,81	0,00	0,00	6 919,65	0,00	7 182,46	
0077	0,00	342,42	1853,29	0,00	0,00	0,00	2 195,71	69,63	2192,26	1,00	0,00	247,31	92 852,91	0,00	0,00	0,00	93 100,21	
0079	0,00	267,35	567,98	0,00	0,00	0,00	835,33	26,49	1346,26	0,62	0,00	193,08	28 456,91	0,00	0,00	0,00	28 649,99	
0080	0,00	489,23	0,00	0,00	137,23	0,00	626,46	19,86	291,99	2,15	0,00	353,33	0,00	0,00	9 772,06	0,00	10 125,39	
0084	0,00	1579,57	1551,66	0,00	0,00	0,00	3 131,23	99,29	3437,88	0,91	0,00	1 140,80	77 740,86	0,00	0,00	0,00	78 881,66	
0087	789,54	3984,99	0,00	0,00	0,00	2590,77	7 365,30	233,55	18788,64	0,39	548,29	2 878,05	0,00	0,00	0,00	129 802,09	133 228,43	
0088	0,00	259,76	0,00	0,00	0,00	0,00	259,76	8,24	14293,88	0,02	0,00	0,00	13 014,36	0,00	0,00	0,00	13 014,36	
0091	0,00	8340,55	0,00	0,00	0,00	0,00	8 340,55	264,48	2158,68	3,86	0,00	0,00	417 876,15	0,00	0,00	0,00	417 876,15	
0092	0,00	39,02	0,00	0,00	0,00	0,00	39,02	1,24	688,04	0,06	0,00	0,00	1 955,12	0,00	0,00	0,00	1 955,12	
0097	0,00	264,51	0,00	353,75	0,00	0,00	618,25	19,60	438,52	1,41	0,00	191,03	0,00	20 181,58	0,00	0,00	20 372,61	
0100	0,00	1276,56	690,47	0,00	0,00	0,00	1 967,03	62,37	1240,78	1,59	0,00	921,96	34 593,91	0,00	0,00	0,00	35 515,87	

# Id.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.	Puiss.	Superf.	Inten.	Éner.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.
	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[kW]	[m²]	[GJ/m²]		[kgCO ₂ eq]							
0101	0,00	893,49	1943,99	0,00	0,00	0,00	2 837,48	89,98	2457,38	1,15		0,00	645,30	97 397,38	0,00	0,00	0,00	0,00	98 042,68	
0104	0,00	2191,22	2462,18	0,00	0,00	0,00	4 653,40	147,56	3291,93	1,41		0,00	1 582,55	123 359,66	0,00	0,00	0,00	0,00	124 942,21	
0105	0,00	4141,44	8530,33	0,00	0,00	0,00	12 671,77	401,82	12025,06	1,05		0,00	2 991,04	427 384,25	0,00	0,00	0,00	0,00	430 375,30	
0106	0,00	459,92	947,28	0,00	0,00	0,00	1 407,20	44,62	1414,21	1,00		0,00	332,16	47 460,58	0,00	0,00	0,00	0,00	47 792,75	
0107	0,00	1419,93	2924,14	0,00	0,00	0,00	4 344,07	137,75	3250,18	1,34		0,00	1 025,50	146 504,60	0,00	0,00	0,00	0,00	147 530,10	
0109	0,00	127,43	262,53	0,00	0,00	0,00	389,96	12,37	335,62	1,16		0,00	92,03	13 153,32	0,00	0,00	0,00	0,00	13 245,36	
0110	0,00	5823,75	6384,70	0,00	0,00	0,00	12 208,45	387,13	7526,87	1,62		0,00	4 206,04	319 884,78	0,00	0,00	0,00	0,00	324 090,82	
0111	0,00	416,01	274,54	0,00	0,00	0,00	690,54	21,90	880,09	0,78		0,00	300,45	13 754,72	0,00	0,00	0,00	0,00	14 055,17	
0113	0,00	2673,28	5484,52	0,00	0,00	0,00	8 157,80	258,68	5959,29	1,37		0,00	1 930,70	274 784,23	0,00	0,00	0,00	0,00	276 714,93	
0115	0,00	215,45	115,99	0,00	0,00	0,00	331,44	10,51	293,84	1,13		0,00	155,60	5 811,05	0,00	0,00	0,00	0,00	5 966,66	
0116	0,00	251,64	1372,75	0,00	0,00	0,00	1 624,40	51,51	933,83	1,74		0,00	181,74	68 777,40	0,00	0,00	0,00	0,00	68 959,14	
0118	0,00	37,77	179,31	0,00	0,00	0,00	217,08	6,88	257,90	0,84		0,00	27,28	8 983,97	0,00	0,00	0,00	0,00	9 011,24	
0121	0,00	590,01	1000,02	0,00	0,00	0,00	1 590,02	50,42	1639,37	0,97		0,00	426,11	50 102,71	0,00	0,00	0,00	0,00	50 528,83	
0129	0,00	1029,51	175,62	0,00	0,00	0,00	1 205,13	38,21	244,75	4,92		0,00	743,53	8 798,88	0,00	0,00	0,00	0,00	9 542,41	
0132	0,00	54,46	138,00	0,00	0,00	0,00	192,46	6,10	257,89	0,75		0,00	39,33	6 914,19	0,00	0,00	0,00	0,00	6 953,52	
0133	0,00	456,24	777,92	0,00	0,00	0,00	1 234,16	39,13	1884,12	0,66		0,00	329,51	38 975,13	0,00	0,00	0,00	0,00	39 304,63	
0135	0,00	201,27	183,04	0,00	0,00	0,00	384,30	12,19	314,93	1,22		0,00	145,36	9 170,38	0,00	0,00	0,00	0,00	9 315,74	
0137	0,00	165,78	0,00	0,00	150,40	0,00	316,18	10,03	793,35	0,40		0,00	119,73	0,00	0,00	10 710,06	0,00	10 829,79		
0138	0,00	3426,02	6294,81	0,00	0,00	0,00	9 720,83	308,25	7691,42	1,26		0,00	2 474,35	315 380,93	0,00	0,00	0,00	0,00	317 855,28	
0148	0,00	434,64	0,00	0,00	927,15	0,00	1 361,79	43,18	1472,71	0,92		0,00	313,91	0,00	0,00	66 020,87	0,00	66 334,77		
0150	0,00	221,51	799,74	0,00	0,00	0,00	1 021,25	32,38	608,05	1,68		0,00	159,98	40 068,20	0,00	0,00	0,00	0,00	40 228,18	
0151	0,00	3053,67	348,78	0,00	0,00	0,00	3 402,45	107,89	3225,42	1,05		0,00	2 205,43	17 474,36	0,00	0,00	0,00	0,00	19 679,79	
0152	0,00	1162,82	4614,89	0,00	0,00	0,00	5 777,72	183,21	5174,01	1,12		0,00	839,82	231 214,13	0,00	0,00	0,00	0,00	232 053,95	
0153	0,00	435,75	665,29	0,00	0,00	0,00	1 101,04	34,91	617,88	1,78		0,00	314,71	33 332,27	0,00	0,00	0,00	0,00	33 646,97	
0154	0,00	14418,81	11643,62	0,00	0,00	0,00	26 062,43	826,43	20608,02	1,26		0,00	10 413,59	583 365,63	0,00	0,00	0,00	0,00	593 779,22	
0159	0,00	508,14	1297,79	0,00	0,00	0,00	1 805,93	57,27	2269,19	0,80		0,00	366,99	65 021,51	0,00	0,00	0,00	0,00	65 388,49	
0160	0,00	184,78	93,66	0,00	0,00	0,00	278,45	8,83	257,66	1,08		0,00	133,45	4 692,73	0,00	0,00	0,00	0,00	4 826,19	
0164	0,00	234,38	211,03	0,00	0,00	0,00	445,41	14,12	352,62	1,26		0,00	169,28	10 572,89	0,00	0,00	0,00	0,00	10 742,16	
0165	0,00	330,10	216,70	0,00	0,00	0,00	546,81	17,34	416,27	1,31		0,00	238,41	10 857,26	0,00	0,00	0,00	0,00	11 095,67	
0177	0,00	1755,43	654,26	0,00	0,00	0,00	2 409,69	76,41	2922,74	0,82		0,00	1 267,81	32 779,47	0,00	0,00	0,00	0,00	34 047,28	
0183	0,00	1318,43	5311,22	0,00	0,00	0,00	6 629,65	210,22	4229,03	1,57		0,00	952,20	266 101,53	0,00	0,00	0,00	0,00	267 053,73	
0190	0,00	725,98	1394,88	0,00	0,00	0,00	2 120,86	67,25	2818,07	0,75		0,00	524,32	69 886,04	0,00	0,00	0,00	0,00	70 410,36	
0191	0,00	1114,35	1395,91	0,00	0,00	0,00	2 510,25	79,60	3759,63	0,67		0,00	804,80	69 937,49	0,00	0,00	0,00	0,00	70 742,29	
0192	0,00	595,51	712,12	0,00	0,00	0,00	1 307,62	41,46	978,76	1,34		0,00	430,09	35 678,25	0,00	0,00	0,00	0,00	36 108,34	
0193	0,00	0,00	1147,25	0,00	0,00	0,00	1 147,25	36,38	7404,85	0,15		0,00	0,00	57 479,34	0,00	0,00	0,00	0,00	57 479,34	
0196	0,00	10747,44	10059,18	0,00	0,00	0,00	20 806,62	659,77	8780,11	2,37		0,00	7 762,04	503 982,50	0,00	0,00	0,00	0,00	511 744,54	
0208	0,00	1235,60	525,00	0,00	0,00	0,00	1 760,60	55,83	1038,10	1,70		0,00	892,38	26 303,61	0,00	0,00	0,00	0,00	27 195,98	
0212	0,00	116,87	66,02	0,00	0,00	0,00	182,88	5,80	169,58	1,08		0,00	84,40	3 307,50	0,00	0,00	0,00	0,00	3 391,91	

# Id.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.	Puiss.	Superf.	Inten.	Éner.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.
	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[kW]	[m²]	[GJ/m²]		[kgCO ₂ eq]							
0213	0,00	2220,67	1850,52	0,00	0,00	0,00	4 071,19	129,10	2886,35	1,41		0,00	1 603,82	92 714,14	0,00	0,00	0,00	0,00	94 317,96	
0217	0,00	861,01	1909,99	0,00	0,00	0,00	2 771,00	87,87	965,70	2,87		0,00	621,84	95 693,61	0,00	0,00	0,00	0,00	96 315,45	
0219	0,00	468,36	1178,11	0,00	0,00	0,00	1 646,47	52,21	1080,94	1,52		0,00	338,26	59 025,36	0,00	0,00	0,00	0,00	59 363,62	
0224	0,00	459,42	1046,28	0,00	0,00	0,00	1 505,69	47,75	663,30	2,27		0,00	331,80	52 420,23	0,00	0,00	0,00	0,00	52 752,03	
0225	0,00	21,77	150,44	0,00	0,00	0,00	172,21	5,46	303,78	0,57		0,00	15,72	7 537,42	0,00	0,00	0,00	0,00	7 553,14	
0230	0,00	463,95	1225,72	0,00	0,00	0,00	1 689,67	53,58	1087,76	1,55		0,00	335,07	61 410,65	0,00	0,00	0,00	0,00	61 745,72	
0240	0,00	2300,60	530,43	0,00	0,00	0,00	2 831,03	89,77	3619,45	0,78		0,00	1 661,54	26 575,64	0,00	0,00	0,00	0,00	28 237,19	
0242	0,00	36,79	128,37	0,00	0,00	0,00	165,16	5,24	245,69	0,67		0,00	26,57	6 431,44	0,00	0,00	0,00	0,00	6 458,01	
0246	0,00	6207,84	19786,19	0,00	0,00	0,00	25 994,03	824,27	9200,45	2,83		0,00	4 483,44	991 322,69	0,00	0,00	0,00	0,00	995 806,13	
0248	0,00	1839,02	5433,04	0,00	0,00	0,00	7 272,06	230,60	3847,10	1,89		0,00	1 328,18	272 204,55	0,00	0,00	0,00	0,00	273 532,74	
0256	0,00	688,72	362,10	0,00	0,00	0,00	1 050,82	33,32	1608,27	0,65		0,00	497,41	18 141,63	0,00	0,00	0,00	0,00	18 639,04	
0260	0,00	1415,95	1096,73	0,00	0,00	0,00	2 512,68	79,68	4052,20	0,62		0,00	1 022,63	54 948,08	0,00	0,00	0,00	0,00	55 970,71	
0263	0,00	3730,05	5263,25	0,00	0,00	0,00	8 993,30	285,18	5226,41	1,72		0,00	2 693,93	263 697,84	0,00	0,00	0,00	0,00	266 391,76	
0266	0,00	417,64	492,37	0,00	0,00	0,00	910,01	28,86	1429,90	0,64		0,00	301,63	24 668,74	0,00	0,00	0,00	0,00	24 970,37	
0268	0,00	99,45	339,90	0,00	0,00	0,00	439,34	13,93	552,43	0,80		0,00	71,82	17 029,38	0,00	0,00	0,00	0,00	17 101,21	
0273	0,00	341,60	1587,94	0,00	0,00	0,00	1 929,54	61,19	1531,56	1,26		0,00	246,71	79 558,35	0,00	0,00	0,00	0,00	79 805,06	
0276	0,00	1951,76	1732,38	0,00	0,00	0,00	3 684,14	116,82	3374,63	1,09		0,00	1 409,60	86 795,45	0,00	0,00	0,00	0,00	88 205,05	
0280	0,00	1474,67	2033,15	0,00	0,00	0,00	3 507,82	111,23	3208,82	1,09		0,00	1 065,04	101 864,40	0,00	0,00	0,00	0,00	102 929,44	
0285	0,00	2750,54	2142,65	0,00	0,00	0,00	4 893,19	155,16	7411,66	0,66		0,00	1 986,50	107 350,65	0,00	0,00	0,00	0,00	109 337,14	
0286	0,00	845,31	1205,35	0,00	0,00	0,00	2 050,66	65,03	1732,40	1,18		0,00	610,50	60 390,28	0,00	0,00	0,00	0,00	61 000,78	
0291	0,00	362,70	1018,00	0,00	0,00	0,00	1 380,70	43,78	869,83	1,59		0,00	261,95	51 003,67	0,00	0,00	0,00	0,00	51 265,62	
0293	0,00	215,58	2856,38	0,00	0,00	0,00	3 071,96	97,41	2761,68	1,11		0,00	155,70	143 109,58	0,00	0,00	0,00	0,00	143 265,28	
0294	0,00	0,00	218,64	0,00	0,00	0,00	218,64	6,93	216,64	1,01		0,00	0,00	10 954,08	0,00	0,00	0,00	0,00	10 954,08	
0295	0,00	419,87	2581,86	0,00	0,00	0,00	3 001,73	95,18	1927,50	1,56		0,00	303,24	129 355,81	0,00	0,00	0,00	0,00	129 659,05	
0297	0,00	3971,89	1079,76	0,00	0,00	0,00	5 051,64	160,19	3728,89	1,35		0,00	2 868,59	54 097,61	0,00	0,00	0,00	0,00	56 966,20	
0300	0,00	1423,15	1235,84	0,00	0,00	0,00	2 658,99	84,32	1785,77	1,49		0,00	1 027,83	61 917,70	0,00	0,00	0,00	0,00	62 945,53	
0302	0,00	1088,72	1847,19	0,00	0,00	0,00	2 935,91	93,10	1489,96	1,97		0,00	786,30	92 547,46	0,00	0,00	0,00	0,00	93 333,76	
0303	0,00	117,39	164,78	0,00	0,00	0,00	282,17	8,95	307,24	0,92		0,00	84,78	8 255,95	0,00	0,00	0,00	0,00	8 340,73	
0311	0,00	331,29	235,38	0,00	0,00	0,00	566,67	17,97	542,16	1,05		0,00	239,27	11 792,77	0,00	0,00	0,00	0,00	12 032,04	
0312	0,00	1536,13	3889,40	0,00	0,00	0,00	5 425,54	172,04	1931,83	2,81		0,00	1 109,43	194 865,95	0,00	0,00	0,00	0,00	195 975,38	
0314	0,00	782,78	585,73	0,00	0,00	0,00	1 368,51	43,40	2971,22	0,46		0,00	565,34	29 346,10	0,00	0,00	0,00	0,00	29 911,44	
0315	0,00	3477,99	2510,14	0,00	0,00	0,00	5 988,12	189,88	3795,70	1,58		0,00	2 511,88	125 762,22	0,00	0,00	0,00	0,00	128 274,10	
0317	0,00	1478,22	1730,76	0,00	0,00	0,00	3 208,98	101,76	3226,38	0,99		0,00	1 067,60	86 714,20	0,00	0,00	0,00	0,00	87 781,80	
0318	0,00	126,32	1180,97	0,00	0,00	0,00	1 307,29	41,45	1923,11	0,68		0,00	91,23	59 168,88	0,00	0,00	0,00	0,00	59 260,11	
0321	0,00	2179,65	190,61	0,00	0,00	0,00	2 370,26	75,16	2070,06	1,15		0,00	1 574,19	9 549,86	0,00	0,00	0,00	0,00	11 124,06	
0323	0,00	333,56	872,37	0,00	0,00	0,00	1 205,93	38,24	676,91	1,78		0,00	240,91	43 707,16	0,00	0,00	0,00	0,00	43 948,06	
0324	0,00	95,76	167,08	0,00	0,00	0,00	262,84	8,33	303,28	0,87		0,00	69,16	8 371,18	0,00	0,00	0,00	0,00	8 440,34	
0326	0,00	208,46	275,81	0,00	0,00	0,00	484,27	15,36	293,03	1,65		0,00	150,55	13 818,70	0,00	0,00	0,00	0,00	13 969,25	

# Id.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot. [GJ/an]	Puiss. [kW]	Superf. [m ²]	Inten. [GJ/m ²]	Éner.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot. [kgCO ₂ eq]
	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]						[kgCO ₂ eq]							
0327	0,00	521,80	264,10	0,00	0,00	0,00	785,90	24,92	501,90	1,57	0,00	376,86	13 231,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13 608,58
0328	0,00	146,50	190,23	0,00	0,00	0,00	336,74	10,68	439,47	0,77	0,00	105,81	9 531,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9 636,88
0334	0,00	853,08	2517,39	0,00	0,00	0,00	3 370,46	106,88	1404,52	2,40	0,00	616,11	126 125,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	126 741,49
0337	0,00	1768,94	3508,25	0,00	0,00	0,00	5 277,19	167,34	2076,61	2,54	0,00	1 277,56	175 769,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	177 047,20
0346	0,00	314,51	1165,16	0,00	0,00	0,00	1 479,68	46,92	1517,17	0,98	0,00	227,15	58 376,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	58 603,84
0347	0,00	885,61	771,03	0,00	0,00	0,00	1 656,64	52,53	1268,20	1,31	0,00	639,61	38 630,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	39 269,80
0353	0,00	1141,40	395,59	0,00	0,00	0,00	1 536,99	48,74	2044,76	0,75	0,00	824,34	19 819,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20 643,93
0365	0,00	563,31	1815,90	0,00	0,00	0,00	2 379,21	75,44	1972,75	1,21	0,00	406,83	90 979,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91 386,64
0370	0,00	240,99	0,00	0,00	564,20	0,00	805,19	25,53	362,39	2,22	0,00	174,05	0,00	0,00	40 175,71	0,00	0,00	0,00	0,00	40 349,75
0373	0,00	693,72	706,25	0,00	0,00	0,00	1 399,98	44,39	1378,14	1,02	0,00	501,02	35 384,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35 885,60
0376	0,00	432,84	1739,81	0,00	0,00	0,00	2 172,65	68,89	1439,82	1,51	0,00	312,61	87 167,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87 479,94
0377	0,00	357,15	1101,91	0,00	0,00	0,00	1 459,06	46,27	1220,43	1,20	0,00	257,94	55 207,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55 465,71
0390	0,00	60,85	254,97	0,00	0,00	0,00	315,82	10,01	304,26	1,04	0,00	43,95	12 774,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12 818,36
0405	0,00	56,48	0,00	0,00	325,03	0,00	381,51	12,10	343,83	1,11	0,00	40,79	0,00	0,00	23 144,99	0,00	0,00	0,00	0,00	23 185,78
0407	0,00	856,77	622,49	0,00	0,00	0,00	1 479,27	46,91	2483,72	0,60	0,00	618,78	31 188,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31 806,85
0409	0,00	730,37	939,71	0,00	0,00	0,00	1 670,08	52,96	1737,06	0,96	0,00	527,49	47 080,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47 608,40
0413	0,00	223,70	1397,62	0,00	0,00	0,00	1 621,32	51,41	1851,32	0,88	0,00	161,56	70 023,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70 184,66
0418	0,00	410,41	0,00	0,00	903,78	0,00	1 314,20	41,67	901,93	1,46	0,00	296,41	0,00	0,00	64 357,06	0,00	0,00	0,00	0,00	64 653,47
0419	0,00	493,35	936,72	0,00	0,00	0,00	1 430,07	45,35	1584,14	0,90	0,00	356,31	46 931,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47 287,82
0421	0,00	582,80	432,24	0,00	0,00	0,00	1 015,04	32,19	1068,62	0,95	0,00	420,91	21 656,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22 076,97
0422	0,00	2019,99	4083,44	0,00	0,00	0,00	6 103,44	193,54	7055,53	0,87	0,00	1 458,89	204 587,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	206 046,50
0431	0,00	738,65	0,00	0,00	1891,76	0,00	2 630,40	83,41	4387,96	0,60	0,00	533,47	0,00	0,00	134 709,03	0,00	0,00	0,00	0,00	135 242,49
0434	0,00	2964,39	9496,64	0,00	0,00	0,00	12 461,02	395,14	9117,30	1,37	0,00	2 140,95	475 798,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	477 938,95
0450	1800,48	11726,31	0,00	0,00	0,00	5898,38	19 425,16	615,97	24972,54	0,78	1 250,33	8 469,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	295 518,86	305 238,19
0455	0,00	1514,93	1968,97	0,00	0,00	0,00	3 483,90	110,47	3415,37	1,02	0,00	1 094,11	98 648,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99 743,08
0465	0,00	222,58	56,03	0,00	0,00	0,00	278,61	8,83	294,76	0,95	0,00	160,75	2 807,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 968,04
0472	0,00	946,07	2252,14	0,00	0,00	0,00	3 198,21	101,41	1499,56	2,13	0,00	683,27	112 836,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	113 519,60
0478	0,00	795,09	1067,24	0,00	0,00	0,00	1 862,33	59,05	3131,64	0,59	0,00	574,23	53 470,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54 045,01
0480	0,00	3298,25	2785,59	0,00	0,00	0,00	6 083,84	192,92	3557,09	1,71	0,00	2 382,07	139 563,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	141 945,14
0481	0,00	3338,33	1360,15	0,00	0,00	0,00	4 698,47	148,99	3405,23	1,38	0,00	2 411,01	68 145,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70 556,83
0482	0,00	4649,54	2152,82	0,00	0,00	0,00	6 802,36	215,70	3443,46	1,98	0,00	3 358,00	107 860,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	111 218,17
0490	0,00	1680,54	1960,98	0,00	0,00	0,00	3 641,52	115,47	1680,88	2,17	0,00	1 213,72	98 248,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99 462,32
0528	0,00	4288,16	1685,21	0,00	0,00	0,00	5 973,37	189,41	3922,46	1,52	0,00	3 097,00	84 432,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87 529,00
0551	0,00	4937,45	3581,14	0,00	0,00	0,00	8 518,59	270,12	5145,93	1,66	0,00	3 565,93	179 421,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	182 987,44
0558	0,00	324,10	513,80	0,00	0,00	0,00	837,90	26,57	742,57	1,13	0,00	234,07	25 742,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25 976,34
0569	0,00	228,91	980,54	0,00	0,00	0,00	1 209,45	38,35	1921,51	0,63	0,00	165,32	49 126,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49 292,28
0570	0,00	2678,57	0,00	0,00	0,00	784,88	3 463,44	109,83	5693,37	0,61	0,00	1 934,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	39 323,60	41 258,13
0575	0,00	7044,74	12171,80	0,00	0,00	0,00	19 216,54	609,35	17039,02	1,13	0,00	5 087,86	609 828,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	614 916,37

# Id.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot. [GJ/an]	Puiss. [kW]	Superf. [m ²]	Inten. [GJ/m ²]	Éner.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot. [kgCO ₂ eq]
	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]						[kgCO ₂ eq]							
0578	0,00	1455,83	1025,96	0,00	0,00	0,00	2 481,79	78,70	3872,15	0,64	0,00	1 051,43	51 402,33	0,00	0,00	0,00	0,00	52 453,76		
0601	0,00	4892,53	1724,96	0,00	0,00	0,00	6 617,49	209,84	4162,06	1,59	0,00	3 533,49	86 423,75	0,00	0,00	0,00	0,00	89 957,24		
0608	0,00	4573,94	3581,37	0,00	0,00	0,00	8 155,30	258,60	3917,41	2,08	0,00	3 303,40	179 432,70	0,00	0,00	0,00	0,00	182 736,10		
0609	0,00	3891,90	3713,68	0,00	0,00	0,00	7 605,58	241,17	3637,95	2,09	0,00	2 810,82	186 061,95	0,00	0,00	0,00	0,00	188 872,77		
0610	0,00	2791,58	806,49	0,00	0,00	0,00	3 598,07	114,09	3620,06	0,99	0,00	2 016,14	40 406,49	0,00	0,00	0,00	0,00	42 422,63		
0626	0,00	1025,34	3463,36	0,00	0,00	0,00	4 488,71	142,34	2589,52	1,73	0,00	740,53	173 520,47	0,00	0,00	0,00	0,00	174 260,99		
0631	0,00	5295,87	2631,36	0,00	0,00	0,00	7 927,23	251,37	11340,68	0,70	0,00	3 824,80	131 835,63	0,00	0,00	0,00	0,00	135 660,43		
0640	0,00	117,00	566,09	0,00	0,00	0,00	683,09	21,66	1023,71	0,67	0,00	84,50	28 362,18	0,00	0,00	0,00	0,00	28 446,68		
0650	0,00	227,87	247,88	0,00	0,00	0,00	475,75	15,09	961,61	0,49	0,00	164,57	12 419,23	0,00	0,00	0,00	0,00	12 583,80		
0667	0,00	879,69	458,16	0,00	0,00	0,00	1 337,85	42,42	638,59	2,10	0,00	635,33	22 954,53	0,00	0,00	0,00	0,00	23 589,86		
0669	0,00	1575,94	1396,84	0,00	0,00	0,00	2 972,77	94,27	1582,26	1,88	0,00	1 138,18	69 984,00	0,00	0,00	0,00	0,00	71 122,17		
0712	0,00	1699,28	2496,06	0,00	0,00	0,00	4 195,33	133,03	3896,20	1,08	0,00	1 227,26	125 056,79	0,00	0,00	0,00	0,00	126 284,05		
0745	0,00	2475,36	2193,73	0,00	0,00	0,00	4 669,09	148,06	2888,27	1,62	0,00	1 787,76	109 909,63	0,00	0,00	0,00	0,00	111 697,39		
0747	0,00	696,04	1931,86	0,00	0,00	0,00	2 627,90	83,33	5591,39	0,47	0,00	502,70	96 789,34	0,00	0,00	0,00	0,00	97 292,03		
0755	0,00	460,93	1597,39	0,00	0,00	0,00	2 058,32	65,27	2818,73	0,73	0,00	332,89	80 032,18	0,00	0,00	0,00	0,00	80 365,07		
0761	0,00	2160,32	3715,62	0,00	0,00	0,00	5 875,94	186,32	3530,74	1,66	0,00	1 560,23	186 158,96	0,00	0,00	0,00	0,00	187 719,19		
0762	0,00	875,76	1169,68	0,00	0,00	0,00	2 045,44	64,86	2118,19	0,97	0,00	632,49	58 602,79	0,00	0,00	0,00	0,00	59 235,28		
0763	0,00	10470,63	3057,60	0,00	0,00	0,00	13 528,23	428,98	8701,07	1,55	0,00	7 562,12	153 190,98	0,00	0,00	0,00	0,00	160 753,11		
0795	0,00	2364,99	1876,94	0,00	0,00	0,00	4 241,93	134,51	4528,40	0,94	0,00	1 708,05	94 038,05	0,00	0,00	0,00	0,00	95 746,10		
0867	0,00	306,09	922,55	0,00	0,00	0,00	1 228,63	38,96	1152,06	1,07	0,00	221,06	46 221,15	0,00	0,00	0,00	0,00	46 442,21		
0868	0,00	7073,34	10558,29	0,00	0,00	0,00	17 631,63	559,10	14178,23	1,24	0,00	5 108,53	528 988,58	0,00	0,00	0,00	0,00	534 097,11		
0869	0,00	959,13	1207,60	0,00	0,00	0,00	2 166,73	68,71	2766,13	0,78	0,00	692,71	60 502,66	0,00	0,00	0,00	0,00	61 195,37		
0879	0,00	202,45	610,03	0,00	0,00	0,00	812,48	25,76	9239,71	0,09	0,00	146,21	30 563,71	0,00	0,00	0,00	0,00	30 709,92		
0889	0,00	4644,20	7607,65	0,00	0,00	0,00	12 251,84	388,50	4781,30	2,56	0,00	3 354,14	381 156,46	0,00	0,00	0,00	0,00	384 510,60		
0891	0,00	6471,42	6335,28	0,00	0,00	0,00	12 806,69	406,10	18317,50	0,70	0,00	4 673,80	317 408,37	0,00	0,00	0,00	0,00	322 082,17		
0976	0,00	4164,20	3530,25	0,00	0,00	0,00	7 694,45	243,99	6970,00	1,10	0,00	3 007,48	176 871,82	0,00	0,00	0,00	0,00	179 879,30		
0978	0,00	2149,31	1627,63	0,00	0,00	0,00	3 776,94	119,77	6349,39	0,59	0,00	1 552,28	81 547,26	0,00	0,00	0,00	0,00	83 099,54		
0986	0,00	2230,34	494,47	0,00	0,00	0,00	2 724,81	86,40	3416,14	0,80	0,00	1 610,80	24 773,72	0,00	0,00	0,00	0,00	26 384,52		
0987	0,00	2618,57	3232,32	0,00	0,00	0,00	5 850,89	185,53	5635,07	1,04	0,00	1 891,19	161 944,87	0,00	0,00	0,00	0,00	163 836,06		
1056	0,00	239,32	1247,38	0,00	0,00	0,00	1 486,70	47,14	1944,21	0,76	0,00	172,84	62 495,93	0,00	0,00	0,00	0,00	62 668,78		
1061	0,00	2230,75	843,84	0,00	0,00	0,00	3 074,59	97,49	4375,99	0,70	0,00	1 611,10	42 277,88	0,00	0,00	0,00	0,00	43 888,98		
1078	0,00	3173,33	3941,90	0,00	0,00	0,00	7 115,23	225,62	4398,39	1,62	0,00	2 291,85	197 496,12	0,00	0,00	0,00	0,00	199 787,97		
1100	0,00	1171,58	8291,61	0,00	0,00	0,00	9 463,20	300,08	23040,00	0,41	0,00	846,14	415 424,24	0,00	0,00	0,00	0,00	416 270,38		
1106	0,00	2058,48	967,70	0,00	0,00	0,00	3 026,18	95,96	7042,06	0,43	0,00	1 486,68	48 483,23	0,00	0,00	0,00	0,00	49 969,91		
1285	0,00	968,38	2631,85	0,00	0,00	0,00	3 600,23	114,16	920,89	3,91	0,00	699,39	131 860,31	0,00	0,00	0,00	0,00	132 559,70		
1288	0,00	212,14	576,56	0,00	0,00	0,00	788,70	25,01	334,50	2,36	0,00	153,21	28 886,70	0,00	0,00	0,00	0,00	29 039,91		
1313	0,00	428,38	137,21	0,00	0,00	0,00	565,59	17,93	1,00	-	0,00	309,38	6 874,51	0,00	0,00	0,00	0,00	7 183,90		
1331	0,00	1,21	141,42	0,00	0,00	0,00	142,63	4,52	1,00	-	0,00	0,87	7 085,61	0,00	0,00	0,00	0,00	7 086,48		

15

# Id.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.	Puiss.	Superf.	Inten.	Éner.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.
	[GJ/an]	[GJ/an]	[kW]	[m²]	[GJ/m²]		[kgCO ₂ eq]													
2390	0,00	4974,27	4073,99	0,00	0,00	0,00	9 048,25	286,92	7471,90	1,21		0,00	3 592,53	204 113,79	0,00	0,00	0,00	0,00	207 706,31	
2391	0,00	2304,26	1221,13	0,00	0,00	0,00	3 525,39	111,79	2911,56	1,21		0,00	1 664,19	61 180,75	0,00	0,00	0,00	0,00	62 844,94	
2405	0,00	697,90	519,09	0,00	0,00	0,00	1 216,99	38,59	1760,14	0,69		0,00	504,04	26 007,46	0,00	0,00	0,00	0,00	26 511,50	
2407	0,00	76,04	259,74	0,00	0,00	0,00	335,78	10,65	264,01	1,27		0,00	54,92	13 013,41	0,00	0,00	0,00	0,00	13 068,33	
2431	0,00	959,87	1378,65	0,00	0,00	0,00	2 338,52	74,15	1580,11	1,48		0,00	693,24	69 072,98	0,00	0,00	0,00	0,00	69 766,21	
2453	0,00	3092,55	880,84	0,00	0,00	0,00	3 973,39	126,00	4846,62	0,82		0,00	2 233,51	44 131,82	0,00	0,00	0,00	0,00	46 365,33	
2459	0,00	1277,88	776,37	0,00	0,00	0,00	2 054,25	65,14	2286,48	0,90		0,00	922,91	38 897,67	0,00	0,00	0,00	0,00	39 820,58	
2463	0,00	2689,97	4553,48	0,00	0,00	0,00	7 243,45	229,69	4839,53	1,50		0,00	1 942,75	228 137,28	0,00	0,00	0,00	0,00	230 080,03	
2464	0,00	5209,16	9020,10	0,00	0,00	0,00	14 229,27	451,21	6301,61	2,26		0,00	3 762,17	451 922,96	0,00	0,00	0,00	0,00	455 685,13	
2483	0,00	2092,93	2417,61	0,00	0,00	0,00	4 510,53	143,03	3456,18	1,31		0,00	1 511,56	121 126,25	0,00	0,00	0,00	0,00	122 637,81	
2492	0,00	131,47	1161,84	0,00	0,00	0,00	1 293,31	41,01	1,00	-		0,00	94,95	58 210,40	0,00	0,00	0,00	0,00	58 305,35	
2522	0,00	0,00	164,76	0,00	0,00	0,00	164,76	5,22	384,44	0,43		0,00	0,00	8 254,81	0,00	0,00	0,00	0,00	8 254,81	
2547	0,00	2948,64	432,65	0,00	0,00	0,00	3 381,29	107,22	3025,40	1,12		0,00	2 129,57	21 676,56	0,00	0,00	0,00	0,00	23 806,13	
2552	0,00	426,01	609,77	0,00	0,00	0,00	1 035,78	32,84	2227,76	0,46		0,00	307,67	30 550,42	0,00	0,00	0,00	0,00	30 858,09	
2621	0,00	5427,17	2796,81	0,00	0,00	0,00	8 223,99	260,78	15587,31	0,53		0,00	3 919,63	140 125,18	0,00	0,00	0,00	0,00	144 044,80	
2995	0,00	786,13	726,55	0,00	0,00	0,00	1 512,68	47,97	1482,13	1,02		0,00	567,76	36 401,53	0,00	0,00	0,00	0,00	36 969,29	
2996	0,00	483,24	189,76	0,00	0,00	0,00	673,01	21,34	1439,02	0,47		0,00	349,01	9 507,53	0,00	0,00	0,00	0,00	9 856,54	
3031	0,00	6494,26	2953,03	0,00	0,00	0,00	9 447,29	299,57	5844,01	1,62		0,00	4 690,30	147 952,09	0,00	0,00	0,00	0,00	152 642,39	
3051	0,00	1306,64	0,00	844,76	0,00	0,00	2 151,40	68,22	1388,70	1,55		0,00	943,68	0,00	48 193,91	0,00	0,00	0,00	49 137,59	
3070	0,00	2702,70	1398,93	0,00	0,00	0,00	4 101,64	130,06	3931,34	1,04		0,00	1 951,95	70 088,98	0,00	0,00	0,00	0,00	72 040,93	
3095	0,00	920,72	315,33	0,00	0,00	0,00	1 236,05	39,20	1218,43	1,01		0,00	664,97	15 798,68	0,00	0,00	0,00	0,00	16 463,65	
3099	0,00	1037,05	906,95	0,00	0,00	0,00	1 944,00	61,64	1549,25	1,25		0,00	748,98	45 439,59	0,00	0,00	0,00	0,00	46 188,58	
3114	0,00	0,00	1507,77	0,00	0,00	0,00	1 507,77	47,81	3590,51	0,42		0,00	0,00	75 542,00	0,00	0,00	0,00	75 542,00		
3116	0,00	832,20	0,00	0,00	840,52	0,00	1 672,72	53,04	964,64	1,73		0,00	601,03	0,00	0,00	59 851,89	0,00	60 452,92		
3147	0,00	732,20	683,67	0,00	0,00	0,00	1 415,87	44,90	1042,92	1,36		0,00	528,81	34 253,16	0,00	0,00	0,00	0,00	34 781,97	
3169	0,00	573,80	894,71	0,00	0,00	0,00	1 468,52	46,57	1240,59	1,18		0,00	414,41	44 826,62	0,00	0,00	0,00	0,00	45 241,03	
3172	0,00	902,52	808,57	0,00	0,00	0,00	1 711,09	54,26	1630,73	1,05		0,00	651,82	40 510,90	0,00	0,00	0,00	0,00	41 162,72	
3195	0,00	543,46	454,67	0,00	0,00	0,00	998,12	31,65	1358,73	0,73		0,00	392,50	22 779,69	0,00	0,00	0,00	0,00	23 172,19	
3217	0,00	1794,48	792,22	0,00	0,00	0,00	2 586,70	82,02	1771,32	1,46		0,00	1 296,01	39 691,76	0,00	0,00	0,00	0,00	40 987,77	
3228	0,00	707,96	701,42	108,35	0,00	0,00	1 517,73	48,13	862,13	1,76		0,00	511,31	35 142,16	6 181,62	0,00	0,00	0,00	0,00	41 835,08
3238	0,00	2325,02	3292,51	0,00	0,00	0,00	5 617,53	178,13	5402,69	1,04		0,00	1 679,18	164 960,41	0,00	0,00	0,00	0,00	166 639,59	
3249	0,00	5472,80	3177,17	0,00	0,00	0,00	8 649,97	274,29	6142,39	1,41		0,00	3 952,58	159 181,81	0,00	0,00	0,00	0,00	163 134,39	
3313	0,00	268,46	180,97	0,00	0,00	0,00	449,42	14,25	240,07	1,87		0,00	193,88	9 066,73	0,00	0,00	0,00	0,00	9 260,62	
3330	0,00	2551,25	755,52	0,00	0,00	0,00	3 306,77	104,86	2567,30	1,29		0,00	1 842,57	37 852,82	0,00	0,00	0,00	0,00	39 695,39	
3331	0,00	887,69	2161,15	0,00	0,00	0,00	3 048,84	96,68	1975,04	1,54		0,00	641,11	108 277,42	0,00	0,00	0,00	0,00	108 918,53	
3332	0,00	915,80	2798,51	0,00	0,00	0,00	3 714,31	117,78	902,80	4,11		0,00	661,41	140 210,03	0,00	0,00	0,00	0,00	140 871,44	
3435	0,00	782,76	688,67	0,00	0,00	0,00	1 471,43	46,66	1178,04	1,25		0,00	565,33	34 503,36	0,00	0,00	0,00	0,00	35 068,69	
3491	0,00	998,57	756,96	0,00	0,00	0,00	1 755,53	55,67	1129,23	1,55		0,00	721,19	37 925,15	0,00	0,00	0,00	0,00	38 646,33	

154

# Id.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.	Puiss.	Superf.	Inten.	Éner.	Eau	Ref.	Électr.	G. Nat	G. Prop	Mazout	Vapeur	Tot.
	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[GJ/an]	[kW]	[m²]	[GJ/m²]		[kgCO ₂ eq]							
3665	0,00	12470,76	4190,01	0,00	0,00	0,00	16 660,78	528,31	9348,05	1,78	0,00	9 006,66	209 926,93	0,00	0,00	0,00	0,00	218 933,59		
3666	0,00	635,43	630,43	0,00	0,00	0,00	1 265,86	40,14	2282,00	0,55	0,00	458,92	31 585,59	0,00	0,00	0,00	0,00	32 044,51		
3679	0,00	15760,26	1431,58	0,00	0,00	0,00	17 191,83	545,15	14328,60	1,20	0,00	11 382,41	71 724,41	0,00	0,00	0,00	0,00	83 106,82		
3682	0,00	3768,31	2587,45	0,00	0,00	0,00	6 355,76	201,54	16345,74	0,39	0,00	2 721,56	129 635,63	0,00	0,00	0,00	0,00	132 357,19		
3684	0,00	726,36	0,00	0,00	469,97	0,00	1 196,33	37,94	1065,90	1,12	0,00	524,59	0,00	0,00	33 465,48	0,00	33 990,07			
3685	0,00	9163,39	4181,53	0,00	0,00	0,00	13 344,91	423,16	9028,96	1,48	0,00	6 618,00	209 501,70	0,00	0,00	0,00	0,00	216 119,70		
3687	0,00	4355,88	4098,81	0,00	0,00	0,00	8 454,68	268,10	8094,98	1,04	0,00	3 145,91	205 357,40	0,00	0,00	0,00	0,00	208 503,31		
3688	0,00	0,00	639,11	0,00	0,00	0,00	639,11	20,27	4887,90	0,13	0,00	0,00	32 020,69	0,00	0,00	0,00	0,00	32 020,69		
3725	0,00	2279,36	1416,28	0,00	0,00	0,00	3 695,65	117,19	2742,40	1,35	0,00	1 646,21	70 958,23	0,00	0,00	0,00	0,00	72 604,44		
3751	0,00	0,00	0,00	0,00	60,83	0,00	60,83	1,93	869,70	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	4 331,66	0,00	4 331,66			
3783	0,00	116,96	0,00	0,00	252,03	0,00	369,00	11,70	480,04	0,77	0,00	84,47	0,00	0,00	17 946,89	0,00	18 031,37			
4201	0,00	385,30	2071,28	0,00	0,00	0,00	2 456,58	77,90	3025,02	0,81	0,00	278,27	103 774,72	0,00	0,00	0,00	0,00	104 052,99		
4397	0,00	1986,15	6778,95	0,00	0,00	0,00	8 765,09	277,94	6522,94	1,34	0,00	1 434,44	339 636,97	0,00	0,00	0,00	0,00	341 071,41		
8029	0,00	494,60	1065,46	0,00	0,00	0,00	1 560,05	49,47	902,44	1,73	0,00	357,21	53 381,17	0,00	0,00	0,00	0,00	53 738,38		
8154	0,00	116,37	1395,88	0,00	0,00	0,00	1 512,25	47,95	1151,56	1,31	0,00	84,05	69 935,78	0,00	0,00	0,00	0,00	70 019,82		
8240	0,00	377,96	2598,33	0,00	0,00	0,00	2 976,29	94,38	1052,24	2,83	0,00	272,97	130 180,64	0,00	0,00	0,00	0,00	130 453,62		
8245	0,00	151,45	162,81	0,00	0,00	0,00	314,25	9,96	1280,78	0,25	0,00	109,38	8 156,85	0,00	0,00	0,00	0,00	8 266,23		
8312	0,00	326,34	1719,02	0,00	0,00	0,00	2 045,36	64,86	3092,83	0,66	0,00	235,69	86 125,71	0,00	0,00	0,00	0,00	86 361,40		
8324	0,00	326,42	2419,30	0,00	0,00	0,00	2 745,72	87,07	3242,59	0,85	0,00	235,74	121 211,30	0,00	0,00	0,00	0,00	121 447,04		
8463	0,00	892,98	2458,86	0,00	0,00	0,00	3 351,83	106,29	4767,25	0,70	0,00	644,93	123 192,99	0,00	0,00	0,00	0,00	123 837,92		
8471	0,00	0,00	2463,32	0,00	0,00	0,00	2 463,32	78,11	9008,26	0,27	0,00	0,00	123 416,42	0,00	0,00	0,00	0,00	123 416,42		
8472	0,00	195,45	1773,65	0,00	0,00	0,00	1 969,10	62,44	2801,02	0,70	0,00	141,16	88 862,76	0,00	0,00	0,00	0,00	89 003,92		
8499	0,00	1754,93	6019,38	0,00	0,00	0,00	7 774,30	246,52	10081,11	0,77	0,00	1 267,45	301 581,22	0,00	0,00	0,00	0,00	302 848,66		
8538	0,00	69,96	531,05	0,00	0,00	0,00	601,01	19,06	603,08	1,00	0,00	50,53	26 606,39	0,00	0,00	0,00	0,00	26 656,92		
8608	0,00	786,48	763,31	0,00	0,00	0,00	1 549,79	49,14	1169,35	1,33	0,00	568,01	38 243,12	0,00	0,00	0,00	0,00	38 811,14		
8616	0,00	395,18	444,52	0,00	0,00	0,00	839,71	26,63	1393,08	0,60	0,00	285,41	22 271,31	0,00	0,00	0,00	0,00	22 556,72		
8662	0,00	3448,07	1102,68	0,00	0,00	0,00	4 550,75	144,30	7543,46	0,60	0,00	2 490,27	55 246,31	0,00	0,00	0,00	0,00	57 736,58		
8663	0,00	1043,58	2416,02	0,00	0,00	0,00	3 459,60	109,70	3180,68	1,09	0,00	753,70	121 046,71	0,00	0,00	0,00	0,00	121 800,40		
8741	0,00	508,52	1170,27	0,00	0,00	0,00	1 678,79	53,23	1323,73	1,27	0,00	367,26	58 632,59	0,00	0,00	0,00	0,00	58 999,86		
8742	0,00	1158,48	1029,22	0,00	0,00	0,00	2 187,69	69,37	19552,48	0,11	0,00	836,68	51 565,59	0,00	0,00	0,00	0,00	52 402,26		

ANNEXE C Résultats des matrices décisionnelles

Tableau C.1 – Caractéristiques générales et pointages des 35 autres bâtiments pour la conversion vers la récupération énergétique dans les eaux usées

#	Nom Bâtiment	Syst. Thermique Primaire	Syst. Thermique Second.	Distance [m] [/50]		Réduction GES [kgCO ₂ eq/an] [/30]		Cond. Canal. [-]	Cond. Canal. [/15]	Long. EC [m]	Long. Canal. [m] [/2,5]	Long. Restau. [m] [/2,5]	Point. [/100]		
0422	Centre Formations des Pompiers	Gaz. Nat	Élect.	67,2	36,6	201 638,3	6,2	B	15,0	58,1	368,7	2,5	56,8	2,4	57,8
3249	PDQ No23 et Sections Opérations	Élect.	Gaz. Nat	28,9	44,2	156 887,1	4,8	A	7,5	82,3	291,6	2,5	0,0	0,0	56,5
8499	École Baron-Bing	Gaz. Nat	Élect.	89,6	32,1	297 234,1	9,1	B	15,0	74,0	237,4	2,5	216,6	2,5	56,2
0113	Garage (Cour des Carrières)	Gaz. Nat	Élect.	86,4	32,7	270 823,0	8,3	B	15,0	77,6	204,9	2,5	204,9	2,5	56,0
0138	Édifice Madison	Gaz. Nat	Élect.	94,9	31,0	310 834,7	9,5	B	15,0	92,5	489,1	2,5	304,4	2,5	55,6
0012	Édifice Lucien-Saulnier	Élect.	Vapeur	27,1	44,6	103 536,5	3,2	A	7,5	88,1	123,0	2,5	58,0	1,6	55,3
0976	Centre du Plateau	Élect.	Gaz. Nat	79,0	34,2	174 322,0	5,4	B	15,0	73,2	181,2	2,5	71,7	2,4	54,5
3031	Caserne No.28	Élect.	Gaz. Nat	39,0	42,2	145 819,2	4,5	A	7,5	89,9	193,4	2,5	0,0	0,0	54,2
0315	Aréna Ahuntsic	Élect.	Gaz. Nat	75,2	35,0	123 949,5	3,8	B	15,0	57,0	239,4	2,5	10,7	0,5	53,8
0104	Caserne No.47	Gaz. Nat	Élect.	37,7	42,5	121 581,3	3,7	A	7,5	44,3	328,0	2,5	328,0	2,5	53,7
0631	Centre Soccer Int. CESM	Élect.	Gaz. Nat	81,5	33,7	129 935,3	4,0	B	15,0	75,4	534,2	2,5	335,8	2,5	52,7
3682	SPVM - Appro. et Serv.	Élect.	Gaz. Nat	46,9	40,6	127 767,0	3,9	A	7,5	60,5	623,4	2,5	396,3	2,5	52,0
0450	Aréna Maurice-Richard	Élect.	Vapeur	73,1	35,4	291 209,2	8,9	A	7,5	184,8	293,7	2,5	0,0	0,0	51,8
0987	Édifice 600 Notre-Dame	Gaz. Nat	Élect.	58,0	38,4	159 610,4	4,9	A	7,5	55,7	741,0	2,5	0,0	0,0	50,8
0609	Aréna St-Louis	Élect.	Gaz. Nat	105,1	29,0	183 379,7	5,6	B	15,0	72,4	187,3	2,5	114,3	2,5	49,6
0601	Aréna Camilien-Houde	Élect.	Gaz. Nat	52,6	39,5	85 177,7	2,6	A	7,5	63,0	985,1	2,5	39,5	1,6	49,6
2390	Centre Jean-Claude Malépart	Élect.	Gaz. Nat	110,5	27,9	201 171,7	6,2	B	15,0	86,1	247,9	2,5	10,8	0,3	49,1
0001	Hôtel de Ville de Montréal	Élect.	Vapeur	60,1	38,0	66 148,8	2,0	A	7,5	117,2	171,1	2,5	89,6	1,9	47,5
0154	Complexe Gadbois	Élect.	Gaz. Nat	178,6	14,3	574 956,4	17,7	B	15,0	247,9	310,0	2,5	213,1	2,1	46,9

#	Nom Bâtiment	Syst. Thermique		Distance		Réduction GES		Cond.	Canal.	Long.	EC	Long.	Canal.	Long.	Restau.	Point.
		Primaire	Second.	[m]	[/50]	[kgCO ₂ eq/an]	[/30]	[‐]	[/15]	[m]	[m]	[/2,5]	[m]	[/2,5]	[/100]	
2621	Complexe Sportif Marie Victorin	Élect.	Gaz. Nat	92,7	31,5	138 105,1	4,2	A	7,5	78,2	232,3	2,5	0,0	0,0	43,2	
0745	Garage (Cour Bercy)	Élect.	Gaz. Nat	95,6	30,9	108 325,3	3,3	A	7,5	44,4	213,7	2,5	0,0	0,0	41,7	
2464	Centre Sportif Côtes-des-Neiges	Gaz. Nat	Élect.	148,4	20,3	445 408,2	13,7	A	7,5	135,4	218,5	2,5	0,0	0,0	41,5	
1100	CTMO-Ouest	Gaz. Nat	Élect.	188,0	12,4	409 435,7	12,6	B	15,0	90,0	515,7	2,5	76,5	2,1	40,0	
0248	Ateliers Muni. Rouen	Gaz. Nat	Élect.	129,1	24,2	268 280,9	8,2	A	7,5	69,2	248,6	2,5	52,0	1,9	39,9	
0608	Aréna Michel-Normandin	Gaz. Nat	Élect.	154,1	19,2	176 846,3	5,4	B	15,0	77,6	357,0	2,5	352,6	2,5	39,6	
4397	Entrepôt 3444 St-Joseph	Gaz. Nat	Élect.	143,4	21,3	334 741,3	10,3	A	7,5	83,4	230,2	2,5	0,0	0,0	39,1	
0761	Garage (Cour Pointes-aux-Trembles)	Gaz. Nat	Élect.	130,7	23,9	183 475,5	5,6	A	7,5	55,9	263,1	2,5	0,0	0,0	37,0	
0044	Laboratoire (Cour de Louvain)	Gaz. Nat	Élect.	182,7	13,5	180 350,8	5,5	B	15,0	44,9	294,5	2,5	46,0	2,5	34,0	
0763	Aréna Rodrigue-Gilbert	Élect.	Gaz. Nat	147,6	20,5	150 982,8	4,6	A	7,5	128,7	210,2	2,5	0,0	0,0	32,6	
3687	Centre Op. Est	Élect.	Gaz. Nat	162,7	17,5	202 397,3	6,2	A	7,5	80,4	320,0	2,5	0,0	0,0	31,2	
0297	Aréna Doug-Harvey	Élect.	Gaz. Nat	157,4	18,5	53 318,0	1,6	A	7,5	48,1	172,0	2,5	0,0	0,0	27,7	
1078	Piscine Annie-Pelletier	Élect.	Gaz. Nat	218,9	6,2	194 649,1	6,0	B	15,0	67,7	515,7	2,5	76,5	2,5	27,2	
0087	Centre Sportif Pierre-Charbonneau	Élect.	Vapeur	178,7	14,3	127 909,0	3,9	A	7,5	70,1	289,0	2,5	0,0	0,0	25,7	
0551	Centre Sportif N-D-G	Élect.	Gaz. Nat	234,2	3,2	176 835,0	5,4	A	7,5	81,0	270,5	2,5	0,0	0,0	16,1	
0482	Aréna Marcellin-Wilson	Élect.	Gaz. Nat	224,3	5,1	106 305,2	3,3	A	7,5	64,7	128,4	2,5	0,0	0,0	15,9	

Tableau C.2 – Caractéristiques générales et pointages des 155 autres bâtiments pour la conversion vers les systèmes PCP

#	Nom Bâtiment	Puiss. Nb. Puits [kW]	Nb. Puits [-]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an]	/30]	C. Therm. Roc [W/m.K]	Roc [/20]	C. Hydra. Roc [m/s]	Roc [/10]	C. Hydra. Dép. [m/s]	Dép. [/3,0]	Épais. Dép. [m]	Dép. [/3,5]	Prof. Nappe [m]	Nappe [/3,5]	Pénal. [-]	Point. Class. [/100]	Class. [/175]
1100	CTMO-Ouest	300,1	6	409 435,9	24,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	9,0	2,8	11,3	2,5	-5,8	32,89	21
4397	Entrepôt 3444 St-Joseph	277,9	5	334 741,1	20,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	3,0	3,3	1,7	3,3	-5,8	32,77	22
0631	Centre Soccer Int. CESM	251,4	5	129 935,2	14,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,1E-05	1,9	2,0	3,4	8,1	2,8	-5,8	32,76	23
0601	Aréna Camilien-Houde	209,8	4	85 177,9	10,6	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	2,1E-05	1,9	18,0	2,2	10,2	2,6	-3,6	32,72	24
1078	Piscine Annie- Pelletier	225,6	4	194 649,2	14,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	16,6	2,0	-3,6	32,36	25
0480	Aréna Clément-Jeté	192,9	4	137 551,3	12,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	16,6	2,0	-3,6	32,36	26
0976	Centre du Plateau	244,0	5	174 322,2	15,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	5,0	3,1	6,1	2,9	-5,7	32,30	27
0138	Édifice Madison	308,2	6	310 834,7	21,5	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,1E-05	1,0	12,0	2,6	18,1	1,8	-5,7	32,23	28
3682	SPVM - Appro. et Services	201,5	4	127 766,9	11,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	2,0	3,4	6,1	2,9	-5,7	32,12	29
0481	Aréna Francis- Bouillon	149,0	3	67 163,5	8,1	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	2,0	3,4	5,8	3,0	-3,5	31,93	30
0422	Caserne No.30 et Musée Pompiers	193,5	4	201 638,5	14,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	22,0	1,9	12,2	2,4	-3,5	31,85	31
0608	Aréna Michel- Normandin	258,6	5	176 846,2	15,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	10,0	2,8	8,1	2,8	-5,6	31,83	32
0196	Aréna St-Michel	659,8	12	496 717,5	39,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	3,0	3,3	13,7	2,2	-21,2	31,81	33
3687	Centre Op. Est	268,1	5	202 397,1	16,2	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	7,0	3,0	8,1	2,8	-5,6	31,57	34
0276	Aréna St-Donat	116,8	3	85 544,3	8,6	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	1,0	3,4	14,6	2,2	-3,5	31,26	35
3665	"2580" St-Joseph	528,3	10	206 900,8	26,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	4,0	3,2	6,1	2,9	-16,8	31,25	36
3491	Caserne No.52	55,7	1	37 378,5	3,1	4,10	20,0	1,1E-05	1,8	1,5E-05	1,4	4,0	3,2	8,1	2,8	0,0	31,23	37
8662	Maison Culture Frontenac	144,3	3	54 449,9	7,7	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	13,0	2,5	5,8	3,0	-3,5	31,19	38
1106	Édifice Shell Montréal-Est	96,0	2	47 784,3	5,5	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	14,6	2,2	-3,4	30,86	39
0091	Chauf. et Ateliers Jardin Botanique	264,5	5	411 852,4	22,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,1E-05	1,9	18,0	2,2	20,1	1,6	-5,4	30,79	40
0183	Centre Rosemont	210,2	4	262 265,6	16,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	2,0	3,4	16,1	2,0	-5,4	30,63	41
0712	Piscine Pierre- Lorange	133,0	3	123 254,1	9,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,9E-05	1,8	8,0	2,9	21,0	1,6	-3,4	30,54	42

#	Nom Bâtiment	Puiss. [kW]	Nb. Puits [-]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an] [/30]	C. Therm. Roc [W/m.K]	Roc [/20]	C. Hydra. Roc [m/s]	Roc [/10]	C. Hydra. Dép. [m/s]	Dép. [/3,0]	Épais. Dép. [m]	Dép. [/3,5]	Prof. Nappe [m]	Nappe [/3,5]	Pénal. [-]	Point. Class. [/100]	Class. [/175]	
0578	Édifice Chauveau	78,7	2	50 661,4	5,6	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	2,1E-05	1,9	1,0	3,4	6,9	2,9	-3,4	30,52	43
0315	Aréna Ahuntsic	189,9	4	123 949,3	11,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,1E-05	1,9	4,0	3,2	14,6	2,2	-5,4	30,41	44
0745	Garage (Cour Bercy)	148,1	3	108 325,3	9,3	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	26,0	1,6	5,8	3,0	-3,4	30,32	45
0761	Garage (Cour P-A-T)	186,3	4	183 475,5	13,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,1E-05	1,9	4,0	3,2	16,6	2,0	-5,3	30,25	46
1285	Garage (Cour Sud-Ouest)	114,2	3	129 959,5	10,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	21,0	1,6	-3,4	30,19	47
0312	Piscine parc René-Goufil	172,0	4	192 056,9	13,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	2,0	3,4	8,1	2,8	-5,3	30,19	48
3070	Caserne No.65	130,1	3	69 078,6	8,1	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	9,8E-06	0,9	11,0	2,7	14,6	2,2	-3,3	30,12	49
0113	Garage (Cour des Carrières)	258,7	5	270 823,2	18,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	8,0	2,9	1,8	3,3	-7,5	30,12	50
2995	Caserne No.59	48,0	1	35 876,8	3,1	4,10	20,0	1,1E-05	1,8	9,8E-06	0,9	5,0	3,1	14,6	2,2	0,0	30,04	51
2483	Centre Op. CESM	143,0	3	119 380,2	9,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	4,0	3,2	9,3	2,6	-5,3	30,04	52
0551	Centre Sportif N-D-G	270,1	5	176 835,1	15,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,1E-05	1,0	26,0	1,6	14,9	2,1	-5,3	29,90	53
0528	Aréna René-Masson	189,4	4	83 214,9	10,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8	2,0	3,4	21,0	1,6	-5,3	29,89	54
0626	Garage Entretien St-Michel	142,3	3	171 019,2	11,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	13,7	2,2	-5,3	29,88	55
0177	Caserne No.48	76,4	2	32 306,9	5,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	3,0	3,3	10,2	2,6	-3,3	29,69	56
0084	CCSE Maisonneuve	99,3	2	76 620,2	6,4	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	10,0	2,8	5,8	3,0	-3,3	29,59	57
0762	Caserne No.38	64,9	2	57 758,0	5,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	2,1E-05	1,9	4,0	3,2	16,6	2,0	-3,3	29,52	58
3725	M.A.Q. M.C.I.P.	117,2	3	69 935,4	8,1	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	21,0	1,9	21,0	1,6	-3,3	29,39	59
0057	Caserne No.05	112,5	2	123 120,7	7,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,1E-05	1,0	13,0	2,5	1,5	3,4	-3,3	29,33	60
0334	Bain Émard	106,9	2	124 307,3	7,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	9,8E-06	0,9	2,0	3,4	10,2	2,6	-3,3	29,29	61
0987	Édifice 6000 Notre-Dame O.	185,5	4	159 610,4	12,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	13,0	2,5	21,0	1,6	-5,1	28,90	62
0610	Aréna Bill-Durnan	114,1	3	39 824,0	7,2	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	10,0	2,8	10,5	2,5	-5,1	28,86	63
0107	Édifice 1650 des Carrières	137,7	3	144 392,7	10,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	4,0	3,2	1,8	3,3	-5,1	28,85	64
3331	Caserne No.08	96,7	2	106 716,6	7,3	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	14,0	2,5	12,2	2,4	-3,2	28,79	65
8472	Centre Alphonse-Desjardins	62,4	2	87 581,8	6,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	6,1	2,9	-5,1	28,78	66
8312	Centre Guybourg	64,9	2	84 884,2	6,6	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	11,0	2,7	16,6	2,0	-3,2	28,62	67
0482	Aréna Marcellin-Wilson	215,7	4	106 305,3	11,3	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	9,8E-06	0,9	3,0	3,3	2,5	3,3	-5,0	28,58	68
2431	Caserne No.45	74,2	2	68 077,3	6,1	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	8,0	2,9	21,0	1,6	-3,2	28,46	69
0869	Centre Monseigneur-Pigeon	68,7	2	59 630,5	5,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	21,0	1,6	-3,2	28,39	70

#	Nom Bâtiment	Puiss. [kW]	Nb. Puits [-]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an] [/30]	C. Therm. Roc [W/m.K]	Roc [/20]	C. Hydra. Roc [m/s]	Roc [/10]	C. Hydra. Dép. [m/s]	Dép. [/3,0]	Épais. Dép. [m]	Dép. [/3,5]	Prof. Nappe [m]	Nappe [/3,5]	Pénal. [-]	Point. Class. [/100]	Class. [/175]	
0747	Centre St-Zotique	83,3	2	95 394,1	6,9	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	21,0	1,6	-3,2	28,39	71
0100	Biblio. Maisonneuve	62,4	2	34 095,2	5,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	21,0	1,6	-3,2	28,39	72
8663	Centre Oliver Jones	109,7	2	119 301,8	7,7	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	10,0	2,8	21,0	1,6	-3,1	28,33	73
3685	Centre Op. Nord et Environnement	423,2	8	206 481,7	22,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	4,0	3,2	8,1	2,8	-15,2	28,19	74
0286	Bureaux/Garage St-Michel	65,0	2	59 519,7	5,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	13,7	2,2	-5,0	28,18	75
2464	Centre Sportif Côtes-des-Neiges	451,2	8	445 408,4	29,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,1E-05	1,0	7,0	3,0	7,3	2,8	-15,2	28,14	76
0978	Édifice Albert Dumouchel	119,8	3	80 371,7	8,5	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	3,0	3,3	14,6	2,2	-4,9	27,92	77
0240	Biblio. Marc-Favreau	89,8	2	26 192,6	4,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	2,0	3,4	7,3	2,8	-4,9	27,91	78
0570	Annexe Édifice Lucien-Saulnier	109,8	2	38 756,8	5,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	17,0	2,2	21,0	1,6	-3,1	27,86	79
0353	Édifice Georges-Vanier	48,7	1	19 533,9	2,6	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	11,0	2,7	5,8	3,0	-3,1	27,72	80
0263	Centre Sportif Saint-Charles	285,2	6	259 896,6	20,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	21,0	1,6	-11,9	27,68	81
0044	Labo. (Cour de Louvain)	149,8	3	180 350,7	11,5	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	6,0	3,1	15,7	2,1	-4,9	27,64	82
0317	Caserne No.48	101,8	2	85 464,2	6,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,1E-05	1,9	4,0	3,2	6,9	2,9	-4,9	27,61	83
0337	Piscine Parc St-Roch	167,3	3	173 235,9	11,3	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	2,3E-05	2,2	4,0	3,2	6,1	2,9	-4,9	27,60	84
0032	Caserne No.14	72,9	2	57 297,4	5,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	23,4	1,4	-4,8	27,43	85
0297	Aréna Doug-Harvey	160,2	3	53 317,8	7,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	14,0	2,5	18,1	1,8	-4,8	27,39	86
8608	Caserne No.19	49,1	1	37 691,8	3,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	11,0	2,7	10,2	2,6	-3,0	27,36	87
4201	Centre St-Eusèbe	77,9	2	102 278,8	7,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	7,0	3,0	2,5	3,3	-4,8	27,35	88
0012	Édifice Lucien-Saulnier	293,5	6	103 536,3	15,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	17,0	2,2	21,0	1,6	-11,7	27,27	89
0191	Caserne No.29	79,6	2	68 929,3	6,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8	3,0	3,3	10,5	2,5	-4,8	27,25	90
8240	Édifice 8491 Ernest-Cormier	94,4	2	128 304,1	7,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8	1,0	3,4	12,5	2,3	-4,8	27,22	91
3249	PDQ No.23 et Section Op.	274,3	5	156 887,2	14,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	5,0	3,1	10,2	2,6	-11,7	27,19	92
2547	PDQ No.38	107,2	2	21 364,1	4,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	8,0	2,9	4,9	3,0	-4,8	27,11	93
0300	Caserne No.16	84,3	2	61 025,1	5,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	8,0	2,9	4,9	3,0	-4,8	27,11	94
0224	Garage (Cour Marie-Anne)	47,7	1	51 664,6	3,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	7,3	2,8	-4,8	26,99	95

#	Nom Bâtiment	Puiss. [kW]	Nb. Puits [-]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an] [/30]	C. Therm. Roc [W/m.K] [/20]	C. Hydra. Roc [m/s] [/10]	C. Hydra. Dép. [m/s] [/3,0]	Épais. Dép. [m] [/3,5]	Prof. Nappe [m] [/3,5]	Pénal. [-]	Point. Class. [/100] [/175]
0037	Caserne No.49	57,6	2	70 046,1	6,2	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4
3172	PDQ No.13	54,3	1	39 926,9	3,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	2,1E-05	1,9
0068	Chalet-Restaurant	104,5	2	85 178,9	6,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4
0065	Centre Culture Calixa-Lavalée	73,8	2	65 053,0	6,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4
2915-2925											
8471	Ste-Catherine	78,1	2	121 637,4	7,7	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4
0208	Caserne No.20	55,8	1	25 924,4	2,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	2,1E-05	1,9
0192	Caserne No.50	41,5	1	35 163,9	3,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0
0455	Centre Sportif Jean-Rougeau	110,5	2	97 226,9	7,0	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	3,2E-05	3,0
0321	Centre Récréatif R-D-P	75,2	2	9 412,2	4,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8
0490	Édifice Cour Poincaré	115,5	3	96 832,3	9,0	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	1,5E-05	1,4
0064	Aréna Howie-Morenz	138,7	3	56 769,6	7,7	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	9,8E-06	0,9
0419	Caserne No.40	45,3	1	46 255,0	3,4	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4
3332	Caserne No.18	117,8	3	138 188,9	10,2	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4
2492	Entrepôt Cour Sud-Ouest	41,0	1	57 371,3	3,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,1E-05	1,0
0318	Centre St-Paul	41,5	1	58 316,0	3,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,1E-05	1,0
0260	Quartier D'Hiver	79,7	2	54 156,0	5,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4
0038	Caserne No.35	61,6	2	56 062,7	5,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,1E-05	1,9
0986	Maison de la Culture P-A-T	86,4	2	24 416,6	4,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,1E-05	1,9
0190	Caserne No.09	67,3	2	68 878,6	6,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9
1061	6150 Avenue Royalmont	97,5	2	41 668,4	5,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4
0347	Caserne No.15	52,5	1	38 073,3	3,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4
0025	Édifice 200 Bellechasse	356,8	7	358 278,5	25,0	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	2,3E-05	2,2
2391	Centre Sportif N-D-G	111,8	2	60 298,8	5,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2
0478	Édifice du 9515 St-Hubert	59,1	2	52 700,0	5,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9
8742	Biblio. Poly. Washington	69,4	2	50 822,3	5,6	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	2,3E-05	2,2
2459	Biblio. R-D-P	65,1	2	38 337,0	5,2	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8

#	Nom Bâtiment	Puiss. [kW]	Nb. Puits [-]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an] [/30]	C. Therm. Roc [W/m.K]	Roc [/20]	C. Hydra. Roc [m/s]	Roc [/10]	C. Hydra. Dép. [m/s]	Dép. [/3,0]	Épais. Dép. [m]	Dép. [/3,5]	Prof. Nappe [m]	Nappe [/3,5]	Pénal. [-]	Point. Class. [/100]	Class. [/175]	
1056	Édifice 204-206 rue Young	47,1	1	61 595,0	3,9	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	23,0	1,8	21,0	1,6	-2,9	25,66	122
0346	Caserne No.03	46,9	1	57 535,2	3,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	23,0	1,8	21,0	1,6	-2,9	25,66	123
8499	École Baron-Byng	246,5	5	297 233,9	19,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	11,7	2,4	-13,8	25,57	124
0116	Garage (Cour St-Grégoire)	51,5	1	67 786,0	4,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	3,0	3,3	1,8	3,3	-4,5	25,52	125
8324	Centre St-Marthyrs- Canadiens	87,1	2	119 464,0	7,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	5,0	3,1	23,4	1,4	-4,5	25,41	126
0295	Caserne No.41 et Centre Ogilvy	95,2	2	127 491,1	7,9	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	2,3E-05	2,2	7,0	3,0	10,5	2,5	-4,5	25,36	127
3147	Caserne No.22	44,9	1	33 759,4	3,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	2,0	3,4	4,9	3,0	-4,5	25,34	128
3051	Caserne No.56	68,2	2	47 583,8	5,5	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	9,8E-06	0,9	6,0	3,1	0,0	3,5	-4,4	25,19	129
0293	Caserne No.31	97,4	2	141 046,6	8,3	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	9,8E-06	0,9	3,0	3,3	2,9	3,2	-4,4	25,15	130
3217	Caserne No.17	82,0	2	39 119,6	5,2	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,1E-05	1,9	11,0	2,7	34,2	0,4	-4,4	25,03	131
3330	Caserne No.64	104,9	2	37 307,2	5,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	3,0	3,3	29,8	0,8	-4,4	25,03	132
0418	Caserne No.44	41,7	1	63 704,3	4,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,9E-05	1,8	1,0	3,4	19,0	1,8	-4,4	25,01	133
8741	Garage (Cour R-D-P)	53,2	1	57 787,4	3,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	1,0	3,4	15,7	2,1	-4,4	25,00	134
2453	Centre Intercul. Strathearn	126,0	3	43 495,7	7,3	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	9,8E-06	0,9	1,0	3,4	0,0	3,5	-10,7	24,89	135
3114	Caserne No.73	47,8	1	74 453,1	4,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	7,0	3,0	8,1	2,8	-4,4	24,77	136
0407	Château Dufresne	46,9	1	30 738,5	2,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	6,0	3,1	15,7	2,1	-4,4	24,69	137
8463	Centre Comm. Lajeunesse	106,3	2	121 417,1	7,7	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	9,8E-06	0,9	1,0	3,4	10,5	2,5	-4,4	24,68	138
0755	Manoir N-D-G	65,3	2	78 878,5	6,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	16,0	2,3	38,1	0,0	-4,3	24,62	139
8029	Centre Comm. Walkey	49,5	1	52 611,7	3,6	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	10,0	2,8	13,7	2,2	-4,3	24,59	140
0413	Édifice Plessis	51,4	1	69 013,7	4,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	14,6	2,2	-4,3	24,59	141
3116	Caserne No.72	53,0	1	59 244,9	3,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	6,0	3,1	11,3	2,5	-4,3	24,58	142
0151	Maison Cult. N-D-G Caserne No.34	107,9	2	17 222,5	4,5	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	24,0	1,7	32,5	0,5	-4,3	24,55	143
0373	Centre Commu. Henri-Julien	44,4	1	34 874,5	3,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	10,0	2,8	15,7	2,1	-4,3	24,43	144
3228	Caserne No.57	48,1	1	40 738,9	3,3	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	5,0	3,1	14,6	2,2	-4,3	24,39	145
8154	6557 de l'Esplanade	48,0	1	68 927,6	4,1	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	2,3E-05	2,2	3,0	3,3	7,3	2,8	-4,3	24,17	146
0062	Caserne No.13	43,1	1	45 932,2	3,4	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	47,0	0,0	21,0	1,6	-2,7	24,05	147
0121	Caserne No.27	50,4	1	49 380,5	3,5	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	1,0	3,4	37,2	0,1	-4,2	23,94	148
3238	Caserne No.66	178,1	4	162 582,5	13,0	2,40	11,7	5,1E-06	0,9	1,5E-05	1,4	9,0	2,8	21,0	1,6	-2,6	23,76	149

#	Nom Bâtiment	Puiss. [kW]	Nb. Puits [-]	Réduction GES [kgCO ₂ eq/an] [/30]	C. Therm. Roc [W/m.K]	Roc [/20]	C. Hydra. Roc [m/s]	Roc [/10]	C. Hydra. Dép. [m/s]	Dép. [/3,0]	Épais. Dép. [m]	Dép. [/3,5]	Prof. Nappe [m]	Nappe [/3,5]	Pénal. [-]	Point. Class. [/100] [/175]	
0285	Édifice Gaston-Miron	155,2	3	105 803,2	9,2	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	16,0	2,3	11,3	2,5	-10,2	23,74 150
0230	Centre Laurier	53,6	1	60 525,4	3,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	10,0	2,8	0,0	3,5	-5,9	23,73 151
0106	Édifice 1400 des Carrières	44,6	1	46 776,4	3,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	8,0	2,9	1,8	3,3	-5,9	23,72 152
3169	PDQ No.8 et Centre Curé-Piché	46,6	1	44 180,4	3,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	2,0	3,4	29,8	0,8	-4,1	23,39 153
0273	Caserne No.25	61,2	2	78 411,5	6,4	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	11,0	2,7	0,5	3,5	-10,0	23,30 154
0101	Bain et Centre Morgan	90,0	2	95 993,4	6,9	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	10,0	2,8	1,4	3,4	-10,0	23,30 155
0409	Caserne No.42 et Biblio. Salaberry	53,0	1	46 402,2	3,4	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	1,5E-05	1,4	4,0	3,2	10,2	2,6	-4,1	23,26 156
0148	Centre Trenholme	43,2	1	65 351,3	4,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	30,0	1,3	22,5	1,4	-4,1	23,25 157
0291	Garage (Cour de l'Épée)	43,8	1	50 268,4	3,5	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	9,8E-06	0,9	4,0	3,2	4,9	3,0	-4,1	23,23 158
0314	Piscine Georges-Vernot	43,4	1	28 923,1	2,9	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	7,0	3,0	12,5	2,3	-5,7	22,99 159
0104	Caserne No.47	147,6	3	121 581,4	9,7	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	4,0	3,2	7,3	2,8	-12,1	22,55 160
0377	Caserne No.37	46,3	1	54 411,9	3,7	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	9,8E-06	0,9	4,0	3,2	13,7	2,2	-4,0	22,54 161
0365	Bain Quintal	75,4	2	89 668,3	6,8	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	9,8E-06	0,9	17,0	2,2	5,8	3,0	-9,5	22,28 162
0077	Caserne No.30 et Musée Pompiers	69,6	2	91 514,4	6,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	4,0	3,1	-11,9	22,13 163
0795	Centre Gabrielle-et-Marcel-Lapalme	134,5	3	92 682,5	8,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	7,0	3,0	6,1	2,9	-11,8	22,01 164
0152	Centre Comm. N-D-G	183,2	4	227 881,2	15,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	2,3E-05	2,2	24,0	1,7	32,5	0,5	-11,5	21,37 165
0302	Bain Lévesque	93,1	2	91 213,4	6,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	4,0	3,2	4,9	3,0	-11,3	20,92 166
0376	Bain St-Denis	68,9	2	85 910,8	6,6	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	3,2E-05	3,0	3,0	3,3	2,9	3,2	-11,1	20,59 167
3099	PDQ No.24	61,6	2	44 784,6	5,4	2,80	13,7	2,7E-05	4,5	3,2E-05	3,0	4,0	3,2	8,4	2,7	-10,9	20,20 168
0280	Caserne No.23 et Centre St-Denis	111,2	2	100 396,0	7,1	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	1,5E-05	1,4	7,0	3,0	21,0	1,6	-10,7	19,81 169
0669	Garage (Cour de la Commune)	94,3	2	68 975,2	6,1	2,40	11,7	5,1E-06	0,9	1,5E-05	1,4	20,0	2,0	16,6	2,0	-2,2	19,79 170
3435	Caserne No.67	46,7	1	34 006,0	3,0	2,40	11,7	5,1E-06	0,9	9,8E-06	0,9	12,0	2,6	0,0	3,5	-2,2	19,42 171
0001	Hôtel de Ville	390,8	7	66 149,0	16,0	2,40	11,7	6,0E-05	10,0	1,5E-05	1,4	17,0	2,2	21,0	1,6	-24,6	16,38 172
0472	Bain Schubert	101,4	2	111 209,8	7,4	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	1,0	3,4	2,9	3,2	-18,8	15,37 173
0159	Centre St-Denis	57,3	2	64 084,2	6,0	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	3,2E-05	3,0	4,0	3,2	1,8	3,3	-18,7	15,31 174
0219	Caserne No.10	52,2	1	58 174,5	3,8	2,80	13,7	4,1E-05	6,8	9,8E-06	0,9	1,0	3,4	6,1	2,9	-16,4	13,40 175

ANNEXE D Résultats de l'analyse de sensibilité des facteurs de pondérations

Tableau D.1 – Résultats des calculs de pointages et de leur classement associé pour les neuf scénarios utilisé dans l'analyse de sensibilité de la technique de récupération depuis les eaux usées

#	S.1 :50-30-15 Point. Class.	S.2 :45-30-15 Point. Class.	S.3 :40-40-15 Point. Class.	S.4 :55-25-15 Point. Class.	S.5 :60-20-15 Point. Class.	S.6 :65-15-15 Point. Class.	S.7 :47.5-27.5-20 Point. Class.	S.8 :52.5-32.5-10 Point. Class.	S.9 :55-35-5 Point. Class.
0246	86,86 1	87,67 1 0	88,49 1 0	86,05 1 0	85,23 1 0	89,42 1 0	97,27 1 0	86,45 1 0	86,05 1 0
0575	77,34 2	76,03 2 0	74,72 2 0	78,66 2 0	79,97 3 -1	86,28 3 -1	84,76 2 0	76,08 2 0	74,81 2 0
0105	75,83 3	73,20 3 0	70,57 3 0	78,47 3 0	81,10 2 1	88,74 2 1	81,67 3 0	74,31 3 0	72,78 3 0
3665	68,27 4	64,64 6 -2	61,00 7 -3	71,90 4 0	75,53 4 0	84,17 4 0	72,51 6 -2	66,14 5 -1	64,02 6 -2
0434	68,26 5	66,78 4 1	65,29 4 1	69,75 7 -2	71,24 9 -4	77,73 12 -7	74,92 4 1	66,41 4 1	64,55 4 1
0025	68,04 6	65,67 5 1	63,30 5 1	70,41 6 0	72,78 6 0	80,15 7 -1	73,68 5 1	66,05 6 0	64,07 5 1
3238	66,61 7	62,78 8 -1	58,95 9 -2	70,44 5 2	74,27 5 2	83,10 5 2	70,52 9 -2	64,35 8 -1	62,10 8 -1
0263	66,52 8	63,50 7 1	60,48 8 0	69,55 8 0	72,57 7 1	80,60 6 2	71,34 7 1	64,37 7 1	62,21 7 1
3685	64,75 9	61,46 11 -2	58,18 12 -3	68,03 9 0	71,32 8 1	79,60 8 1	69,16 12 -3	62,45 9 0	60,15 10 -1
0152	64,59 10	61,49 10 0	58,40 11 -1	67,68 10 0	70,77 10 0	78,86 10 0	69,21 10 0	62,30 10 0	60,01 11 -1
0183	64,23 11	61,45 12 -1	58,68 10 1	67,00 11 0	69,78 12 -1	77,55 13 -2	69,18 11 0	61,96 11 0	59,69 12 -1
0196	63,48 12	62,70 9 3	61,92 6 6	64,26 15 -3	65,04 17 -5	70,82 17 -5	70,63 8 4	61,41 12 0	59,35 13 -1
2463	63,17 13	60,19 13 0	57,22 14 -1	66,14 13 0	69,12 14 -1	77,10 15 -2	67,83 13 0	60,81 14 -1	58,45 14 -1
3679	62,16 14	58,02 17 -3	53,89 19 -5	66,30 12 2	70,43 11 3	79,57 9 5	65,45 16 -2	59,59 15 -1	57,02 15 -1
0285	62,01 15	58,18 16 -1	54,34 18 -3	65,85 14 1	69,68 13 2	78,52 11 4	65,64 15 0	59,47 16 -1	56,93 16 -1
0002	61,52 16	59,54 14 2	57,56 13 3	63,49 17 -1	65,47 16 0	72,44 16 0	67,20 14 2	59,18 17 -1	56,84 17 -1
0091	60,56 17	58,62 15 2	56,69 15 2	62,49 18 -1	64,42 18 -1	68,86 22 -5	64,20 18 -1	61,13 13 4	61,71 9 8
0481	60,27 18	56,29 19 -1	52,31 23 -5	64,24 16 2	68,22 15 3	77,20 14 4	63,62 19 -1	57,60 18 0	54,93 20 -2
0110	58,75 19	56,95 18 1	55,16 16 3	60,54 19 0	62,33 22 -3	69,13 21 -2	64,46 17 2	56,26 20 -1	53,77 22 -3
0891	57,81 20	56,09 20 0	54,37 17 3	59,53 22 -2	61,25 23 -3	67,97 23 -3	63,55 20 0	55,27 21 -1	52,73 24 -4
0422	57,76 21	55,13 21 0	52,51 22 -1	60,38 20 1	63,01 21 0	70,63 18 3	62,48 21 0	55,10 23 -2	52,45 25 -4
3249	56,53 22	52,92 25 -3	49,30 27 -5	60,15 21 1	63,77 19 3	69,89 19 3	58,03 26 -4	56,65 19 3	56,76 18 4
8499	56,21 23	54,52 22 1	52,84 20 3	57,90 25 -2	59,59 28 -5	66,27 29 -6	61,89 22 1	53,58 26 -3	50,94 28 -5
0113	56,04 24	54,15 23 1	52,26 24 0	57,92 24 0	59,81 26 -2	66,70 28 -4	61,48 23 1	53,37 27 -3	50,69 29 -5
0138	55,57 25	54,06 24 1	52,55 21 4	57,09 28 -3	58,60 31 -6	65,11 31 -6	61,41 24 1	52,92 28 -3	50,27 31 -6
0012	55,25 26	51,32 27 -1	47,40 30 -4	59,18 23 3	63,11 20 6	69,53 20 6	56,32 29 -3	55,24 22 4	55,24 19 7
0976	54,54 27	52,02 26 1	49,49 26 1	57,07 29 -2	59,60 27 0	67,13 25 2	59,17 25 2	51,70 31 -4	48,86 33 -6
3031	54,18 28	50,71 29 -1	47,23 32 -4	57,66 26 2	61,13 24 4	67,11 26 2	55,69 30 -2	54,17 24 4	54,15 21 7

#	S.1 :50-30-15		S.2 :45-30-15		S.3 :40-40-15		S.4 :55-25-15		S.5 :60-20-15		S.6 :65-15-15		S.7 :47.5-27.5-20		S.8 :52.5-32.5-10		S.9 :55-35-5			
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.												
0315	53,77	29	50,90	28	1	48,04	28	1	56,63	30	-1	59,49	29	0	67,35	24	5	57,97	27	2
0104	53,70	30	50,07	30	0	46,45	33	-3	57,32	27	3	60,94	25	5	67,07	27	3	55,01	32	-2
0631	52,70	31	49,99	31	0	47,28	31	0	55,40	32	-1	58,11	32	-1	65,81	30	1	57,01	28	3
3682	52,04	32	48,63	33	-1	45,22	36	-4	55,44	31	1	58,85	30	2	64,76	32	0	53,49	36	-4
0450	51,82	33	49,77	32	1	47,72	29	4	53,86	33	0	55,91	35	-2	60,46	36	-3	54,78	33	0
0987	50,81	34	47,78	35	-1	44,76	37	-3	53,83	34	0	56,85	33	1	62,38	34	0	52,61	37	-3
0609	49,61	35	47,65	36	-1	45,69	34	1	51,56	36	-1	53,52	37	-2	60,48	35	0	54,56	34	1
0601	49,60	36	46,08	38	-2	42,57	38	-2	53,11	35	1	56,62	34	2	62,63	33	3	50,78	38	-2
2390	49,08	37	47,32	37	0	45,56	35	2	50,84	38	-1	52,60	38	-1	59,36	38	-1	54,23	35	2
0001	47,51	38	44,05	39	-1	40,59	41	-3	50,96	37	1	54,42	36	2	60,38	37	1	48,61	39	-1
0154	46,93	39	48,45	34	5	49,96	25	14	45,42	40	-1	43,90	41	-2	47,39	42	-3	55,63	31	8
2621	43,20	40	40,76	42	-2	38,32	42	-2	45,64	39	1	48,07	39	1	53,01	39	1	45,18	42	-2
0745	41,71	41	39,17	43	-2	36,64	46	-5	44,24	41	0	46,78	40	1	51,81	40	1	43,50	44	-3
2464	41,50	42	41,75	40	2	41,99	39	3	41,25	42	0	41,01	44	-2	43,26	45	-3	46,40	41	1
1100	39,96	43	40,82	41	2	41,68	40	3	39,11	46	-3	38,25	47	-4	42,39	47	-4	47,49	40	3
0248	39,91	44	38,87	44	0	37,82	44	0	40,95	43	1	42,00	42	2	45,54	43	1	43,26	45	-1
0608	39,62	45	38,60	46	-1	37,59	45	0	40,63	44	1	41,64	43	2	47,66	41	4	45,01	43	2
4397	39,10	46	38,68	45	1	38,26	43	3	39,52	45	1	39,94	45	1	42,86	46	0	43,11	46	0
0761	36,99	47	35,55	47	0	34,10	47	0	38,44	47	0	39,89	46	1	43,83	44	3	39,71	47	0
0044	34,00	48	33,57	48	0	33,15	48	0	34,42	48	0	34,84	49	-1	40,27	48	0	39,71	48	0
0763	32,61	49	31,33	49	0	30,06	49	0	33,88	49	0	35,16	48	1	38,93	49	0	35,24	49	0
3687	31,17	50	30,46	50	0	29,75	50	0	31,88	50	0	32,59	50	0	35,79	50	0	34,35	50	0
0297	27,66	51	26,08	52	-1	24,50	52	-1	29,24	51	0	30,82	51	0	34,90	51	0	29,64	52	-1
1078	27,20	52	27,58	51	1	27,95	51	1	26,83	52	0	26,46	53	-1	31,08	52	0	33,39	51	1
0087	25,69	53	24,92	53	0	24,15	53	0	26,46	53	0	27,23	52	1	30,51	53	0	28,46	53	0
0551	16,08	54	16,67	54	0	17,26	54	0	15,50	55	-1	14,91	55	-1	16,82	55	-1	19,78	54	0
0482	15,91	55	15,94	55	0	15,97	55	0	15,88	54	1	15,85	54	1	18,32	54	1	18,97	55	0

Tableau D.2 – Résultats des calculs de pointages et de leur classement associé pour les scénarios 1 à 8, utilisé dans l'analyse de sensibilité de la technique de récupération énergétique depuis les eaux usées

#	S.1 :20-10-60		S.2 :10-10-70		S.3 :15-10-65		S.4 :17.5-10-62.5		S.5 :22.5-10-57.5		S.6 :25-10-55		S.7 :20-5-65		S.8 :20-7.5-62.5	
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.
0154	47,95	1	46,39	1 0	47,17	1 0	48,62	1 0	49,40	1 0	48,72	1 0	47,17	1 0	48,62	1 0
0450	45,49	2	43,52	2 0	44,51	2 0	45,82	2 0	46,81	2 0	46,48	2 0	42,64	2 0	44,89	2 0
0868	43,48	3	41,22	3 0	42,35	3 0	43,67	3 0	44,80	3 0	44,62	3 0	40,48	4 -1	42,73	3 0
0575	40,98	4	38,29	5 -1	39,64	5 -1	41,09	5 -1	42,43	4 0	42,32	4 0	40,63	3 1	41,58	4 0
0246	40,55	5	39,95	4 1	40,25	4 1	41,27	4 1	41,57	5 0	40,84	6 -1	38,80	5 0	40,55	5 0
0763	40,12	6	37,26	6 0	38,69	6 0	40,01	6 0	41,44	6 0	41,56	5 1	36,82	6 0	39,07	6 0
0434	39,29	7	36,42	7 0	37,86	7 0	39,17	7 0	40,61	7 0	40,72	7 0	35,99	7 0	38,24	7 0
0105	37,35	8	33,81	9 -1	35,58	8 0	37,03	8 0	38,80	8 0	39,12	8 0	35,58	8 0	37,03	8 0
2390	36,59	9	33,12	10 -1	34,85	9 0	36,17	9 0	37,91	9 0	38,32	9 0	32,99	12 -3	35,24	10 -1
0891	35,95	10	32,41	11 -1	34,18	11 -1	35,63	10 0	37,40	10 0	37,72	10 0	34,18	9 1	35,63	9 1
0087	35,39	11	31,62	13 -2	33,50	12 -1	34,82	12 -1	36,71	11 0	37,27	11 0	31,64	16 -5	33,89	13 -2
0002	35,20	12	33,90	8 4	34,55	10 2	35,57	11 1	36,22	13 -1	35,85	17 -5	33,10	10 2	34,85	11 1
0889	34,99	13	31,17	14 -1	33,08	14 -1	34,53	13 0	36,44	12 1	36,90	12 1	33,08	11 2	34,53	12 1
0248	34,13	14	30,36	16 -2	32,25	16 -2	33,56	16 -2	35,45	14 0	36,01	15 -1	30,38	24 -10	32,63	18 -4
0110	34,08	15	30,48	15 0	32,28	15 0	33,65	15 0	35,45	15 0	35,88	16 -1	32,28	13 2	33,65	14 1
3679	34,06	16	32,29	12 4	33,17	13 3	34,20	14 2	35,08	18 -2	34,94	24 -8	31,72	15 1	33,47	15 1
3031	33,98	17	29,88	18 -1	31,93	17 0	33,38	17 0	35,43	16 1	36,03	14 3	31,93	14 3	33,38	16 1
0609	33,63	18	29,24	20 -2	31,44	19 -1	32,89	19 -1	35,08	17 1	35,83	18 0	31,44	17 1	32,89	17 1
2463	33,59	19	29,83	19 0	31,71	18 1	33,03	18 1	34,91	19 0	35,48	19 0	29,84	28 -9	32,09	21 -2
2621	33,15	20	28,77	23 -3	30,96	20 0	32,41	20 0	34,60	20 0	35,35	20 0	30,96	18 2	32,41	19 1
1100	32,89	21	28,79	22 -1	30,84	22 -1	32,29	21 0	34,34	21 0	34,95	23 -2	30,84	20 1	32,29	20 1
4397	32,77	22	28,39	25 -3	30,58	24 -2	32,03	22 0	34,23	22 0	34,97	21 1	30,58	21 1	32,03	22 0
0631	32,76	23	28,37	26 -3	30,56	25 -2	32,01	23 0	34,21	23 0	34,95	22 1	30,56	22 1	32,01	23 0
0601	32,72	24	28,65	24 0	30,68	23 1	32,00	24 0	34,04	24 0	34,75	26 -2	28,82	33 -9	31,07	30 -6
0480	32,36	25	28,29	28 -3	30,32	27 -2	31,64	27 -2	33,68	29 -4	34,39	30 -5	28,46	36 -11	30,71	34 -9
1078	32,36	26	28,29	27 -1	30,32	26 0	31,64	26 0	33,68	28 -2	34,39	29 -3	28,46	35 -9	30,71	33 -7
0976	32,30	27	27,92	30 -3	30,11	30 -3	31,56	29 -2	33,75	25 2	34,50	27 0	30,11	27 0	31,56	26 1
0138	32,23	28	28,13	29 -1	30,18	28 0	31,63	28 0	33,68	27 1	34,28	31 -3	30,18	25 3	31,63	25 3
3682	32,12	29	27,44	33 -4	29,78	32 -3	31,23	30 -1	33,57	30 -1	34,45	28 1	29,78	29 0	31,23	27 2
0481	31,93	30	27,56	32 -2	29,74	33 -3	31,06	34 -4	33,24	32 -2	34,11	32 -2	27,88	42 -12	30,13	36 -6
0422	31,85	31	27,78	31 0	29,82	31 0	31,13	32 -1	33,17	33 -2	33,89	34 -3	27,95	40 -9	30,20	35 -4
0608	31,83	32	27,44	34 -2	29,63	34 -2	31,08	33 -1	33,28	31 1	34,02	33 -1	29,63	30 2	31,08	29 3
0196	31,81	33	30,11	17 16	30,96	21 12	31,98	25 8	32,83	35 -2	32,65	44 -11	30,96	19 14	31,98	24 9

#	S.1 :20-10-60		S.2 :10-10-70		S.3 :15-10-65		S.4 :17.5-10-62.5		S.4 :22.5-10-57.5		S.6 :25-10-55		S.7 :20-5-65		S.8 :20-7.5-62.5	
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.
3687	31,57	34	27,18	35 -1	29,38	35 -1	30,83	35 -1	33,02	34 0	33,77	35 -1	29,38	31 3	30,83	32 2
0276	31,26	35	26,90	36 -1	29,08	36 -1	30,40	36 -1	32,58	36 -1	33,45	36 -1	27,21	49 -14	29,46	41 -6
3665	31,25	36	28,98	21 15	30,11	29 7	31,22	31 5	32,36	39 -3	32,39	49 -13	30,11	26 10	31,22	28 8
3491	31,23	37	21,57	103 -66	26,40	64 -27	28,90	53 -16	33,73	26 11	36,07	13 24	30,48	23 14	30,94	31 6
8662	31,19	38	26,82	37 1	29,00	37 1	30,32	37 1	32,51	38 0	33,37	37 1	27,14	50 -12	29,39	43 -5
1106	30,86	39	26,20	39 0	28,53	39 0	29,85	39 0	32,18	41 -2	33,20	38 1	26,66	53 -14	28,91	49 -10
0091	30,79	40	26,40	38 2	28,59	38 2	30,05	38 2	32,24	40 0	32,98	39 1	28,59	34 6	30,04	37 3
0183	30,63	41	25,96	42 -1	28,29	41 0	29,74	40 1	32,08	42 -1	32,96	40 1	28,29	37 4	29,74	39 2
0712	30,54	42	26,17	40 2	28,36	40 2	29,67	41 1	31,86	44 -2	32,72	43 -1	26,49	55 -13	28,74	51 -9
0578	30,52	43	25,86	44 -1	28,19	42 1	29,51	43 0	31,84	45 -2	32,86	41 2	26,32	58 -15	28,57	52 -9
0315	30,41	44	25,74	47 -3	28,07	44 0	29,53	42 2	31,86	43 1	32,75	42 2	28,07	38 6	29,52	40 4
0745	30,32	45	25,95	43 2	28,13	43 2	29,45	44 1	31,63	48 -3	32,50	48 -3	26,27	59 -14	28,52	53 -8
0761	30,25	46	25,58	48 -2	27,92	48 -2	29,37	46 0	31,70	46 0	32,59	45 1	27,91	41 5	29,37	44 2
1285	30,19	47	25,83	45 2	28,01	46 1	29,33	47 0	31,51	49 -2	32,38	50 -3	26,14	61 -14	28,39	54 -7
0312	30,19	48	25,52	49 -1	27,85	49 -1	29,30	48 0	31,64	47 1	32,52	46 2	27,85	43 5	29,30	45 3
3070	30,12	49	25,75	46 3	27,94	47 2	29,25	49 0	31,44	52 -3	32,31	52 -3	26,07	63 -14	28,32	55 -6
0113	30,12	50	25,99	41 9	28,05	45 5	29,42	45 5	31,48	51 -1	32,18	54 -4	28,05	39 11	29,42	42 8
2995	30,04	51	20,37	125 -74	25,21	83 -32	27,71	67 -16	32,54	37 14	34,87	25 26	29,29	32 19	29,75	38 13
2483	30,04	52	25,08	54 -2	27,56	51 1	29,01	51 1	31,49	50 2	32,52	47 5	27,56	45 7	29,01	47 5
0551	29,90	53	25,51	50 3	27,70	50 3	29,15	50 3	31,35	53 0	32,09	55 -2	27,70	44 9	29,15	46 7
0528	29,89	54	25,22	53 1	27,55	52 2	29,01	52 2	31,34	54 0	32,23	53 1	27,55	46 8	29,00	48 6
0626	29,88	55	24,93	58 -3	27,41	53 2	28,86	54 1	31,34	55 0	32,36	51 4	27,40	47 8	28,86	50 5
0177	29,69	56	25,03	55 1	27,36	54 2	28,68	55 1	31,01	56 0	32,03	56 0	25,49	65 -9	27,74	62 -6
0084	29,59	57	24,92	59 -2	27,25	55 2	28,57	56 1	30,91	57 0	31,92	57 0	25,39	67 -10	27,64	63 -6
0762	29,52	58	24,86	60 -2	27,19	57 1	28,51	58 0	30,84	58 0	31,86	58 0	25,32	70 -12	27,57	66 -8
3725	29,39	59	25,02	56 3	27,21	56 3	28,52	57 2	30,71	59 0	31,57	61 -2	25,34	69 -10	27,59	65 -6
0057	29,33	60	24,66	61 -1	26,99	58 2	28,31	59 1	30,64	60 0	31,66	59 1	25,13	75 -15	27,38	67 -7
0334	29,29	61	24,62	62 -1	26,95	59 2	28,27	60 1	30,61	61 0	31,62	60 1	25,09	77 -16	27,34	68 -7
0987	28,90	62	24,23	65 -3	26,56	62 0	28,01	61 1	30,35	62 0	31,23	65 -3	26,56	54 8	28,01	57 5
0610	28,86	63	23,90	69 -6	26,38	65 -2	27,83	64 -1	30,31	63 0	31,33	63 0	26,38	56 7	27,83	60 3
0107	28,85	64	23,90	70 -6	26,37	66 -2	27,83	65 -1	30,30	64 0	31,33	64 0	26,37	57 7	27,82	61 3
3331	28,79	65	24,12	66 -1	26,45	63 2	27,77	66 -1	30,11	66 -1	31,12	66 -1	24,59	85 -20	26,84	72 -7
8472	28,78	66	23,54	76 -10	26,16	70 -4	27,61	69 -3	30,23	65 1	31,40	62 4	26,16	60 6	27,61	64 2
8312	28,62	67	23,96	67 0	26,29	68 -1	27,61	70 -3	29,94	68 -1	30,96	67 0	24,42	89 -22	26,67	74 -7
0482	28,58	68	23,91	68 0	26,24	69 -1	27,69	68 0	30,03	67 1	30,91	68 0	27,23	48 20	28,19	56 12
2431	28,46	69	23,79	71 -2	26,13	71 -2	27,44	71 -2	29,78	69 0	30,80	70 -1	24,26	93 -24	26,51	77 -8
0100	28,39	70	23,73	74 -4	26,06	74 -4	27,38	74 -4	29,71	72 -2	30,73	73 -3	24,19	97 -27	26,44	80 -10
0747	28,39	71	23,73	73 -2	26,06	73 -2	27,38	73 -2	29,71	71 0	30,73	72 -1	24,19	96 -25	26,44	79 -8

#	S.1 :20-10-60		S.2 :10-10-70		S.3 :15-10-65		S.4 :17.5-10-62.5		S.4 :22.5-10-57.5		S.6 :25-10-55		S.7 :20-5-65		S.8 :20-7.5-62.5	
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.
0869	28,39	72	23,73	72 0	26,06	72 0	27,38	72 0	29,71	70 2	30,73	71 1	24,19	95 -23	26,44	78 -6
8663	28,33	73	23,66	75 -2	25,99	75 -2	27,31	76 -3	29,64	73 0	30,66	74 -1	24,13	100 -27	26,38	82 -9
3685	28,19	74	25,48	51 23	26,84	60 14	27,94	62 12	29,30	77 -3	29,54	92 -18	26,83	51 23	27,94	58 16
0286	28,18	75	22,95	80 -5	25,56	78 -3	27,02	77 -2	29,64	74 1	30,80	69 6	25,56	64 11	27,92	70 5
2464	28,14	76	25,43	52 24	26,78	61 15	27,89	63 13	29,25	78 -2	29,49	94 -18	26,78	52 24	27,89	59 17
0978	27,92	77	22,97	79 -2	25,44	80 -3	26,89	79 -2	29,37	75 2	30,40	76 1	25,44	66 11	26,89	71 6
0240	27,91	78	22,68	83 -5	25,30	81 -3	26,75	82 -4	29,37	76 2	30,53	75 3	25,29	71 7	26,75	73 5
0570	27,86	79	23,19	77 2	25,52	79 0	26,84	80 -1	29,18	79 0	30,19	79 0	23,66	112 -33	25,91	96 -17
0353	27,72	80	22,75	81 -1	25,24	82 -2	26,55	85 -5	29,04	83 -3	30,21	78 2	23,37	115 -35	25,62	101 -21
0263	27,68	81	24,99	57 24	26,34	67 14	27,36	75 6	28,71	87 -6	29,03	106 -25	24,88	80 1	26,63	75 6
0044	27,64	82	22,68	82 0	25,16	84 -2	26,61	83 -1	29,09	80 2	30,12	80 2	25,16	73 9	26,61	76 6
0317	27,61	83	22,37	87 -4	24,99	86 -3	26,44	86 -3	29,06	81 2	30,23	77 6	24,99	78 5	26,44	81 2
0337	27,60	84	22,64	84 0	25,12	85 -1	26,57	84 0	29,05	82 2	30,07	81 3	26,11	62 22	27,07	69 15
0032	27,43	85	22,19	89 -4	24,81	89 -4	26,26	88 -3	28,88	84 1	30,05	82 3	24,81	81 4	26,26	84 1
0297	27,39	86	22,44	85 1	24,92	87 -1	26,37	87 -1	28,85	85 1	29,87	84 2	24,92	79 7	26,37	83 3
8608	27,36	87	22,39	86 1	24,87	88 -1	26,19	89 -2	28,67	89 -2	29,84	86 1	23,01	120 -33	25,26	106 -19
4201	27,35	88	22,12	91 -3	24,73	90 -2	26,19	90 -2	28,80	86 2	29,97	83 5	24,73	82 6	26,18	86 2
0012	27,27	89	24,57	63 26	25,92	76 13	26,94	78 11	28,29	95 -6	28,62	116 -27	24,47	88 1	26,22	85 4
0191	27,25	90	22,01	92 -2	24,63	91 -1	26,08	91 -1	28,70	88 2	29,87	85 5	24,63	83 7	26,08	90 0
8240	27,22	91	21,98	93 -2	24,60	93 -2	26,05	92 -1	28,67	90 1	29,84	87 4	24,60	84 7	26,05	92 -1
3249	27,19	92	24,26	64 28	25,73	77 15	26,75	81 11	28,22	98 -6	28,66	115 -23	24,27	91 1	26,02	93 -1
0300	27,11	93	21,87	95 -2	24,49	95 -2	25,94	94 -1	28,56	92 1	29,72	90 3	24,49	87 6	25,94	95 -2
2547	27,11	94	21,87	94 0	24,49	94 0	25,94	93 1	28,56	91 3	29,72	89 5	24,49	86 8	25,94	94 0
0224	26,99	95	21,47	111 -16	24,23	100 -5	25,68	98 -3	28,44	93 2	29,75	88 7	24,22	94 1	25,68	98 -3
0037	26,98	96	21,74	98 -2	24,36	97 -1	25,81	95 1	28,43	94 2	29,60	91 5	24,36	90 6	25,81	97 -1
3172	26,82	97	21,86	96 1	24,34	98 -1	25,66	99 -2	28,14	102 -5	29,31	99 -2	22,47	125 -28	24,72	116 -19
0065	26,79	98	21,55	105 -7	24,17	103 -5	25,62	102 -4	28,24	97 1	29,41	96 2	24,17	99 -1	25,62	100 -2
0068	26,79	99	21,55	104 -5	24,17	102 -3	25,62	101 -2	28,24	96 3	29,41	95 4	24,17	98 1	25,62	99 0
8471	26,79	100	22,12	90 10	24,45	96 4	25,77	96 4	28,10	104 -4	29,12	102 -2	22,59	123 -23	24,84	113 -13
0208	26,77	101	21,81	97 4	24,29	99 2	25,61	103 -2	28,09	105 -4	29,26	100 1	22,42	126 -25	24,67	118 -17
0192	26,74	102	21,21	114 -12	23,97	111 -9	25,43	109 -7	28,19	99 3	29,50	93 9	23,97	104 -2	25,43	104 -2
0455	26,73	103	21,49	108 -5	24,11	105 -2	25,57	105 -2	28,18	100 3	29,35	97 6	25,10	76 27	26,06	91 12
0321	26,71	104	21,47	110 -6	24,09	107 -3	25,55	106 -2	28,16	101 3	29,33	98 6	24,09	101 3	25,54	102 2
0490	26,66	105	21,71	99 6	24,19	101 4	25,64	100 5	28,12	103 2	29,14	101 4	25,18	72 33	26,13	87 18
0064	26,63	106	21,67	100 6	24,15	104 2	25,60	104 2	28,08	106 0	29,11	103 3	25,14	74 32	26,10	88 18
0419	26,59	107	21,63	101 6	24,11	106 1	25,43	108 -1	27,91	109 -2	29,08	105 2	22,24	131 -24	24,49	121 -14
3332	26,54	108	21,59	102 6	24,07	108 0	25,52	107 1	27,99	107 1	29,02	107 1	24,06	102 6	25,52	103 5
0318	26,52	109	21,55	107 2	24,03	110 -1	25,35	111 -2	27,83	111 -2	29,00	109 0	22,17	134 -25	24,42	124 -15

#	S.1 :20-10-60		S.2 :10-10-70		S.3 :15-10-65		S.4 :17.5-10-62.5		S.4 :22.5-10-57.5		S.6 :25-10-55		S.7 :20-5-65		S.8 :20-7.5-62.5	
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.
2492	26,52	110	21,55	106 4	24,03	109 1	25,35	110 0	27,83	110 0	29,00	108 2	22,17	133 -23	24,42	123 -13
0260	26,48	111	21,24	112 -1	23,86	113 -2	25,31	112 -1	27,93	108 3	29,10	104 7	23,86	106 5	25,31	105 6
0038	26,38	112	21,14	115 -3	23,76	114 -2	25,21	113 -1	27,83	112 0	29,00	110 2	23,76	107 5	25,21	108 4
0986	26,37	113	21,13	116 -3	23,75	115 -2	25,20	114 -1	27,82	113 0	28,99	111 2	23,75	108 5	25,20	109 4
0190	26,35	114	21,11	117 -3	23,73	116 -2	25,18	115 -1	27,80	114 0	28,97	112 2	23,73	110 4	25,18	110 4
1061	26,29	115	21,05	118 -3	23,67	118 -3	25,12	116 -1	27,74	115 0	28,91	113 2	23,67	111 4	25,12	111 4
0347	26,19	116	21,22	113 3	23,71	117 -1	25,03	117 -1	27,51	116 0	28,68	114 2	21,84	139 -23	24,09	128 -12
0025	26,07	117	23,14	78 39	24,61	92 25	25,72	97 20	27,18	121 -4	27,53	134 -17	25,36	68 49	26,09	89 28
2391	25,98	118	20,74	119 -1	23,36	119 -1	24,81	119 -1	27,43	117 1	28,60	117 1	23,36	116 2	24,81	114 4
0478	25,94	119	20,70	120 -1	23,32	120 -1	24,77	120 -1	27,39	118 1	28,56	118 1	23,32	117 2	24,77	115 4
8742	25,90	120	20,66	123 -3	23,28	121 -1	24,73	121 -1	27,35	119 1	28,52	119 1	24,27	92 28	25,22	107 13
2459	25,80	121	20,56	124 -3	23,18	123 -2	24,63	122 -1	27,25	120 1	28,42	120 1	23,18	118 3	24,63	119 2
0346	25,66	122	20,69	122 0	23,17	125 -3	24,49	124 -2	26,97	123 -1	28,14	123 -1	21,31	149 -27	23,56	136 -14
1056	25,66	123	20,69	121 2	23,17	124 -1	24,49	123 0	26,97	122 1	28,14	122 1	21,31	148 -25	23,56	135 -12
8499	25,57	124	22,22	88 36	23,90	112 12	25,01	118 6	26,68	128 -4	27,25	140 -16	23,90	105 19	25,01	112 12
0116	25,52	125	19,99	129 -4	22,75	127 -2	24,21	127 -2	26,97	124 1	28,28	121 4	22,75	122 3	24,20	126 -1
8324	25,41	126	20,17	127 -1	22,79	126 0	24,24	125 1	26,86	125 1	28,03	125 1	22,79	121 5	24,24	125 1
0295	25,36	127	20,13	128 -1	22,74	128 -1	24,20	128 -1	26,81	126 1	27,98	126 1	23,73	109 18	24,69	117 10
3147	25,34	128	19,82	132 -4	22,58	129 -1	24,03	129 -1	26,79	127 1	28,10	124 4	22,58	124 4	24,03	129 -1
3051	25,19	129	19,95	130 -1	22,57	130 -1	24,02	130 -1	26,64	129 0	27,81	127 2	23,56	113 16	24,51	120 9
0293	25,15	130	19,91	131 -1	22,53	131 -1	23,98	131 -1	26,60	130 0	27,77	129 1	23,52	114 16	24,48	122 8
3217	25,03	131	19,79	133 -2	22,41	132 -1	23,86	132 -1	26,48	131 0	27,65	131 0	22,41	127 4	23,86	131 0
3330	25,03	132	19,79	134 -2	22,41	133 -1	23,86	133 -1	26,48	132 0	27,65	132 0	22,41	128 4	23,86	132 0
0418	25,01	133	19,49	138 -5	22,25	134 -1	23,70	134 -1	26,46	133 0	27,77	128 5	22,25	130 3	23,70	133 0
8741	25,00	134	19,48	139 -5	22,24	135 -1	23,69	135 -1	26,45	134 0	27,76	130 4	22,24	132 2	23,69	134 0
2453	24,89	135	21,49	109 26	23,19	122 13	24,21	126 9	25,91	143 -8	26,58	147 -12	21,74	143 -8	23,49	137 -2
3114	24,77	136	19,25	143 -7	22,01	138 -2	23,46	137 -1	26,22	135 1	27,53	133 3	22,01	135 1	23,46	138 -2
0407	24,69	137	19,16	144 -7	21,92	141 -4	23,38	140 -3	26,14	136 1	27,45	135 2	21,92	138 -1	23,37	141 -4
8463	24,68	138	19,45	140 -2	22,06	136 2	23,52	136 2	26,13	137 1	27,30	139 -1	23,05	119 19	24,01	130 8
0755	24,62	139	19,38	141 -2	22,00	139 0	23,45	138 1	26,07	138 1	27,24	141 -2	22,00	136 3	23,45	139 0
8029	24,59	140	19,07	146 -6	21,83	142 -2	23,28	141 -1	26,04	139 1	27,35	136 4	21,83	140 0	23,28	143 -3
0413	24,59	141	19,07	147 -6	21,83	143 -2	23,28	142 -1	26,04	140 1	27,35	137 4	21,82	141 0	23,28	144 -3
3116	24,58	142	19,06	148 -6	21,82	144 -2	23,27	143 -1	26,03	141 1	27,34	138 4	21,82	142 0	23,27	145 -3
0151	24,55	143	19,31	142 1	21,93	140 3	23,38	139 4	26,00	142 1	27,17	143 0	21,93	137 6	23,38	140 3
0373	24,43	144	18,91	149 -5	21,67	146 -2	23,12	144 0	25,88	144 0	27,19	142 2	21,67	144 0	23,12	146 -2
3228	24,39	145	18,87	150 -5	21,63	147 -2	23,08	145 0	25,85	145 0	27,16	144 1	21,63	145 0	23,08	147 -2
8154	24,17	146	18,65	153 -7	21,41	151 -5	22,86	149 -3	25,62	146 0	26,93	145 1	22,40	129 17	23,35	142 4
0062	24,05	147	19,08	145 2	21,56	148 -1	22,88	148 -1	25,36	148 -1	26,53	148 -1	19,70	164 -17	21,95	155 -8

#	S.1 :20-10-60		S.2 :10-10-70		S.3 :15-10-65		S.4 :17.5-10-62.5		S.4 :22.5-10-57.5		S.6 :25-10-55		S.7 :20-5-65		S.8 :20-7.5-62.5	
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.
0121	23,94	148	18,42	156 -8	21,18	152 -4	22,63	150 -2	25,39	147 1	26,70	146 2	21,18	150 -2	22,63	148 0
3238	23,76	149	19,69	135 14	21,73	145 4	23,04	147 2	25,08	151 -2	25,79	155 -6	23,98	103 46	24,17	127 22
0285	23,74	150	20,34	126 24	22,04	137 13	23,07	146 4	24,77	153 -3	25,44	157 -7	20,59	156 -6	22,34	153 -3
0230	23,73	151	18,54	154 -3	21,13	153 -2	22,50	153 -2	25,10	149 2	26,33	149 2	21,13	151 0	22,50	149 2
0106	23,72	152	18,52	155 -3	21,12	154 -2	22,48	154 -2	25,08	150 2	26,31	150 2	21,12	152 0	22,48	150 2
3169	23,39	153	17,87	159 -6	20,63	156 -3	22,08	155 -2	24,84	152 1	26,15	151 2	20,63	155 -2	22,08	154 -1
0273	23,30	154	19,67	136 18	21,48	149 5	22,51	151 3	24,32	158 -4	25,12	159 -5	20,03	161 -7	21,78	157 -3
0101	23,30	155	19,67	137 18	21,48	150 5	22,51	152 3	24,32	159 -4	25,11	160 -5	20,03	162 -7	21,78	158 -3
0409	23,26	156	17,74	162 -6	20,50	157 -1	21,96	156 0	24,72	154 2	26,03	152 4	21,49	146 10	22,45	151 5
0148	23,25	157	17,73	163 -6	20,49	158 -1	21,94	157 0	24,70	155 2	26,01	153 4	20,49	157 0	21,94	156 1
0291	23,23	158	17,71	164 -6	20,47	159 -1	21,92	158 0	24,68	156 2	25,99	154 4	21,46	147 11	22,41	152 6
0314	22,99	159	17,79	161 -2	20,39	161 -2	21,76	160 -1	24,36	157 2	25,59	156 3	20,39	158 1	21,76	160 -1
0104	22,55	160	18,76	151 9	20,66	155 5	21,77	159 1	23,66	161 -1	24,44	161 -1	20,65	154 6	21,76	159 1
0377	22,54	161	17,02	165 -4	19,78	164 -3	21,23	163 -2	23,99	160 1	25,30	158 3	20,77	153 8	21,73	161 0
0365	22,28	162	18,65	152 10	20,47	160 2	21,49	161 1	23,31	162 0	24,10	163 -1	19,01	168 -6	20,76	164 -2
0077	22,13	163	18,12	158 5	20,13	162 1	21,24	162 1	23,24	163 0	24,13	162 1	20,13	159 4	21,24	162 1
0795	22,01	164	18,22	157 7	20,11	163 1	21,22	164 0	23,12	164 0	23,90	164 0	20,11	160 4	21,22	163 1
0152	21,37	165	17,80	160 5	19,59	165 0	20,70	165 0	22,48	165 0	23,16	165 0	19,59	165 0	20,70	165 0
0302	20,92	166	16,92	166 0	18,92	166 0	20,03	166 0	22,03	166 0	22,92	166 0	18,92	170 -4	20,03	167 -1
0376	20,59	167	16,58	167 0	18,58	167 0	19,69	167 0	21,70	167 0	22,59	167 0	19,34	166 1	20,07	166 1
3099	20,20	168	16,20	168 0	18,20	168 0	19,31	168 0	21,31	168 0	22,21	168 0	18,96	169 -1	19,69	169 -1
0280	19,81	169	15,81	169 0	17,81	169 0	18,92	169 0	20,92	170 -1	21,82	171 -2	17,81	171 -2	18,92	171 -2
0669	19,79	170	15,12	170 0	17,45	170 0	18,77	170 0	21,10	169 1	22,12	169 1	19,70	163 7	19,90	168 2
3435	19,42	171	14,46	172 -1	16,94	171 0	18,26	171 0	20,74	171 0	21,91	170 1	19,19	167 4	19,38	170 1
0001	16,38	172	14,97	171 1	15,68	172 0	16,26	172 0	16,97	172 0	17,09	172 0	14,85	172 0	15,85	172 0
0472	15,37	173	12,60	173 0	13,98	173 0	14,75	173 0	16,14	173 0	16,76	173 0	13,98	173 0	14,75	173 0
0159	15,31	174	12,54	174 0	13,92	174 0	14,69	174 0	16,08	174 0	16,70	174 0	13,92	174 0	14,69	174 0
0219	13,40	175	10,48	175 0	11,94	175 0	12,71	175 0	14,17	175 0	14,86	175 0	11,94	175 0	12,71	175 0

Tableau D.3 – Résultats des calculs de pointages et de leur classement associé pour les scénarios 9 à 15, utilisé dans l'analyse de sensibilité de la technique de récupération énergétique avec les PCP

#	S.1 :20-10-60		S.9 :20-12.5-57.5		S.10 :20-15-55		S.11 :22.5-7.5-60		S.12 :17.5-12.5-60		S.13 :17.5-7.5-65		S.14 :15-7.5-67.5		S.15 :22.5-12.5-55		
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	
0154	47,95	1	49,40	1	0	48,73	1	0	47,95	1	0	47,95	1	0	47,17	1	0
0450	45,49	2	47,74	2	0	48,34	2	0	44,56	2	0	46,42	2	0	43,57	2	0
0868	43,48	3	45,73	3	0	46,48	3	0	42,55	3	0	44,42	3	0	41,42	3	0
0575	40,98	4	41,94	6	-2	41,33	7	-3	41,47	4	0	40,48	6	-2	40,13	4	0
0246	40,55	5	42,30	5	0	42,30	6	-1	39,82	5	0	41,27	4	1	39,52	5	0
0763	40,12	6	42,37	4	2	43,42	4	2	39,19	6	0	41,06	5	1	37,76	6	0
0434	39,29	7	41,54	7	0	42,59	5	2	38,36	7	0	40,22	7	0	36,92	7	0
0105	37,35	8	38,80	9	-1	39,12	10	-2	37,35	8	0	37,35	9	-1	35,58	8	0
2390	36,59	9	38,84	8	1	40,19	8	1	35,66	10	-1	37,52	8	1	33,92	10	-1
0891	35,95	10	37,40	11	-1	37,72	12	-2	35,95	9	1	35,95	11	-1	34,18	9	1
0087	35,39	11	37,64	10	1	39,14	9	2	34,46	13	-2	36,32	10	1	32,57	13	-2
0002	35,20	12	36,95	12	0	37,30	14	-2	34,47	12	0	35,92	12	0	33,82	11	1
0889	34,99	13	36,44	13	0	36,90	15	-2	34,99	11	2	34,99	14	-1	33,08	12	1
0248	34,13	14	36,38	14	0	37,88	11	3	33,20	19	-5	35,06	13	1	31,31	18	-4
0110	34,08	15	35,45	17	-2	35,88	22	-7	34,08	14	1	34,08	17	-2	32,28	15	0
3679	34,06	16	35,81	16	0	36,39	17	-1	33,33	17	-1	34,78	15	1	32,45	14	2
3031	33,98	17	35,43	18	-1	36,03	20	-3	33,98	15	2	33,98	18	-1	31,93	16	1
0609	33,63	18	35,08	19	-1	35,83	23	-5	33,63	16	2	33,63	20	-2	31,44	17	1
2463	33,59	19	35,84	15	4	37,34	13	6	32,66	24	-5	34,53	16	3	30,78	22	-3
2621	33,15	20	34,61	23	-3	35,35	25	-5	33,15	20	0	33,15	23	-3	30,96	19	1
1100	32,89	21	34,35	24	-3	34,95	31	-10	32,89	21	0	32,89	24	-3	30,84	21	0
4397	32,77	22	34,23	25	-3	34,97	29	-7	32,77	22	0	32,77	27	-5	30,58	23	-1
0631	32,76	23	34,21	26	-3	34,95	30	-7	32,76	23	0	32,76	28	-5	30,56	24	-1
0601	32,72	24	34,97	20	4	36,62	16	8	31,79	31	-7	33,65	19	5	29,75	29	-5
0480	32,36	25	34,61	22	3	36,26	19	6	31,43	34	-9	33,29	22	3	29,39	32	-7
1078	32,36	26	34,61	21	5	36,26	18	8	31,43	33	-7	33,29	21	5	29,39	31	-5
0976	32,30	27	33,76	29	-2	34,50	34	-7	32,30	25	2	32,30	29	-2	30,11	27	0
0138	32,23	28	33,68	30	-2	34,28	37	-9	32,23	26	2	32,23	30	-2	30,18	25	3
3682	32,12	29	33,57	31	-2	34,45	35	-6	32,12	27	2	32,12	33	-4	29,78	28	1
0481	31,93	30	34,18	27	3	35,98	21	9	30,99	36	-6	32,86	25	5	28,81	35	-5
0422	31,85	31	34,10	28	3	35,75	24	7	30,92	37	-6	32,78	26	5	28,88	34	-3
0608	31,83	32	33,28	34	-2	34,02	40	-8	31,83	29	3	31,83	34	-2	29,63	30	2
0196	31,81	33	32,83	37	-4	32,66	54	-21	31,80	30	3	31,81	35	-2	30,96	20	13

#	S.1 :20-10-60		S.9 :20-12.5-57.5		S.10 :20-15-55		S.11 :22.5-7.5-60		S.12 :17.5-12.5-60		S.13 :17.5-7.5-65		S.14 :15-7.5-67.5		S.15 :22.5-12.5-55		
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	
3687	31,57	34	33,02	36	-2	33,77	43	-9	31,57	32	2	31,57	37	-3	29,38	33	1
0276	31,26	35	33,51	32	3	35,31	26	9	30,33	41	-6	32,20	31	4	28,15	39	-4
3665	31,25	36	32,36	43	-7	32,39	62	-26	31,25	35	1	31,25	40	-4	30,11	26	10
3491	31,23	37	31,69	51	-14	31,98	69	-32	33,27	18	19	29,19	67	-30	28,44	37	0
8662	31,19	38	33,44	33	5	35,24	27	11	30,26	42	-4	32,12	32	6	28,07	41	-3
1106	30,86	39	33,11	35	4	35,06	28	11	29,93	47	-8	31,80	36	3	27,60	46	-7
0091	30,79	40	32,24	44	-4	32,98	49	-9	30,79	38	2	30,79	44	-4	28,59	36	4
0183	30,63	41	32,08	45	-4	32,96	50	-9	30,63	39	2	30,63	45	-4	28,29	38	3
0712	30,54	42	32,79	38	4	34,59	33	9	29,61	51	-9	31,47	38	4	27,42	49	-7
0578	30,52	43	32,77	39	4	34,72	32	11	29,59	52	-9	31,46	39	4	27,26	51	-8
0315	30,41	44	31,86	47	-3	32,75	52	-8	30,41	40	4	30,41	49	-5	28,07	40	4
0745	30,32	45	32,57	40	5	34,37	36	9	29,38	53	-8	31,25	41	4	27,20	53	-8
0761	30,25	46	31,70	50	-4	32,59	58	-12	30,25	43	3	30,25	52	-6	27,91	43	3
1285	30,19	47	32,44	41	6	34,24	38	9	29,26	54	-7	31,13	42	5	27,08	54	-7
0312	30,19	48	31,64	53	-5	32,53	60	-12	30,19	44	4	30,19	54	-6	27,85	44	4
3070	30,12	49	32,37	42	7	34,17	39	10	29,19	55	-6	31,05	43	6	27,00	55	-6
0113	30,12	50	31,48	57	-7	32,18	65	-15	30,12	45	5	30,12	55	-5	28,05	42	8
2995	30,04	51	30,50	68	-17	30,79	82	-31	32,08	28	23	28,00	80	-29	27,25	52	-1
2483	30,04	52	31,49	56	-4	32,52	61	-9	30,04	46	6	30,04	56	-4	27,56	47	5
0551	29,90	53	31,35	58	-5	32,09	66	-13	29,90	48	5	29,90	57	-4	27,70	45	8
0528	29,89	54	31,34	59	-5	32,23	64	-10	29,89	49	5	29,89	58	-4	27,55	48	6
0626	29,88	55	31,34	60	-5	32,36	63	-8	29,88	50	5	29,88	59	-4	27,41	50	5
0177	29,69	56	31,94	46	10	33,89	41	15	28,76	61	-5	30,63	46	10	26,43	60	-4
0084	29,59	57	31,84	48	9	33,79	42	15	28,66	62	-5	30,52	47	10	26,32	63	-6
0762	29,52	58	31,77	49	9	33,72	44	14	28,59	63	-5	30,46	48	10	26,26	65	-7
3725	29,39	59	31,64	52	7	33,44	47	12	28,46	64	-5	30,32	50	9	26,27	64	-5
0057	29,33	60	31,58	54	6	33,53	45	15	28,39	65	-5	30,26	51	9	26,06	67	-7
0334	29,29	61	31,54	55	6	33,49	46	15	28,36	66	-5	30,22	53	8	26,02	68	-7
0987	28,90	62	30,35	69	-7	31,23	74	-12	28,90	57	5	28,90	68	-6	26,56	59	3
0610	28,86	63	30,31	70	-7	31,34	72	-9	28,86	58	5	28,86	69	-6	26,38	61	2
0107	28,85	64	30,30	71	-7	31,33	73	-9	28,85	59	5	28,85	70	-6	26,37	62	2
3331	28,79	65	31,04	61	4	32,99	48	17	27,86	73	-8	29,72	60	5	25,52	72	-7
8472	28,78	66	30,23	72	-6	31,40	71	-5	28,78	60	6	28,78	72	-6	26,16	66	0
8312	28,62	67	30,87	62	5	32,82	51	16	27,69	74	-7	29,56	61	6	25,36	74	-7
0482	28,58	68	29,53	77	-9	29,92	95	-27	29,07	56	12	28,08	79	-11	26,74	58	10
2431	28,46	69	30,71	63	6	32,66	53	16	27,53	77	-8	29,39	62	7	25,19	76	-7
0100	28,39	70	30,64	66	4	32,59	57	13	27,46	80	-10	29,33	65	5	25,13	81	-11
0747	28,39	71	30,64	65	6	32,59	56	15	27,46	79	-8	29,33	64	7	25,13	80	-9

#	S.1 :20-10-60		S.9 :20-12.5-57.5		S.10 :20-15-55		S.11 :22.5-7.5-60		S.12 :17.5-12.5-60		S.13 :17.5-7.5-65		S.14 :15-7.5-67.5		S.15 :22.5-12.5-55		
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	
0869	28,39	72	30,64	64	8	32,59	55	17	27,46	78	-6	29,33	63	9	25,13	79	-7
8663	28,33	73	30,58	67	6	32,53	59	14	27,39	82	-9	29,26	66	7	25,06	82	-9
3685	28,19	74	29,30	81	-7	29,54	103	-29	28,19	67	7	28,19	76	-2	26,83	56	18
0286	28,18	75	29,64	75	0	30,80	81	-6	28,18	68	7	28,18	77	-2	25,56	71	4
2464	28,14	76	29,25	82	-6	29,49	105	-29	28,14	69	7	28,14	78	-2	26,78	57	19
0978	27,92	77	29,37	79	-2	30,40	86	-9	27,92	71	6	27,92	82	-5	25,44	73	4
0240	27,91	78	29,37	80	-2	30,54	84	-6	27,91	72	6	27,92	84	-6	25,29	75	3
0570	27,86	79	30,11	73	6	32,06	68	11	26,93	95	-16	28,79	71	8	24,59	94	-15
0353	27,72	80	29,97	74	6	32,07	67	13	26,79	98	-18	28,65	73	7	24,30	98	-18
0263	27,68	81	29,43	78	3	30,48	85	-4	26,96	94	-13	28,41	74	7	25,61	70	11
0044	27,64	82	29,09	83	-1	30,12	88	-6	27,64	75	7	27,64	88	-6	25,16	78	4
0317	27,61	83	29,06	85	-2	30,23	87	-4	27,61	76	7	27,61	89	-6	24,99	84	-1
0337	27,60	84	28,55	100	-16	29,08	110	-26	28,09	70	14	27,10	101	-17	25,61	69	15
0032	27,43	85	28,88	90	-5	30,05	91	-6	27,43	81	4	27,43	93	-8	24,81	87	-2
0297	27,39	86	28,85	91	-5	29,87	96	-10	27,39	83	3	27,40	94	-8	24,92	86	0
8608	27,36	87	29,61	76	11	31,71	70	17	26,42	106	-19	28,29	75	12	23,94	105	-18
4201	27,35	88	28,81	93	-5	29,97	94	-6	27,35	84	4	27,35	95	-7	24,73	88	0
0012	27,27	89	29,02	88	1	30,07	90	-1	26,54	102	-13	27,99	81	8	25,19	77	12
0191	27,25	90	28,70	96	-6	29,87	97	-7	27,25	85	5	27,25	96	-6	24,63	91	-1
8240	27,22	91	28,67	97	-6	29,84	98	-7	27,22	87	4	27,22	97	-6	24,60	93	-2
3249	27,19	92	28,94	89	3	30,11	89	3	26,47	104	-12	27,92	83	9	25,00	83	9
0300	27,11	93	28,56	99	-6	29,73	101	-8	27,11	91	2	27,11	100	-7	24,49	96	-3
2547	27,11	94	28,56	98	-4	29,73	100	-6	27,11	90	4	27,11	99	-5	24,49	95	-1
0224	26,99	95	28,44	102	-7	29,75	99	-4	26,99	92	3	26,99	102	-7	24,23	99	-4
0037	26,98	96	28,43	103	-7	29,60	102	-6	26,98	93	3	26,98	103	-7	24,36	97	-1
3172	26,82	97	29,07	84	13	31,17	75	22	25,89	114	-17	27,76	85	12	23,41	114	-17
0065	26,79	98	28,24	105	-7	29,41	107	-9	26,79	97	1	26,79	105	-7	24,17	101	-3
0068	26,79	99	28,24	104	-5	29,41	106	-7	26,79	96	3	26,79	104	-5	24,17	100	-1
8471	26,79	100	29,04	86	14	30,99	77	23	25,85	116	-16	27,72	86	14	23,52	113	-13
0208	26,77	101	29,02	87	14	31,12	76	25	25,84	117	-16	27,71	87	14	23,36	116	-15
0192	26,74	102	28,19	106	-4	29,50	104	-2	26,73	99	3	26,74	106	-4	23,97	104	-2
0455	26,73	103	27,69	116	-13	28,36	120	-17	27,23	86	17	26,24	116	-13	24,61	92	11
0321	26,71	104	28,17	107	-3	29,33	108	-4	26,71	100	4	26,71	107	-3	24,09	102	2
0490	26,66	105	27,62	117	-12	28,15	122	-17	27,16	88	17	26,17	117	-12	24,68	89	16
0064	26,63	106	27,59	118	-12	28,12	123	-17	27,12	89	17	26,13	118	-12	24,65	90	16
0419	26,59	107	28,84	92	15	30,94	78	29	25,66	120	-13	27,53	90	17	23,18	120	-13
3332	26,54	108	28,00	108	0	29,02	111	-3	26,54	101	7	26,54	110	-2	24,06	103	5
0318	26,52	109	28,77	95	14	30,87	80	29	25,58	123	-14	27,45	92	17	23,10	122	-13

#	S.1 :20-10-60		S.9 :20-12.5-57.5			S.10 :20-15-55			S.11 :22.5-7.5-60			S.12 :17.5-12.5-60			S.13 :17.5-7.5-65			S.14 :15-7.5-67.5			S.15 :22.5-12.5-55		
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	
2492	26,52	110	28,77	94	16	30,87	79	31	25,58	122	-12	27,45	91	19	23,10	121	-11	21,93	122	-12	30,67	112	-2
0260	26,48	111	27,93	109	2	29,10	109	2	26,48	103	8	26,48	111	0	23,86	107	4	22,69	106	5	30,65	113	-2
0038	26,38	112	27,83	112	0	29,00	112	0	26,38	108	4	26,38	112	0	23,76	109	3	22,59	109	3	31,04	109	3
0986	26,37	113	27,82	113	0	28,99	113	0	26,37	109	4	26,37	113	0	23,75	110	3	22,58	110	3	30,00	121	-8
0190	26,35	114	27,80	114	0	28,97	114	0	26,35	110	4	26,35	114	0	23,73	111	3	22,56	111	3	30,64	114	0
1061	26,29	115	27,74	115	0	28,91	115	0	26,29	111	4	26,29	115	0	23,67	112	3	22,50	112	3	30,04	120	-5
0347	26,19	116	28,44	101	15	30,54	83	33	25,26	128	-12	27,13	98	18	22,78	127	-11	21,61	128	-12	30,83	111	5
0025	26,07	117	26,80	125	-8	26,77	146	-29	26,45	105	12	25,69	122	-5	24,98	85	32	24,63	71	46	29,77	125	-8
2391	25,98	118	27,43	119	-1	28,60	116	2	25,98	112	6	25,98	119	-1	23,36	115	3	22,19	115	3	30,19	116	2
0478	25,94	119	27,39	120	-1	28,56	117	2	25,94	113	6	25,94	120	-1	23,32	117	2	22,15	117	2	29,60	131	-12
8742	25,90	120	26,85	124	-4	27,53	132	-12	26,39	107	13	25,40	127	-7	23,77	108	12	22,61	108	12	30,12	118	2
2459	25,80	121	27,25	121	0	28,42	118	3	25,80	118	3	25,80	121	0	23,18	119	2	22,01	120	1	30,07	119	2
0346	25,66	122	27,91	111	11	30,01	93	29	24,72	137	-15	26,59	109	13	22,24	137	-15	21,07	135	-13	29,33	133	-11
1056	25,66	123	27,91	110	13	30,01	92	31	24,72	136	-13	26,59	108	15	22,24	136	-13	21,07	134	-11	30,20	115	8
8499	25,57	124	26,68	127	-3	27,25	137	-13	25,57	124	0	25,58	124	0	23,90	106	18	23,33	95	29	29,24	136	-12
0116	25,52	125	26,97	122	3	28,28	121	4	25,51	125	0	25,52	125	0	22,75	128	-3	21,44	129	-4	29,79	123	2
8324	25,41	126	26,86	123	3	28,03	126	0	25,41	126	0	25,41	126	0	22,79	126	0	21,62	127	-1	30,17	117	9
0295	25,36	127	26,32	133	-6	26,99	142	-15	25,86	115	12	24,87	134	-7	23,24	118	9	22,07	119	8	29,63	129	-2
3147	25,34	128	26,79	126	2	28,10	124	4	25,34	127	1	25,34	128	0	22,58	129	-1	21,27	131	-3	29,63	130	-2
3051	25,19	129	26,14	136	-7	26,82	144	-15	25,68	119	10	24,69	136	-7	23,06	123	6	21,89	124	5	29,96	122	7
0293	25,15	130	26,11	138	-8	26,78	145	-15	25,65	121	9	24,66	138	-8	23,03	124	6	21,86	125	5	29,78	124	6
3217	25,03	131	26,48	129	2	27,65	129	2	25,03	130	1	25,03	129	2	22,41	132	-1	21,24	132	-1	29,74	126	5
3330	25,03	132	26,48	130	2	27,65	130	2	25,03	131	1	25,03	130	2	22,41	133	-1	21,24	133	-1	29,34	132	0
0418	25,01	133	26,47	131	2	27,78	127	6	25,01	132	1	25,01	131	2	22,25	134	-1	20,94	136	-3	29,72	127	6
8741	25,00	134	26,45	132	2	27,76	128	6	25,00	133	1	25,00	132	2	22,24	135	-1	20,93	137	-3	29,65	128	6
2453	24,89	135	26,64	128	7	28,04	125	10	24,16	147	-12	25,61	123	12	22,46	131	4	21,79	126	9	29,30	134	1
3114	24,77	136	26,22	135	1	27,53	131	5	24,77	135	1	24,77	135	1	22,01	138	-2	20,70	140	-4	29,19	137	-1
0407	24,69	137	26,14	137	0	27,45	133	4	24,68	138	-1	24,69	137	0	21,92	141	-4	20,61	142	-5	29,28	135	2
8463	24,68	138	25,64	146	-8	26,31	152	-14	25,18	129	9	24,19	147	-9	22,56	130	8	21,39	130	8	28,75	144	-6
0755	24,62	139	26,07	139	0	27,24	138	1	24,62	140	-1	24,62	139	0	22,00	139	0	20,83	138	1	28,75	145	-6
8029	24,59	140	26,04	140	0	27,35	134	6	24,59	141	-1	24,59	140	0	21,83	143	-3	20,52	144	-4	29,17	138	2
0413	24,59	141	26,04	141	0	27,35	135	6	24,59	142	-1	24,59	141	0	21,83	144	-3	20,52	145	-4	29,17	139	2
3116	24,58	142	26,03	142	0	27,35	136	6	24,58	143	-1	24,58	142	0	21,82	145	-3	20,51	146	-4	29,07	140	2
0151	24,55	143	26,00	143	0	27,17	140	3	24,55	144	-1	24,55	143	0	21,93	140	3	20,76	139	4	28,98	141	2
0373	24,43	144	25,88	144	0	27,19	139	5	24,43	145	-1	24,43	145	-1	21,67	146	-2	20,36	147	-3	28,85	142	2
3228	24,39	145	25,85	145	0	27,16	141	4	24,39	146	-1	24,40	146	-1	21,63	147	-2	20,32	148	-3	28,56	146	-1
8154	24,17	146	25,12	149	-3	25,94	155	-9	24,66	139	7	23,67	153	-7	21,90	142	4	20,59	143	3	28,52	147	-1
0062	24,05	147	26,30	134	13	28,40	119	28	23,11	155	-8	24,98	133	14	20,63	158	-11	19,46	157	-10	28,33	148	-1

#	S.1 :20-10-60		S.9 :20-12.5-57.5		S.10 :20-15-55		S.11 :22.5-7.5-60		S.12 :17.5-12.5-60		S.13 :17.5-7.5-65		S.14 :15-7.5-67.5		S.15 :22.5-12.5-55		
	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	Point.	Class.	
0121	23,94	148	25,39	148	0	26,70	147	1	23,94	148	0	23,94	150	-2	21,18	149	-1
3238	23,76	149	23,95	160	-11	23,54	164	-15	24,89	134	15	22,63	160	-11	22,85	125	24
0285	23,74	150	25,49	147	3	26,89	143	7	23,02	157	-7	24,47	144	6	21,32	148	2
0230	23,73	151	25,10	150	1	26,33	150	1	23,73	150	1	23,73	151	0	21,13	150	1
0106	23,72	152	25,08	151	1	26,32	151	1	23,72	152	0	23,72	152	0	21,12	151	1
3169	23,39	153	24,85	154	-1	26,16	153	0	23,39	153	0	23,39	154	-1	20,63	157	-4
0273	23,30	154	25,05	152	2	26,57	148	6	22,57	159	-5	24,03	148	6	20,76	154	0
0101	23,30	155	25,05	153	2	26,56	149	6	22,57	160	-5	24,02	149	6	20,76	155	0
0409	23,26	156	24,22	157	-1	25,04	158	-2	23,76	149	7	22,77	158	-2	21,00	152	4
0148	23,25	157	24,70	155	2	26,01	154	3	23,25	154	3	23,25	155	2	20,49	159	-2
0291	23,23	158	24,19	158	0	25,00	159	-1	23,72	151	7	22,73	159	-1	20,96	153	5
0314	22,99	159	24,36	156	3	25,59	156	3	22,99	158	1	22,99	157	2	20,39	160	-1
0104	22,55	160	23,66	161	-1	24,45	160	0	22,55	161	-1	22,55	161	-1	20,65	156	4
0377	22,54	161	23,50	162	-1	24,31	161	0	23,04	156	5	22,05	163	-2	20,28	161	0
0365	22,28	162	24,03	159	3	25,55	157	5	21,56	164	-2	23,01	156	6	19,74	164	-2
0077	22,13	163	23,24	163	0	24,13	162	1	22,13	162	1	22,13	162	1	20,13	162	1
0795	22,01	164	23,12	164	0	23,90	163	1	22,01	163	1	22,01	164	0	20,11	163	1
0152	21,37	165	22,48	165	0	23,16	165	0	21,37	165	0	21,37	165	0	19,59	165	0
0302	20,92	166	22,03	166	0	22,93	166	0	20,92	167	-1	20,92	166	0	18,92	167	-1
0376	20,59	167	21,32	167	0	21,83	167	0	20,97	166	1	20,21	167	0	18,96	166	1
3099	20,20	168	20,94	168	0	21,45	169	-1	20,58	169	-1	19,83	168	0	18,58	168	0
0280	19,81	169	20,92	169	0	21,82	168	1	19,81	171	-2	19,81	169	0	17,81	171	-2
0669	19,79	170	19,98	170	0	19,87	170	0	20,91	168	2	18,66	170	0	18,58	169	1
3435	19,42	171	19,62	171	0	19,66	171	0	20,55	170	1	18,30	171	0	18,07	170	1
0001	16,38	172	17,38	172	0	17,91	172	0	15,97	172	0	16,80	172	0	15,26	172	0
0472	15,37	173	16,14	173	0	16,76	173	0	15,37	173	0	15,37	173	0	13,98	173	0
0159	15,31	174	16,08	174	0	16,70	174	0	15,31	174	0	15,31	174	0	13,92	174	0
0219	13,40	175	14,17	175	0	14,86	175	0	13,40	175	0	13,40	175	0	11,94	175	0
															11,24	175	0
															17,96	175	0