POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Modélisation conséquentielle de la consommation d'énergie d'un groupe de serveurs générant un nuage informatique et attributionnelle des bénéfices de la virtualisation
Auteur: Author:	Nathan Vandromme
Date:	2014
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Vandromme, N. (2014). Modélisation conséquentielle de la consommation d'énergie d'un groupe de serveurs générant un nuage informatique et attributionnelle des bénéfices de la virtualisation [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/1569/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/1569/
Directeurs de recherche: Advisors:	Réjean Samson
Programme: Program:	Génie chimique

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

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION CONSÉQUENTIELLE DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE D'UN GROUPE DE SERVEURS GÉNÉRANT UN NUAGE INFORMATIQUE ET ATTRIBUTIONNELLE DES BÉNÉFICES DE LA VIRTUALISATION

NATHAN VANDROMME

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CHIMIQUE)

OCTOBRE 2014

© Nathan Vandromme, 2014.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION CONSÉQUENTIELLE DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE D'UN GROUPE DE SERVEURS GÉNÉRANT UN NUAGE INFORMATIQUE ET ATTRIBUTIONNELLE DES BÉNÉFICES DE LA VIRTUALISATION

présenté par : VANDROMME Nathan

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

Mme GAUDREAULT Caroline, Ph. D., présidente

M. SAMSON Réjean, Ph. D., membre et directeur de recherche

Mme LEVASSEUR Annie, Ph. D., membre

DÉDICACE

À ma famille

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de recherche Réjean Samson pour m'avoir soutenu pendant toute ma maîtrise et pour avoir cru en moi surtout pendant les moments les plus incertains du projet. Un très grand merci à Thomas Dandres pour m'avoir guidé pendant l'ensemble du projet, pour m'avoir donné d'innombrables conseils me permettant d'achever mon projet de maîtrise et également pour avoir relu avec une grande minutie mon mémoire.

J'aimerais également remercier l'équipe de l'ETS, Saida Khazri, Reza Farrahi Moghaddam, Kim Khoa Nguyen et Mohamed Cheriet pour leur soutien technique et scientifique dans l'ensemble de la partie technologique et informatique de mon mémoire et pour leur aide précieuse lors de la rédaction de mon article.

Je souhaiterais remercier l'équipe d'Environnement Canada, Andy Wong, Glasha Obrekht pour les données, indispensables à la réalisation de ce projet, qu'ils ont fournies et pour avoir répondu aux questions posées lors de l'interprétation de ces données.

Je voudrais également remercier Yves Lemieux pour ses conseils avisés durant la réalisation de mon projet.

Un grand merci à toute l'équipe du CIRAIG et plus particulièrement à Constant, Elsa, Gaël, François, Éric, Stéphanie, Laure, Viet, Vincent, Amina, Hassana, Dominique et bien d'autres, pour m'avoir apporté conseils, aide et bons moments lorsque j'en avais besoin.

Pour avoir eu la patiente et le courage de corriger l'anglais de mes présentations, articles, abstracts… je tiens à remercier Rudi, Serge et Constant.

Merci à mes amis restés en Europe avec qui je suis resté en contact et qui m'ont soutenu pendant tout mon mémoire, Némo, Nico, Nico, Flo, John, et bien d'autres.

Je remercie le CRSNG du Canada pour leur soutien financier par le biais de la subvention CRDPJ 424371-11 et plus particulièrement Ericsson Canada Inc.

Je remercie également pour leur soutien financier les partenaires industriels du CIRAIG, à savoir ArcelorMittal, Bombardier, Le Mouvement Desjardins, Hydro-Québec, LVMH, Michelin, Nestlé, RECYC-QUÉBEC, RONA, SAQ, Solvay, Total, Umicore et Véolia Environnement.

Finalement je tiens à remercier particulièrement mes parents, mes frères, ma marraine et mes grands-parents pour le soutien sans faille dont ils ont fait preuve pendant toute la durée de ma maîtrise.

RÉSUMÉ

L'électricité est actuellement un élément essentiel des sociétés modernes, utilisée dans la vie de tous les jours par l'ensemble de la population. Cependant, sa production contribue à certains dégâts environnementaux, dont le dégagement de gaz à effet de serre (GES), reconnu par une très grande majorité de la communauté scientifique comme étant à l'origine du réchauffement climatique. Les centres de données, pouvant être considérés comme des superordinateurs, représentent 1,3 % de la consommation mondiale d'électricité, ce qui est très impressionnant, en considérant la jeunesse de cette technologie. Pour diminuer leur consommation, différentes stratégies d'optimisation existent, il est notamment possible de citer la virtualisation. Celle-ci permet la création de machines virtuelles (VM), c'est-à-dire l'équivalent virtuel d'un système d'opération possédant toutes les fonctionnalités d'un serveur physique. Les serveurs, pouvant héberger plusieurs VM, sont dès lors capables de répondre simultanément aux demandes de plusieurs clients, permettant ainsi une augmentation de l'utilisation des ressources (par rapport à un serveur par client). Cependant, la virtualisation a un coût lié à l'utilisation d'un « hypervisor », c'est-à-dire d'un programme liant les VM au matériel physique des serveurs.

Pour pouvoir choisir adéquatement quelle stratégie d'optimisation à mettre en œuvre, il est nécessaire de posséder des outils d'évaluation environnementale permettant une comparaison équitable des différentes approches d'optimisation, pour ainsi permettre la quantification de leurs impacts et de leurs bénéfices environnementaux. L'analyse du cycle de vie (ACV) semble satisfaire l'ensemble de ces critères, car c'est une méthodologie permettant de quantifier les impacts environnementaux potentiels de l'ensemble du cycle de vie d'un produit, d'un procédé ou d'un service. Néanmoins, l'ACV est encore une approche en développement, car de nombreux aspects méthodologiques doivent être améliorés.

Le cadre de ce mémoire est la quantification des impacts environnementaux liés à l'installation de centres de données, au Canada, ainsi que l'évaluation des bénéfices environnementaux de la virtualisation. La problématique se divise ainsi en deux parties : premièrement, comment modéliser la consommation électrique future de centres de données implantés au Canada, et deuxièmement, comment quantifier les bénéfices environnementaux de la virtualisation? Deux objectifs principaux ont ainsi été fixés pour répondre aux deux parties de la problématique développée ci-dessus : modéliser, en combinant l'ACV conséquentielle à un modèle

économique, les impacts environnementaux de la consommation d'énergie de la phase d'utilisation d'un groupe de serveurs implanté au Canada et réaliser une ACV permettant l'évaluation des bénéfices environnementaux potentiels de la virtualisation.

Deux méthodologies sont utilisées pour remplir les deux objectifs du mémoire. La première, pour évaluer l'impact de l'implantation de centres de données au Canada sur le système énergétique nord-américain, développe une approche conséquentielle et prospective combinant l'ACV et le modèle économique, E3MC (celui-ci décrit le système énergétique nord-américain). Une ACV est dite prospective et conséquentielle lorsqu'elle étudie respectivement des systèmes futurs et des impacts environnementaux liés à des changements dans un système. Cette analyse est réalisée en 5 étapes. Premièrement, des scénarios, décrivant l'évolution de la consommation des centres de données au cours du temps, sont développés avec un scénario de référence dans lequel aucun centre de données n'est implanté. Deuxièmement, les scénarios sont implémentés dans le modèle E3MC. Troisièmement, les technologies marginales, c'est-à-dire les technologies répondant à la demande électrique supplémentaire des nouveaux centres de données, sont identifiées à partir des résultats obtenus avec le modèle E3MC. Quatrièmement, les impacts environnementaux de chaque scénario sont calculés en utilisant le mix de technologies marginales fourni à l'étape précédente, la base de données ACV ecoinvent et la méthode d'impact « IMPACT2002+ ». Finalement, les résultats obtenus sont interprétés et comparés à ceux obtenus à partir d'une approche attributionnelle.

La deuxième méthodologie est une ACV préliminaire, c'est-à-dire utilisant des données approximatives, d'un service de vidéoconférences. Le système étudié est ainsi composé de quatre éléments principaux : les ordinateurs et les équipements d'accès à internet des clients utilisant le service de vidéoconférences, la consommation d'énergie des infrastructures permettant le transfert de l'information et le système de serveurs contenant le serveur lame hébergeant le service de vidéoconférences. Un serveur lame contient tous les équipements électroniques d'un serveur, mais arrangés de manière compacte pour minimiser l'espace nécessaire. Une étude plus approfondie du cycle de vie du système de serveurs est réalisée pour permettre une meilleure description des bénéfices environnementaux que peut réaliser l'opérateur du centre de données. L'évaluation de la virtualisation se fait à l'aide de trois scénarios d'utilisation du serveur lame : dans le premier, le serveur lame hébergeant le service de vidéoconférences n'utilise pas la virtualisation. Dans le second scénario, la virtualisation est utilisée par le serveur lame. Finalement dans le troisième scénario, deux serveurs lames ayant recours à la virtualisation sont utilisés pour héberger le service

de vidéoconférences, pour ainsi améliorer sa fiabilité. Finalement, pour tester la robustesse des conclusions, différentes analyses de sensibilité sont réalisées.

Les résultats obtenus à partir de l'approche combinant l'ACV au modèle E3MC indiquent que les principales sources futures d'électricité marginales sont le gaz naturel et le charbon avec une légère participation de l'hydroélectricité. De plus, la demande électrique des nouveaux centres de données induit une diminution marginale importante des exportations du Canada vers les États-Unis. Cette diminution marginale des exportations provoque une production marginale compensatoire aux États-Unis à base de combustible fossile. Enfin, l'augmentation de la demande électrique des nouveaux centres de données provoque une augmentation de la proportion d'hydroélectricité et une diminution de celle du charbon dans le grid mix marginal. Cependant, bien que l'utilisation du modèle E3MC augmente le nombre de critères considérés à travers l'utilisation de nombreux paramètres économiques, technologiques, démographiques, environnementaux…, elle augmente également les incertitudes et diminue la transparence de l'étude. Effectivement, l'utilisation du modèle E3MC, de par sa complexité, a nécessité la participation d'experts de chez Environnement Canada. Par ailleurs, le modèle et les données utilisées pour le calibrer n'ont pas pu être obtenus pour des raisons de confidentialité. Ainsi, pour développer l'utilisation de modèles économiques en ACV, car ceux-ci permettent de prendre en considération de nombreux phénomènes, il serait nécessaire de faire appel à différents experts pour réaliser un travail multidisciplinaire incluant à la fois la science de l'ACV et de l'économie.

Les résultats obtenus à partir de l'ACV préliminaire indiquent clairement des bénéfices non négligeables au niveau des serveurs lorsque la virtualisation est utilisée, mais les bénéfices sont mitigés par la faible participation du système de serveurs aux impacts totaux d'une vidéoconférence. Effectivement, l'ACV préliminaire indique que les impacts d'une vidéoconférence sont majoritairement provoqués par la production de l'ordinateur portable et par la consommation d'électricité du transfert de données et de l'ordinateur portable. Néanmoins, l'application d'une stratégie de virtualisation à plus grande échelle, pour des applications nécessitant une plus grande capacité de calcul, pourrait apporter des gains environnementaux globaux plus importants. Par ailleurs, la virtualisation permet d'augmenter l'utilisation des serveurs existants, évitant ainsi la construction de nouveaux centres de données.

Ainsi, l'ACV préliminaire a permis d'apporter une vision plus globale à ce type d'évaluation environnementale, en considérant à la fois l'entièreté du cycle de vie et un grand nombre de critères environnementaux. Cependant, les incertitudes entourant les résultats sont importantes et il serait nécessaire pour améliorer les ACV touchant au secteur des TIC d'augmenter la coopération avec les industries utilisant et produisant les TIC, pour ainsi combler l'important manque de données présent dans la description des TIC en ACV.

ABSTRACT

Nowadays, electricity is an essential element of our modern society, people use it every day in their daily activities. However, its production is responsible for numerous environmental damages accounting for 30% of the global greenhouse gas (GHG) emissions, recognized by the majority of the scientific community to be the origin of the climatic changes. Data center can be considered as supercomputers and represent already 1,3 % of the global electricity consumption. It is a very high portion considering the youth of this technology. To decrease their consumption, different strategies of optimization exist, for example the virtualization, which makes it possible to install several operating systems known as virtual machines (VM) on a single server, increasing its utilization. But virtualization has a cost due to the utilisation of a programme, named “hypervisor”, which connects the VM to the hardware.

To choose adequately the strategy to apply, it is necessary to possess an environmental evaluation tool, allowing the quantification of the environmental gains and costs of each optimization approaches. Life cycle assessment (LCA) seems to satisfy these conditions because it is a methodology that quantifies the potential environmental impacts of the entire life cycle of a product or service. However, LCA is a methodological tool still in development and many issues are in discussion.

This master thesis aims to quantify the environmental impacts induced by the installation of data centers in Canada and to evaluate the environmental benefits of using virtualization. The problematic is divided in two parts: first, how to model the environmental impacts of new data centers installed in Canada, and second, how to quantify the benefits of virtualization? Two objectives are fixed to solve the two parts of the problematic: evaluate, by combining consequential LCA with an economic model, the environmental impacts of energy consumption of data centers implanted in Canada and evaluate with a LCA approach the environmental benefits of virtualization.

The first part of the methodology develops a consequential and prospective approach, combining LCA with the economic model E3MC (which describe the North American energy sector and the Canadian economy), to evaluate the impact on the North American energy sector of datacenters implantation in Canada. A LCA is prospective when a future system is evaluated and it is consequential when impacts from a change due to a decision are evaluated. This analysis is

divided in five steps. Firstly, scenarios are developed describing the evolution of datacenters consumption between 2015 and 2030, with a reference scenario where no datacenters are installed. Secondly, the scenarios are modeled in the E3MC model. Thirdly, the marginal technologies, those which supply the new datacenters, are identified with the results of the E3MC model. Fourthly, the environmental impacts are calculated with the marginal technologies, the impact method "IMPACT2002+" and the LCA data base ecoinvent. Finally the results are interpreted and compared with those obtained with an attributional approach.

The second part of the methodology is a screening-LCA study where approximated data are used to draw a preliminary picture of the environmental impact of a videoconference service with call management servers relying on virtualization. The studied system is composed of four processes: the laptop and the internet access device of the customer, the energy consumption needed for the data transfer and the server hosting the videoconference. A more accurate study of the server impact is done to obtain a better description of the benefits of virtualization. Three scenarios of server utilization are modeled: in the first one the server does not use virtualisation, in the second scenario the virtualisation is used by the server and in the third scenario two servers, using the virtualisation, share the videoconferencing management to increase the reliability of the service. Finely, different sensitivity analysis are performed to test the conclusion strength.

The results from the combination of LCA with the E3MC model indicate three major conclusions: first, the marginal technologies are mainly the natural gas and coal with a small participation of hydroelectricity at the end of the simulation. Second, the perturbation induced an important compensatory production from the United-States. Third, an increase of the perturbation induces an increase of the marginal production in Canada resulting in an increase of hydroelectricity and a decrease of the coal in the marginal technologies share. The model allows the consideration of a high number of parameters but increases also the uncertainties and decreases the results transparency. Indeed, the complexity of recent economic models increases the need for economists to create, use and understand them. We recommend to increase the cooperation between economists and LCA analysts in the future when economic models are used to determine marginal technologies.

The screening LCA of the videoconferencing service indicates clearly a high decrease of server environmental impacts when virtualization is used, but the importance of these benefits is

mitigated by the small participation of server to the videoconferencing service total impacts. Indeed, the total impacts are mainly caused by the customer's laptop and the data transfer. But, the application of virtualization to a bigger scale and for applications requiring a higher computing capacity would bring more important environmental benefits. Thus the screening-LCA brought a more global vision to these types of problem by considering the entire life cycle and numerous environmental impacts. However, the uncertainties on the results are high and we recommend to involve industries producing and using ICT for future LCA on the subject to decrease the existing data gap in this sector in LCA.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ VI

ABSTRACT X

TABLE DES MATIÈRES XIII

LISTE DES TABLEAUX XVII

LISTE DES FIGURES XIX

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XXIII

LISTE DES ANNEXES XXV

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 3

1.1 Motivations 3

1.1.1 La croissance des TIC 3

1.1.2 Les sources d'inefficacité des centres de données 5

1.1.3 Les méthodes d'efficacité énergétique des centres de données 7

1.2 Analyse du Cycle de Vie 10

1.2.1 Définition 10

1.2.2 Méthodologie 11

1.2.3 Les limites de l'ACV 16

1.2.4 Les différentes approches ACV 18

1.3 ACV-conséquentielle 19

1.3.1 ACV-attributionnelle et ACV-conséquentielle 19

1.3.2 Aspects méthodologiques 22

1.4 ACV-prospective 33

1.5 L'Analyse du cycle de vie et les TIC 36

1.5.1 Problématique de l'ACV et de l'électricité 36

1.5.2 Problématiques de l'ACV et des TIC 40

CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS 44

2.1 Résumé de la problématique 44

2.2 Objectifs 45

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 47

3.1 Résumé de la méthodologie 47

3.1.1 Résumé de la combinaison de l'ACV avec un modèle économique 47

3.1.2 Résumé de l'évaluation des bénéfices environnementaux de la virtualisation 48

3.2 Combinaison de l'ACV avec un modèle économique 49

3.2.1 Modèle E3MC 49

3.2.2 Scénarios 55

3.2.3 Interprétation des résultats 58

3.2.4 Approche prospective attributionnelle 64

3.3 Évaluation des bénéfices environnementaux de la virtualisation 65

3.3.1 Définition de l'objectif et du système 66

3.3.2 Évaluation des impacts 84

3.3.3 Interprétation 84

CHAPITRE 4 RÉSULTATS : COMBINAISON DE L'ACV AVEC UN MODÈLE ÉCONOMIQUE 86

4.1 Conséquences de l'implantation de centres de données sur les exportations d'électricité du Canada 86

4.2 Technologies marginales 91

4.3 Influence de l'ampleur de la perturbation 95

4.4 Signification en termes d'inventaire des impacts des technologies marginales.....99

4.5 Comparaison entre les approches conséquentielle et attributionnelle.....102

CHAPITRE 5 RÉSULTATS : ACV PRÉLIMINAIRE D'UN SERVICE DE VIDÉOCONFÉRENCES 104

5.1 Évaluation environnementale de la virtualisation à l'échelle du système de serveurs.104

5.2 Évaluation des impacts environnementaux d'un service de vidéoconférences.....105

5.3 Signification en termes d'inventaire des impacts du système de serveur et du service de vidéoconférences.....107

5.3.1 Analyse de l'inventaire du système de serveurs.....107

5.3.2 Analyse de l'inventaire du service de vidéoconférences.....111

5.4 Analyses de sensibilité 113

5.4.1 Influence de la distribution journalière des vidéoconférences 113

5.4.2 Influence du nombre de vidéoconférences.....115

5.4.3 Influence de la charge de travail moyenne des serveurs lames.....117

5.4.4 Influence de la qualité des vidéoconférences 118

5.4.5 Influence géographique du grid mix 119

5.5 Influence de la précision temporelle du grid mix.....121

5.6 Influence de l'approche utilisée pour calculer le grid mix.....122

CHAPITRE 6 DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS 124

6.1 Discussion des résultats de la combinaison de l'ACV avec un modèle économique ..124

6.1.1 Retour sur les objectifs de la recherche.....124

6.1.2 Contributions scientifiques.....125

6.1.3 Perspective d'utilisation des résultats.....127

6.1.4 Recommandations pour la combinaison de l'ACV avec un modèle économique ...128

6.2 Discussion des résultats de l'évaluation environnementale de la virtualisation 129

6.2.1 Retour sur les objectifs de la recherche.....130

6.2.2 Sources d'incertitudes et perspectives d'amélioration 130

6.2.3 Perspective d'utilisation des résultats.....134

CHAPITRE 7 CONCLUSION 138

BIBLIOGRAPHIE 141

ANNEXES 152

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1: Hypothèses économiques [123] 54

Tableau 3-2 : Hypothèses démographiques [123] 54

Tableau 3-3 : Hypothèses énergétiques [123] 55

Tableau 3-4 : Processus sélectionnés d'ecoinvent 61

Tableau 3-5 : Catégories d'impact d'IMPACT 2002+ [45] 62

Tableau 3-6 : Impacts par source énergétique pour 1 kWh 62

Tableau 3-7 : Consommation des centres de données sur 16 ans 64

Tableau 3-8 : Paramètres clés 69

Tableau 3-9 : Paramètres d'utilisation d'un serveur lame 74

Tableau 3-10 : Calcul du facteur d'allocation des serveurs lames pour la phase d'utilisation 76

Tableau 3-11 : Équipements du système de serveurs 80

Tableau 3-12 : Processus ecoinvent utilisés pour la fin de vie du système de serveurs 81

Tableau 3-13 : Facteurs d'allocation du système de serveur pour la phase de production 82

Tableau 3-14 : Liste des analyses de sensibilité 85

Tableau 4-1 : Technologies marginales principales identifiées 95

Tableau 4-2 : Ressources nécessaires pour la production de 1 kWh à partir du grid mix marginal (scénario 1) 100

Tableau 4-3 : Émissions lors de la production de 1 kWh à partir du grid mix marginal (scénario 1) 101

Tableau 5-1 : Matières premières nécessaires pour le système de serveurs, par unité fonctionnelle 108

Tableau 5-2 : Émissions causées par le système de serveurs, par unité fonctionnelle 109

Tableau 5-3 : Principales émissions et ressources en termes de contribution aux catégories d'impact pour le système de serveurs 110

Tableau 5-4 : Ressources nécessaires pour le service de vidéoconférences, par unité fonctionnelle 111

Tableau 5-5 : Émissions causées par le service de vidéoconférence, par unité fonctionnelle 112

Tableau 7-1 : mesures fédérales, provinciales et territoriales prises en considération dans la modélisation [123].....152

Tableau 7-2 : valeurs de la demande électrique des scénarios implémentées dans le modèle E3MC 155

Tableau 7-3 : Calcul du facteur d'allocation des serveurs lames pour la phase d'utilisation lorsque plus de 200% de capacité de CPU est utilisée.....160

Tableau 7-4 : Émissions et matières premières du service de vidéoconférences par catégorie d'impact.....162

Tableau 7-5 : répartitions géographiques des centres de données obtenus dans le modèle E3MC 169

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC.....170

Tableau 7-7 : Différence entre les scénarios 1 à 5 et le scénario de référence.....179

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Étapes d'une analyse du cycle de vie (adapté de [43]).....12

Figure 1-2 : Catégories d'impact de la méthode IMPACT2002+ (adapté de [45]) 15

Figure 1-3 : Modèle d'équilibre (adapté de [69]) 24

Figure 1-4 : Équilibre et surplus (adapté de [81]) 27

Figure 1-5 : Incorporation de l'approche par scénario dans l'ACV (adapté de [100, 102]) 35

Figure 3-1 : Résumé de la méthodologie utilisée pour combiner l'ACV avec un modèle économique 48

Figure 3-2 : Modèle énergie-émissions-économie du Canada [97] 50

Figure 3-3 : Modules d'Énergie 2020 (adapté de [119]) 52

Figure 3-4 : Étapes de calcul du module "production d'électricité" (adapté de [122]) 53

Figure 3-5 : Scénarios d'implantation de centres de données.....57

Figure 3-6 : Échanges électriques entre le Canada et les États-Unis (adapté de [126]).....59

Figure 3-7 : Frontières du système 68

Figure 3-8 : Les impacts des changements climatiques du grid mix ontarien 70

Figure 3-9 : Les impacts sur la santé humaine du grid mix ontarien 71

Figure 3-10 : Les impacts sur la qualité des écosystèmes du grid mix ontarien 71

Figure 3-11 : Les impacts sur les ressources du grid mix ontarien 71

Figure 3-12 : Profil de création de vidéoconférences.....73

Figure 3-13 : Facteurs d'allocation des serveurs lames 77

Figure 4-1 : Comparaison de la production marginale d'électricité au Canada et aux États-Unis .87

Figure 4-2 : Réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour les scénarios 4 et 5 88

Figure 4-3 : Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 5 89

Figure 4-4 : Réaction de l'Alberta à l'implantation de centres de données pour les scénarios 1, 3 et 5 90

Figure 4-5 : Évolution du grid mix annuel pour les différents scénarios 93

Figure 4-6 : Influence de l'ampleur de la perturbation sur les exportations 96

Figure 4-7 : influence de l'ampleur de la perturbation sur le grid mix 97

Figure 4-8 : Influence de l'ampleur de la perturbation sur les impacts par kWh marginal 98

Figure 4-9 : Comparaison entre les grids mix attributionnel et conséquentiel 102

Figure 4-10 : Comparaison entre les impacts par kWh des grids mix attributionnel et conséquentiel 103

Figure 5-1 : Impacts environnementaux liés au système de serveurs pour chaque scénario 105

Figure 5-2 : Impacts environnementaux d'un service de vidéoconférences 106

Figure 5-3 : Distributions journalières des vidéoconférences pour l'analyse de sensibilité 114

Figure 5-4 : Influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur l'impact changements climatiques du système de serveurs 114

Figure 5-5 : Influence du nombre de vidéoconférences sur l'impact changements climatiques du système de serveurs 116

Figure 5-6 : Influence de la charge de travail moyenne des serveurs lames sur les impacts changements climatiques du système de serveurs 117

Figure 5-7 : Impacts environnementaux du service de vidéoconférences pour différentes qualités de vidéoconférences 118

Figure 5-8 : influence géographique du grid mix sur les impacts du service de vidéoconférences 120

Figure 5-9 : Influence de la précision temporelle du grid mix sur les impacts environnementaux du service de vidéoconférences 121

Figure 5-10 : influence de la méthode (attributionnelle ou conséquentielle) de calcul du grid mix sur les impacts du service de vidéoconférences 123

Figure 7-1 Réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour le scénario 1 156

Figure 7-2 Réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour le scénario 2 156

Figure 7-3 Réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour le scénario 3 157

Figure 7-4 Réaction de l'Alberta à l'implantation de centres de données pour le scénario 2 157

Figure 7-5 Réaction de l'Alberta à l'implantation de centres de données pour le scénario 4 157

Figure 7-6 Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 1 158

Figure 7-7 Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 2 158

Figure 7-8 Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 3 159

Figure 7-9 Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 4 159

Figure 7-10 : Influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur l'impact sur la santé humaine du système de serveurs 163

Figure 7-11 : Influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur l'impact sur la qualité des écosystèmes du système de serveurs 163

Figure 7-12 : Influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur l'impact sur les ressources du système de serveurs 164

Figure 7-13 : Influence du nombre de vidéoconférences sur l'impact santé humaine du système de serveurs 165

Figure 7-14 : Influence du nombre de vidéoconférences sur l'impact qualité des écosystèmes du système de serveurs 165

Figure 7-15 : Influence du nombre de vidéoconférences sur l'impact ressources du système de serveurs 166

Figure 7-16 : Influence de la charge de travail moyenne des serveurs lames sur l'impact sur la santé humaine du système de serveurs 167

Figure 7-17 : Influence de la charge moyenne de travail des serveurs lames sur l'impact sur la qualité des écosystèmes du système de serveurs 167

Figure 7-18 : Influence de la charge de travail moyenne des serveurs lames sur l'impact sur les ressources du système de serveurs 168

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du cycle de vie
ACV-A	Analyse du cycle de vie attributionnelle
ACV-C	Analyse du cycle de vie conséquentielle
ACV-P	Analyse du cycle de vie prospective
CERMS	Capital energy requirement
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CPU	Central processing unit
DCO	Demande chimique en oxygène
E3MC	Modèle énergie-émissions-économie du Canada
FAL	Facteur d'allocation
GES	Gaz à effet de serre
ICV	Inventaire du cycle de vie
ISO	International Organization for Standardization
kbps	Kilobites par seconde
kWh	Kilowattheure
MW	Mégawatt
MARKAL	Market allocation (model)
PDU	Power distribution unit
PUE	Power usage effectiveness
QoS	Quality of service
SETAC	Society of environmental toxicology and chemistry
SLA	Service level agreements

TIC	Technologies de l'information et de la communication
UPS	Uninterruptible power supply
USA	United States of America
VM	Machine virtuelle
VOVO	Vary-off, vary-on
Wh	Wattheure

LISTE DES ANNEXES

Annexe A - MESURES FÉDÉRALES, PROVINCIALES ET TERRITORIALES PRISES EN CONSIDÉRATION DANS LA MODÉLISATION 152

Annexe B - VALEURS DE LA DEMANDE DES SCÉNARIOS IMPLÉMENTÉS DANS LE MODÈLE E3MC 155

Annexe C - RÉACTION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE DE L'ALBERTA, DU QUÉBEC ET DE L'ONTARIO À L'IMPLANTATION DE CENTRES DE DONNÉES 156

Annexe D - GÉNÉRALISATION DU CALCUL DES FAL 160

Annexe E - ÉMISSIONS ET MATIÈRES PREMIÈRES DU SERVICE DE VIDÉOCONFÉRENCES PAR CATÉGORIE D'IMPACT 162

Annexe F - RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DE L'INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION JOURNALIÈRE DES VIDÉOCONFÉRENCES 163

Annexe G - RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DE L'INFLUENCE DU NOMBRE DE VIDÉOCONFÉRENCES 165

Annexe H - RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DE L'INFLUENCE DE LA CHARGE DE TRAVAIL MOYENNE DES SERVEURS LAMES 167

Annexe I - RÉPARTITIONS GÉOGRAPHIQUES DES CENTRES DE DONNÉES OBTENUES DANS LE MODÈLE E3MC 169

Annexe J - RÉSULTATS OBTENUS À PARTIR DU MODÈLE E3MC 170

INTRODUCTION

Aujourd'hui, la société est de plus en plus concernée par les problèmes environnementaux et particulièrement par le réchauffement climatique dont l'origine anthropique liée à la production de gaz à effet de serre (GES) ne fait pratiquement plus aucun doute au sein de la communauté scientifique [1]. De nombreux gouvernements conscients de cette problématique ont commencé à mettre en place des politiques environnementales pour lutter contre les changements climatiques. Il est possible de citer notamment le protocole de Kyoto [2], ou le « plan climat et énergie » de l'Union européenne adopté en 2009 [3]. Ce dernier a pour but la réalisation de l'objectif « 20-20-20 », signifiant 20% d'énergie renouvelable dans la production d'électricité en Europe, 20% de réduction des émissions de GES et une amélioration de 20% de l'efficacité énergétique. La croissance de la consommation d'électricité est un enjeu majeur qui est le centre de nombreuses études [4, 5], car la production de celle-ci représente plus de 30% des émissions mondiales de GES [6].

Le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC), composé des appareils tels que les téléviseurs, téléphones, radios, ordinateurs..., est particulièrement concerné puisque, malgré sa jeunesse, sa consommation d'énergie représente pratiquement 8% de la consommation d'électricité mondiale [7]. Parmi les TIC, il est nécessaire de citer les centres de données qui sont au cœur de cette étude, ceux-ci sont des fermes de serveurs informatiques, chaque serveur pouvant être considéré comme un superordinateur. Les centres de données peuvent consommer de quelques kW jusqu'à plusieurs centaines de MW, ils représentent ainsi de très gros consommateurs d'électricité. Pour mitiger cette demande, de nombreuses recherches sont faites pour développer des stratégies d'optimisation permettant de diminuer leur consommation [8, 9].

Cependant, l'évaluation des bénéfices de chacune de ces stratégies nécessite une méthode d'évaluation prenant en compte l'ensemble des impacts environnementaux causés par les centres de données et par leur consommation énergétique. Par exemple, l'amélioration du profil énergétique d'un centre de données pourrait engendrer une consommation plus importante de ressources naturelles si plus de matériaux sont utilisés. L'analyse du cycle de vie (ACV) semble pouvoir répondre à cette problématique d'évaluation environnementale, car c'est une méthodologie permettant de quantifier les impacts environnementaux potentiels de l'ensemble du cycle de vie d'un produit, d'un procédé ou d'un service. Ainsi, l'application d'une telle méthodologie pour

évaluer les bénéfices environnementaux de stratégies d'optimisation énergétique permettrait d'éviter le déplacement d'impacts d'une phase du cycle de vie à une autre ou d'une catégorie d'impacts environnementaux à une autre, donnant ainsi une vision plus globale du problème.

Dans ce mémoire, deux solutions potentielles à la problématique liée à la croissance des TIC sont évaluées. La première est l'implantation massive de centres de données au Canada. Effectivement, le Canada est une région qui semble pouvoir offrir de nombreux avantages environnementaux : le climat est souvent suffisamment froid pour permettre aux centres de données d'utiliser directement l'air extérieur pour se refroidir et certaines régions canadiennes utilisent énormément d'énergie renouvelable pour produire leur électricité. Ces deux phénomènes combinés désignent le Canada comme une région très prometteuse du point de vue environnemental pour l'implantation de centres de données. Cependant, l'ACV d'une telle implantation nécessite l'utilisation d'outils permettant d'évaluer les impacts que causerait un tel changement dans le système énergétique nord-américain. Le Canada et les États-Unis échangeant une grande quantité d'énergie, il est nécessaire de considérer les impacts sur l'ensemble du système. Dans le cadre de cette étude, un modèle économique est utilisé pour évaluer l'impact de la perturbation causée par l'implantation des centres de données sur la production d'énergie en Amérique du Nord. La deuxième solution évaluée grâce à la méthodologie ACV est la stratégie de virtualisation. Pour ce faire, les impacts environnementaux causés par un service de vidéoconférences hébergé sur un serveur utilisant la virtualisation sont comparé à ceux d'un serveur ne l'utilisant pas.

Ce mémoire est divisé en 7 chapitres, le premier constitue la revue de littérature qui identifie les enjeux que représentent les TIC et leur modélisation en ACV. Le deuxième chapitre présente la problématique traitée dans ce mémoire ainsi que les deux solutions envisagées pour la résoudre, c'est-à-dire l'implantation de centre de données au Canada et l'utilisation de la virtualisation. Les objectifs devant être remplis sont également présentés dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre présente les deux méthodologies développées pour remplir les deux objectifs présentés au chapitre précédent. Le quatrième et le cinquième chapitre présentent respectivement les résultats de la combinaison de l'ACV avec un modèle économique pour évaluer les conséquences de l'implantation de centres de données au Canada et de l'évaluation environnementale d'une stratégie d'optimisation de centres de données (la virtualisation). Le sixième chapitre discute les résultats obtenus et donne des recommandations pour les améliorer et finalement le septième chapitre conclut en rappelant les résultats et en donnant des pistes sur la continuité de ce travail.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Motivations

1.1.1 La croissance des TIC

Il faut se souvenir que c'est seulement en 1920 que les premières émissions radio ont été diffusées, en 1931 que la première émission de télévision est transmise, en 1945 que les premiers téléphones cellulaires ont été inventés et qu'il a fallu attendre 1946 pour voir naitre le premier ordinateur complètement électronique. Pourtant, aujourd'hui presque chaque voiture est équipée d'une radio, et les téléviseurs, téléphones mobiles et ordinateurs sont pratiquement indénombrables. Internet est lui-même un exemple très pertinent de cette croissance fulgurante des TIC. Créé dans les années 60, à l'origine pour relier seulement certaines universités américaines [10], il comporte en 2014 presque 3 milliards d'utilisateurs [11]. La croissance des TIC, bien qu'ayant commencé dès la moitié du 20e siècle, a réellement explosée au début des années 90. En France, entre 1960 et 1990, le volume d'achat , c'est-à-dire la quantité de TIC achetées, augmentait en moyenne de 1,9% par année, mais de 1990 à 2005 cette augmentation est passée à 13,2% par année, représentant une croissance largement supérieure à celle de la consommation de biens dans son ensemble (de seulement 1,9% par année) [12]. Parmi l'ensemble des TIC, les téléphones portables et les micro-ordinateurs sont les deux produits ayant subi la plus grande croissance en volume d'achat avec une augmentation respective de 39% et 37% par année entre 1990 et 2005 [12].

De nombreuses organisations et gouvernements considèrent le secteur des TIC comme un des leviers pour diminuer leur consommation énergétique [13-17]. Il est possible de distinguer deux branches de recherche, tentant d'exploiter ce levier, communément appelées « ICT for Green » et « Green for ICT » [14].

La première tente d'utiliser les TIC pour diminuer les émissions de l'ensemble des autres secteurs économiques, qui représentent 97 à 98% des émissions de GES [15]. Deux méthodes principales sont envisagées pour réaliser cet objectif. Premièrement, la dématérialisation qui consiste à remplacer des services physiques par des services en ligne, c'est-à-dire par la mise en place de nouveaux modèles d'affaires tels que l'e-travail, l'e-médecine, l'e-commerce et l'e-

apprentissage (le « e » signifiant en ligne), permettant ainsi une diminution drastique des transports de personnes et de biens et des GES liés à ceux-ci [17]. Deuxièmement, l'optimisation qui a pour objectif la surveillance en temps réel des paramètres importants d'un système pour ensuite adapter le fonctionnement de celui-ci en fonction de son utilisation. En général, ce genre de système est appelé « système intelligent » (smart system). Il est, par exemple, possible d'optimiser l'utilisation des transports (éviter les retours à vide, choisir le chemin le plus court…), le chauffage des bâtiments (en fonction du nombre de personnes présentes, de la météo… c'est-à-dire le smart building), la gestion du réseau électrique (smart grid)… [14]. Il faut cependant rester prudent sur l'amélioration que les TIC peuvent apporter. Certains auteurs font référence aux effets rebonds liés à leur utilisation qui mitigeraient les bénéfices apportés par ceux-ci et qui dans certains cas pourraient rendre leur utilisation plus polluante que la situation initiale [16]. Un exemple d'effet rebond, lié aux TIC, est une augmentation de la consommation créée par une accessibilité plus facile à un service. Par exemple, les vidéoconférences peuvent partiellement remplacer les rencontres en personne, mais leur facilité (et gratuité) d'utilisation pourrait augmenter le nombre de rencontres (virtuelles) [18, 19].

La seconde stratégie, dite « Green for ICT », a pour objectif l'amélioration de l'efficacité du secteur des TIC, qui représente à lui seul 2-3% des émissions de GES dans le monde [15]. Pour atteindre ce résultat, deux approches sont utilisées. La première tente d'améliorer la phase d'utilisation des TIC, c'est-à-dire modifier les « mauvaises habitudes » des clients. Par exemple, des campagnes de sensibilisation sur la manière d'imprimer ou sur la gestion de son ordinateur ont déjà été faites, indiquant des gains énergétiques possibles allant jusque 30 % [14]. La seconde est centrée sur l'amélioration directe du fonctionnement des TIC et de leur efficacité. Cette approche est née avec le label « ENERGY STAR » en 1992 aux États-Unis, depuis de nombreux autres labels ont été créés pour encourager de telles initiatives [14].

Parmi les TIC ciblées par une approche d'amélioration directe de leur fonctionnement, il est nécessaire de citer les centres de données qui sont au coeur de cette étude. Ceux-ci sont des fermes de serveurs informatiques, chaque serveur pouvant être considéré comme un superordinateur. Les centres de données permettent la mise en place de « nuages informatiques », signifiant qu'ils rendent accessibles via internet de nombreuses fonctions demandant en général des infrastructures couteuses telles que l'accès à des programmes, des espaces de stockage de données, une puissance de calcul...[8]. Il existe différentes tailles de centres de données allant d'une

dizaine de serveurs, pour l'utilisation personnelle de certaines entreprises et ayant une consommation de quelques kW, à plusieurs milliers voire dizaines de milliers de serveurs pour les entreprises liées à l'internet (Facebook, Google, Amazon) et représentant une consommation allant de plusieurs MW jusqu'à environ 200 MW pour les plus gros [20].

Les centres de données représentent à la fois une partie de la solution du problème posé par l'importante consommation énergétique, car ils sont un des éléments essentiels des stratégies de dématérialisation et d'optimisation, et une partie du problème, car ils sont responsables à eux seuls de 17% de la consommation électrique des TIC, c'est-à-dire 2% de la consommation d'électricité aux USA et 1,3% de celle du monde [7, 21]. Par ailleurs, les centres de données connaissent une croissance très importante, entre 2000 et 2005 leur consommation est passée de $70{,}8 \times 10^9$ kWh à $152{,}5 \times 10^9$ kWh, ce qui représente une croissance de 215% [21]. Les premières prédictions de Koomey et al. [22], de 2008, prévoyaient que la consommation des centres de données poursuivrait sa lancée durant les années 2005-2010, mais la crise économique et la conscientisation des enjeux environnementaux liés aux TIC ont provoqué une diminution de la croissance de leur consommation, grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique des centres de données et à la diminution des investissements dans ceux-ci (freinant la construction de nouveaux centres de données). Finalement, la croissance de leur consommation énergétique durant les années 2005-2010 est évaluée à 156% dans le monde et 136% aux USA. Cette diminution de la croissance (qui était de 215% entre 2000 et 2005) est ainsi plus marquée dans les pays développés tels que les USA, mais il est fort probable qu'une augmentation de la croissance aura lieu dans les pays émergents, tels que la Chine, dès la fin de la crise économique [21].

1.1.2 Les sources d'inefficacité des centres de données

De nombreuses recherches ont déjà été faites pour optimiser l'efficacité énergétique des centres de données. Ces études essayent de pallier les différentes sources d'inefficacité existantes au sein des centres de données. Ces sources sont nombreuses et existent à différents niveaux architecturaux [9], elles sont présentées dans la liste non exhaustive ci-dessous.

- La majorité des centres de données actuels travaillent de manière non proportionnelle, c'est-à-dire que l'énergie utilisée pour les faire fonctionner n'est pas proportionnelle au travail qui leur est demandé. La plupart des centres de données sont dimensionnés pour répondre à la demande de pointe, mais n'utilisent, la majorité du temps, que 10 à 50% de

leur capacité maximale. Néanmoins, leur consommation électrique demeure entre 55 et 75% de leur puissance maximale [23]. Ces serveurs fonctionnent ainsi, la majorité de leur vie, avec un ratio utilisation-consommation situé entre 0,2 et 0,65.

- Les centres de données font partie des technologies ayant changé très rapidement au cours de la dernière décennie et dont l'évolution semble encore loin d'être terminée. Pour cette raison, la durée de vie d'un serveur dans un centre de données est couramment de 3 à 5 ans [24]. Cependant, certaines entreprises ne peuvent pas se permettre de changer tout leur matériel à chaque fois qu'une nouvelle version plus performante est disponible. Ainsi ces entreprises ont tendance à utiliser des centres de données avec une durée de vie plus longue, mais ayant des équipements vieillissant avec une efficacité loin de celle optimale atteinte par les dernières versions de ceux-ci [9].
- Le refroidissement des centres de données est un problème connu depuis déjà plusieurs années. Pour mesurer son importance, un indicateur d'efficacité énergétique (Power Usage Effectiveness : PUE) est utilisé. Le PUE est égal au ratio de l'énergie totale injectée dans le centre de données sur l'énergie directement utilisée par les serveurs. En 2010 il a été estimé que le PUE moyen des centres de données se situait entre 1,83 et 1,92 [21], signifiant que plus de 45% de l'énergie du centre de données est utilisée pour alimenter d'autres équipements que ceux des serveurs. La majorité de cette énergie supplémentaire est utilisée pour le refroidissement du centre de données [21]. Actuellement, certaines compagnies telles que GOOGLE ont résolu en partie la problématique liée au refroidissement en installant leurs centres de données dans des régions froides comme la Suède pour ainsi profiter de l'environnement grâce à la technique dite de « free cooling » [25]. Grâce à de telles mesures ils arrivent à obtenir des PUE de 1,08.
- La chaine d'équipements que l'électricité doit traverser avant d'atteindre les serveurs est assez longue et peu efficace, représentant une perte d'énergie importante pour les centres de données. Effectivement, l'électricité provenant du réseau électrique, sur lequel est branché le centre de données, passe dans un premier temps par une unité assurant une alimentation constante d'électricité pour le centre de données, l'unité d'alimentation sans interruption (Uninterruptible Power Supply : UPS). L'UPS transforme le courant alternatif provenant du réseau en courant continu pour alimenter les batteries qui prennent le relais

lorsqu'il y a une panne sur le réseau électrique. Dans un deuxième temps, les batteries retransforment le courant continu en courant alternatif pour alimenter l'unité de distribution du courant (Power Distribution Unit : PDU) du centre de données, qui elle-même alimente en courant continu les différents composants du centre de données [9]. Chacun des équipements cités précédemment possède une efficacité inférieure à 1, ce qui résulte en pertes non négligeables [9].

1.1.3 Les méthodes d'efficacité énergétique des centres de données

Il existe deux catégories d'amélioration énergétique pour les centres de données. La première correspond à une amélioration directe de la performance énergétique d'un équipement [8]. Une telle amélioration est en général technologique et l'opérateur du centre de données ne peut pas l'influencer autrement qu'en gardant les équipements de son centre de données à la pointe de la technologie. La seconde amélioration énergétique est une augmentation de l'efficacité, mais avec une diminution de la performance, signifiant souvent l'accroissement du temps de réalisation d'une tâche, compensé par une diminution de l'énergie de réalisation de celle-ci [9]. Cette seconde catégorie d'améliorations est fortement dépendante des applications, clients et opérateurs du centre de données, car elle introduit un compromis entre la consommation énergétique et la performance. Le contrat passé entre le centre de données et ses clients introduit la notion de « garantie de niveau de service » (Service Level Agreements, SLA) qui définit l'accessibilité, la comptabilité, la performance et la sécurité liées au centre de données, c'est-à-dire la qualité de service (Quality of Service, QoS) [9]. Dès lors, il est possible d'adapter l'énergie allouée au centre de données pour remplir les tâches demandées avec la consommation la plus faible possible tout en respectant les performances nécessaires pour satisfaire le client.

Une approche utilisée pour adapter l'énergie consommée par le centre de données est la gestion des tâches utilisant souvent en parallèle la « proportionnalisation ». La proportionnalisation traite le problème de non-proportionnalité en modifiant le fonctionnement d'appareils pour le rendre proportionnel à leur consommation. Le CPU peut par exemple fonctionner à différentes fréquences [26]. En effet, le CPU consommant une énergie liée à sa fréquence, il est possible de faire diminuer sa consommation en diminuant sa fréquence, mais en contrepartie sa vitesse de calcul est également réduite augmentant ainsi le temps de réalisation d'une tâche. Il est dès lors nécessaire de trouver une fréquence optimale, pour laquelle l'énergie nécessaire pour réaliser une

tâche est minimale [26]. Une stratégie similaire est possible pour la mémoire (changement de la vitesse de rotation [27]), pour le réseau (changement de la vitesse de transfert [8]) et pour le refroidissement (changement de la vitesse des ventilateurs). Il est aussi possible d'allumer et d'éteindre certains appareils en fonction de la charge de travail pour lier la consommation de l'ensemble de l'infrastructure à la quantité de tâches. La gestion des tâches consiste à coordonner l'utilisation des appareils et des techniques de proportionnalisation associés à chacun d'eux en fonction des différentes tâches demandées aux serveurs et/ou au centre de données pour minimiser la consommation d'énergie en respectant les SLA des clients. Cette approche doit donc choisir quelles tâches sont prioritaires, quel serveur doit les effectuer, quelles techniques de proportionnalisation utiliser, de quelle manière (par exemple choisir la fréquence du CPU pour respecter les SLA), etc. Les stratégies de gestion des tâches sont souvent possibles ou peuvent être améliorées grâce à la virtualisation et à la migration.

La virtualisation est l'une des approches les plus répandues et les plus utilisées par les opérateurs de centres de données. Elle permet de partager des ressources matérielles entre différentes tâches. Pour ce faire, des machines virtuelles (VM), c'est-à-dire l'équivalent virtuel d'un système d'opération possédant toutes les fonctionnalités d'un serveur physique, sont créées. Il est ensuite possible d'attribuer à chaque client une VM (un client peut être un utilisateur, une société, une application, etc.) et d'installer plusieurs VM sur un même serveur, partageant ainsi les ressources du serveur [28]. Les serveurs, pouvant héberger plusieurs VM, sont dès lors capables de répondre simultanément aux demandes de plusieurs clients, permettant ainsi une augmentation de l'utilisation des ressources matérielles (par rapport au cas où un serveur est utilisé par client). Cependant, la virtualisation nécessite un « hypervisor », c'est-à-dire d'un programme liant les VM aux matériels physiques des serveurs [29]. Or, l'utilisation de « l'hypervisor » pour la gestion des VM consomme de l'énergie et il est nécessaire d'allouer une partie de la capacité du serveur à « l'hypervisor », réduisant ainsi la capacité totale du serveur accessible aux clients [29, 30].

La migration est une technologie développée plus récemment intrinsèquement liée aux VM, qui permet de transférer une VM d'un serveur à un autre [8]. Grâce à cette migration, il est possible de modifier les ressources allouées à une VM, en déplaçant cette VM vers un serveur moins utilisé (avec plus de ressources disponibles), ou au contraire en déplaçant une partie des VM partageant les mêmes ressources vers un autre serveur afin d'allouer plus de ressources à une VM non déplacée. La migration est un très bon outil de proportionnalisation, cependant, une migration

consomme de l'énergie et de la capacité de transfert (bande passante) sur le réseau. En effet, de l'électricité est consommée pour que le serveur supervise la migration ainsi que pour transférer les données requises via le réseau. Meng et al. [31] proposent une méthode de migration des VM tenant compte des problèmes de congestion du réseau et essayant, en fonction de l'état et de la topologie du réseau, de diminuer la distance de migration, déterminée par le nombre de commutateurs réseau (équipement réseau reliant deux parties de celui-ci, « routeurs ou passerelles ») que doit traverser la VM lors de la migration.

La migration peut aussi être utilisée à beaucoup plus grande échelle en migrant les VM de serveurs, groupes de serveurs, voire de centres de données entiers d'une localisation à une autre, pouvant être séparée par plusieurs milliers de kilomètres [32]. Une telle stratégie permet d'optimiser à la fois la facture énergétique du centre de données en favorisant ceux localisés dans des régions où l'électricité est peu couteuse (par exemple la nuit) [33] et d'autre part, il est possible de favoriser l'utilisation de sources renouvelables [33]. Nguyen et al. [32] ont, par exemple, développé une stratégie nommée « suivre le vent, suivre le soleil », où une dizaine de centres de données répartis partout dans le monde fonctionnent en alternance pour maximiser l'utilisation d'énergie solaire ou éolienne suivant la disponibilité de ces énergies.

La virtualisation et la migration sont particulièrement bien adaptées pour être combinées avec la technique dite de « Vary-Off, Vary-On » (VOVO) [34], consistant à dynamiquement éteindre et allumer les serveurs en fonction de la charge de travail qui leur est demandée. Cette combinaison, plus communément appelée consolidation, consiste à migrer les VM vers un petit nombre de serveurs qui seront utilisés ainsi pour une charge de travail très importante, pour concentrer le travail sur ceux-ci, et à éteindre le reste des serveurs. L'économie d'énergie apportée par une telle stratégie est fortement dépendante de l'état initial du système. Effectivement, pour les systèmes ayant un taux d'utilisation assez faible il est très intéressant de diminuer le nombre de serveurs actifs et de concentrer le travail sur un petit nombre de serveurs. Au contraire pour les centres de données avec un taux d'utilisation très important la marge de manœuvre est beaucoup plus faible et le gain apporté par une telle stratégie est beaucoup plus faible, voire négatif [9, 35].

Certains auteurs ont étudié la consolidation, pour évaluer les bénéfices qu'elle pourrait apporter, mais leurs résultats sont très hétérogènes. Ainsi, certaines études la recommandent, mais en restant qualitatif sans quantification de l'ampleur de ses bénéfices [36], d'autres quantifient

uniquement les coûts additionnels de celle-ci [29, 35] et finalement certaines études présentent des gains chiffrés, mais pour des cas très spécifiques ne pouvant pas être généralisés, telles que l'étude de Thirupathi et al. [30] et de HP [37] présentant des gains énergétiques respectifs liés à la consolidation de 65% et 76%. Les méthodes d'évaluation des bénéfices de la consolidation varient énormément d'un article à l'autre et il est très compliqué, voire impossible, de les comparer, d'une part, car les systèmes étudiés sont souvent très différents (applications, matériel, algorithmes d'optimisation…) et d'autre part, car les mesures prises se concentrent parfois uniquement sur un seul appareil (par exemple uniquement le CPU pour [38]) ou sur l'ensemble du système [30]. Il est donc nécessaire d'apporter une certaine cohésion à ces évaluations, pour permettre une comparaison entre les différentes techniques et algorithmes d'optimisation existants.

Par ailleurs, l'ensemble de ces études évalue uniquement l'efficacité de calcul et les économies énergétiques et monétaires liées à la consolidation pendant la phase d'utilisation des serveurs ou du centre de données. Il serait pertinent d'apporter une vision plus complète du problème en considérant l'ensemble du cycle de vie des appareils nécessaires pour réaliser la consolidation (c'est-à-dire les phases d'extraction de matières premières, de fabrication et de fin de vie) ainsi qu'un plus grand nombre d'indicateurs environnementaux (tels que les gaz à effet de serre, mais aussi les impacts sur la santé humaine, l'utilisation d'eau…). Effectivement, bien que la consommation d'énergie des TIC soit maintenant un problème indiscutable, ceux-ci sont aussi reconnus pour causer de gros problèmes lors de leur fin de vie, car bien qu'ils ne représentent qu'une faible portion des déchets des décharges ils sont responsables de la majorité de leur toxicité [39], et l'extraction de matériaux tels que les terres rares, nécessaires pour leur fabrication, est aussi responsable de pollution importante [40]. Une méthode possible prenant en compte ces différents critères est l'analyse du cycle de vie telle que décrite dans la section 1.2.

1.2 Analyse du Cycle de Vie

1.2.1 Définition

L'analyse de cycle de vie (ACV) est décrite par les normes ISO, comme étant un outil d'aide à la décision [41]. L'ACV permet la quantification des impacts environnementaux potentiels d'un produit, d'un système ou d'un service sur l'ensemble de son cycle de vie, c'est-à-dire sur les différentes phases par lesquelles doit passer un produit pour remplir sa fonction, allant de

l'extraction des ressources nécessaires pour le produire jusqu'à la phase de fin de vie, en passant par des phases de transport, de fabrication et d'utilisation. La considération de l'ensemble du cycle de vie et de différents impacts environnementaux permet d'éviter le déplacement d'impacts d'une phase à l'autre et/ou d'une catégorie à l'autre, lors de l'analyse environnementale.

L'ACV peut être utilisée à différentes fins dont une liste non exhaustive est présentée ici [41]:

- l'étude des points environnementaux sensibles de produits permettant le développement de pistes d'améliorations (menant à la conception, la reconception et l'écoconception de produit);
- la comparaison de produits;
- l'aide à la décision (permettant entre autre la priorisation des objectifs, la planification de stratégies et la mise en place de politiques publiques); et
- le marketing (entre autre à travers l'écoétiquetage et les revendications environnementales).

Ainsi l'ACV est un outil pouvant être utilisé par de nombreux acteurs, autant dans le secteur privé, par les petites (PME) et grandes industries (multinationales), que dans le secteur public, c'est-à-dire par les gouvernements dans les décisions environnementales telles que l'élaboration de stratégies énergétiques [41].

1.2.2 Méthodologie

Les normes ISO 14040 et ISO14044 décrivent l'ACV comme est un procédé itératif découpé en 4 étapes : la définition des objectifs et du champ d'étude, l'inventaire et l'analyse de l'inventaire, l'évaluation des impacts et l'interprétation. L'ACV est dite itérative, car l'interprétation des résultats de chaque étape peut influencer les autres étapes [41, 42]. La Figure 1-1 illustre les quatre étapes de l'ACV.

Figure 1-1 : Étapes d'une analyse du cycle de vie (adapté de [43])

Les sections suivantes décrivent plus en détail les différentes étapes présentées dans la Figure 1-1.

1.2.2.1 Objectif et champ de l'étude

Définir l'objectif de l'étude signifie répondre aux questions : « pourquoi cette étude est-elle faite? Pour quelles raisons et en vue de quelles applications ? » [41]. C'est l'une des étapes les plus importantes, car elle influence la manière de conduire le reste de l'analyse. L'objectif dépend à la fois du commanditaire de l'étude, mais aussi du public visé (communication interne, consommateurs, direction...). Cette étape permet ensuite la définition du champ d'étude, définissant les conditions dans lesquelles doit être réalisée l'étude, c'est-à-dire la définition des paramètres tels que [41]:

- la/les fonction(s) principale(s) du produit;
- la/les fonction(s) secondaire(s) du produit et la manière de tenir compte de celles-ci;
- l'unité fonctionnelle qui quantifie la/les fonction(s). L'unité fonctionnelle traduit scientifiquement l'objet de l'étude, représente les fondations sur lesquelles est bâti le reste de l'étude et est une référence pour les études comparatives, car elle permet de normaliser les impacts;

- le système de produits. Celui-ci représente l'ensemble des procédés à considérer dans l'étude;
- les flux de références. Ceux-ci représentent les flux économiques directement nécessaires pour remplir l'unité fonctionnelle;
- les hypothèses;
- les limitations;
- les règles d'allocation à utiliser;
- les exigences relatives à la qualité des données; et
- le type de format du rapport.

Les règles d'allocation sont nécessaires lorsque des procédés multifonctionnels sont présents dans le cycle de vie. Un processus est dit multifonctionnel lorsqu'il remplit plusieurs fonctions, par exemple en produisant différents produits. Si seule une des fonctions d'un processus multifonctionnel est étudiée dans une ACV, il est nécessaire de répartir les émissions et extractions du procédé entre ces différentes fonctions. Cette étape, dite d'allocation, peut être réalisée de différentes manières : par imputation ou par extension des frontières [42]. La première implique une répartition des impacts environnementaux entre les différents produits selon une propriété physique (poids, volume, densité…) pertinente, ou si c'est impossible, selon la valeur économique de chaque produit. L'extension des frontières consiste à inclure, l'ensemble des produits du processus multifonctionnel, ainsi que leur cycle de vie, dans l'étude.

La définition de l'objectif et du champ d'étude permet de mettre en place le cadre et les fondations de l'ACV à effectuer.

1.2.2.2 Inventaire du cycle de vie

Durant la phase d'inventaire du cycle de vie (ICV), les extractions (matières premières) et émissions (polluants gazeux, aqueux ou solides) de l'ensemble des procédés présents dans le système de produits sont comptabilisées et listées [41]. Pour ce faire, il est nécessaire d'obtenir les informations des différents extrants et intrants de chaque processus impliqué dans le cycle de vie du produit.

La provenance des données et leur qualité sont souvent d'une importance capitale lors de l'interprétation des résultats. On distingue les données primaires et secondaires. Les premières sont obtenues à partir de mesures sur le terrain ou de données directement fournies par l'entreprise ou le commanditaire de l'étude et sont, en principe, considérées de très bonne qualité. Les secondes proviennent de la littérature ou de bases de données, ce qui en fait des données à priori moins adaptées au contexte de l'étude et donc moins précises que les données primaires. Par exemple, ecoinvent est une base de données développée par le centre suisse de l'inventaire du cycle de vie (« Swiss Center for Life Cycle Inventories ») et contenant les informations nécessaires à la modélisation de plusieurs milliers de processus et produits, faisant d'elle la base de données la plus complète et la plus utilisée dans le domaine de l'ACV [44].

Le résultat obtenu à partir de l'ICV est une longue énumération de substances émises ou extraites pouvant contenir plusieurs centaines voire milliers d'éléments différents. Dès lors, l'interprétation de cette liste est rendue très difficile par son exhaustivité. Cependant, il est nécessaire d'évaluer la cohérence de l'inventaire en vérifiant les principaux éléments ressortant de l'inventaire et leur provenance. Ainsi, on détermine quels processus devront être examinés plus en détail lors de la phase suivante.

1.2.2.3 Évaluation des impacts

La phase d'évaluation des impacts a pour objectif, en se basant sur les résultats de l'ICV, l'estimation des impacts environnementaux potentiels du cycle de vie du produit étudié. Cette phase est découpée, par les normes ISO en plusieurs étapes [41].

La première phase est la sélection des catégories d'impact, des indicateurs de catégories et des modèles de caractérisation. Ces paramètres indiquent les différents dommages environnementaux qui seront évalués, ainsi que les méthodes utilisées pour y arriver. Les modèles de caractérisation sont une modélisation des chaines de cause à effets des différentes substances analysées lorsque celles-ci sont émises dans l'environnement. Ils permettent de calculer des facteurs de caractérisation faisant directement le lien entre une quantité de substances émises dans l'environnement et un impact environnemental potentiel. La deuxième étape est la classification, elle consiste à associer chaque substance à (aux) impact(s) qu'elle provoque. Ensuite, la troisième étape, la caractérisation, utilise les facteurs de caractérisation pour calculer la quantité d'impact

potentiel causé par chacune des substances de l'inventaire. Les impacts sont ensuite agrégés par catégorie d'impact.

Il est possible d'exprimer des impacts environnementaux à différents endroits de la chaine de cause à effet. Plus l'impact est choisi loin dans la chaine de cause à effet plus il est proche des inquiétudes de la population et plus il est facile de communiquer les résultats de l'étude. Cependant, généralement la modélisation d'une chaine de cause à effet nécessite des hypothèses créant des incertitudes dans le modèle de caractérisation. Deux types d'indicateurs ont été développés en ACV : les indicateurs orientés « problèmes » qui se situent au milieu de la chaine de cause à effet (ne permettant pas toujours une bonne communication, mais ayant une incertitude plus faible) et les indicateurs orientés « dommages », qui se situent au bout des chaines de cause à effet (permettant ainsi une bonne communication, mais avec une plus grande incertitude sur les impacts calculés).

Depuis la naissance de l'ACV, de nombreuses méthodes d'impacts ont été créées possédant chacune leurs propres indicateurs, modèles et facteurs de caractérisation. Une de ces méthodes, très connue et utilisée, est IMPACT2002+ dont les différentes catégories d'impacts sont représentées dans la Figure 1-2 [45].

Figure 1-2 : Catégories d'impact de la méthode IMPACT2002+ (adapté de [45])

1.2.2.4 Interprétation

La phase d'interprétation est présente pendant l'ensemble du processus de réalisation de l'ACV. En effet, il est nécessaire d'analyser les résultats après chaque phase pour vérifier que ceux-ci permettront de répondre aux objectifs de l'étude ou si il est nécessaire par exemple de raffiner certaines données ou d'étendre les frontières du système. L'interprétation des résultats obtenus à partir de l'évaluation des impacts nécessite de réaliser des analyses de contribution ou comparatives en fonction des objectifs de l'étude. À partir de ces résultats, il convient de tirer des conclusions et d'émettre des recommandations pour le commanditaire et/ou le public visé par l'étude. Durant la phase d'interprétation, la robustesse des résultats est également évaluée. Pour ce faire, des analyses de sensibilité et d'incertitude sont réalisées permettant de savoir quelles sont les données nécessitant d'être raffinées.

1.2.3 Les limites de l'ACV

Selon l'ADEME « l'ACV est la méthode la plus aboutie en terme d'évaluation environnementale globale et multicritère » pourtant, malgré son exhaustivité, l'ACV est sujette à de nombreuses limites [46]. La plus importante étant l'incertitude générée à la fois par la qualité des données utilisées pour la réaliser, par les différents modèles utilisés dans la phase d'évaluation des impacts environnementaux et par la subjectivité de certaines étapes de l'ACV [47, 48]. La subjectivité de l'ACV peut toucher l'unité fonctionnelle qui n'est pas toujours quantifiable (beauté, goût, couleur…), l'allocation des procédés multiples (encore très débattue par les experts du domaine), les hypothèses posées pour répondre au manque de données, le choix du modèle d'impacts, le choix des catégories d'impact à prendre en compte, le choix de la pondération si elle est utilisée, le choix des frontières du système… [47, 48]. Une modification d'un de ces éléments a souvent un impact très important sur les résultats pouvant parfois inverser les conclusions de l'étude [49-51].

La réalisation d'une ACV suivant les normes ISO 14040 et ISO 14044 demande un nombre de données très important, à la fois lors de la phase d'inventaire et de celle d'évaluation des impacts [47]. Lors de l'inventaire, l'obtention des données précises peut être difficile en raison du coût de leur obtention (les études sur le terrain sont souvent onéreuses), des clauses de confidentialité et des difficultés rencontrées lorsqu'on remonte les chaines d'approvisionnement. De plus les bases de données sont souvent incomplètes ou vieillissantes menant à l'utilisation de données

approximatives (« proxys ») [52]. Par ailleurs, certaines données ne peuvent tout simplement pas être mesurées, notamment lorsque l'étude touche au futur rendant obligatoire l'utilisation d'hypothèses et/ou de scénarios prospectifs. Les données nécessaires pour l'évaluation des impacts ne sont pas toutes disponibles en raison du grand nombre de substances et du nombre restreint d'études faites sur celles-ci. À ce jour, le Chemical Abstracts Service (CAS) recense plus de 88 millions de substances chimiques [53]. Il n'est donc pas étonnant que la toxicité et l'écotoxicité de seulement une fraction de ces substances soient caractérisées. Par exemple, USEtox, modèle consensuel d'évaluation des impacts toxicologiques et écotoxicologiques en ACV, ne contient les facteurs de caractérisation que pour 991 substances pour les impacts toxicologiques et 1299 substances pour les impacts écotoxicologiques [54]. D'autre part, l'évaluation des impacts est une grande source d'incertitude pour trois raisons supplémentaires :

- Premièrement, les phénomènes étudiés (chaines de cause à effet) sont souvent très complexes et les modèles utilisés pour les quantifier reposent souvent sur diverses hypothèses [50].
- Deuxièmement, une agrégation spatio-temporelle de l'inventaire est souvent nécessaire, car d'une part, l'entièreté de la chaine de produits n'est pas connue précisément (la localisation des procédés n'est donc pas disponible) et d'autre part, les facteurs de caractérisation ne prennent pas en compte la spécification spatiale et temporelle des impacts. Pourtant les impacts provoqués par la plupart des polluants sont spécifiques à la zone d'émission notamment en raison de paramètres tels que la densité de population, la météo, la sensibilité des milieux naturels, etc. Il est ainsi possible que les facteurs de caractérisation varient de plusieurs ordres de grandeur en fonction de la zone d'émission [47]. Bien que la majorité des modèles d'impacts ne tiennent pas compte de cette spécificité spatiale, ceux développés plus récemment commencent à traiter cette problématique en incluant des facteurs de caractérisation régionalisés [55].
- Troisièmement, la réponse à une exposition liée à une émission toxique peut énormément varier en fonction du milieu récepteur, de l'espèce étudiée ou de la personne touchée.

Deux traitements de l'incertitude ont été retenus par les normes ISO : l'analyse de l'incertitude et l'analyse de sensibilité [47]. La première consiste à évaluer l'incertitude sur une donnée, directement à travers les mesures prises, si celles-ci le permettent ou grâce à une évaluation

de la qualité de celles-ci [56]. Ensuite la propagation de l'incertitude à travers les modèles utilisés est calculée. L'analyse de l'incertitude permet une quantification précise de l'incertitude, mais nécessite souvent un grand nombre de données (pour calculer l'incertitude et/ou la qualité des données) et il n'est pas toujours possible d'évaluer l'incertitude d'une variable (par manque de données) ou la propagation de l'incertitude de plusieurs variables à travers les modèles utilisés [47]. Cependant, Il est possible d'évaluer l'incertitude sur un résultat, notamment grâce aux analyses de Monte Carlos, en faisant varier la valeur de plusieurs variables selon leur distribution de probabilités [57]. Ces analyses calculent plusieurs milliers de simulations chacune avec une configuration aléatoire de cet ensemble de variables. La seconde méthode de traitement de l'incertitude, l'analyse de sensibilité, évalue l'importance d'une variable du modèle sur les résultats finaux en calculant l'impact d'une variation de cette variable sur ceux-ci.

Le traitement de l'incertitude est d'une importance capitale, car il permet de quantifier la robustesse des conclusions d'une ACV. Pourtant, certains auteurs ont indiqué que « la quantification de l'incertitude pour chacune des phases de manière complète et conservatrice rend la plupart des études non concluantes » [47, 58]. Il est donc nécessaire de travailler simultanément à quantifier, et à diminuer ces incertitudes.

1.2.4 Les différentes approches ACV

Les normes ISO sont précises sur de nombreux points dans l'ACV tels que les étapes à suivre, la manière de publier les résultats, la pensée cycle de vie, etc. Mais de nombreux autres critères sont laissés au bon vouloir de l'expert réalisant l'ACV. Le but recherché par une ACV variant fortement d'une étude à l'autre il n'est pas étonnant que différentes méthodes soient nées pour répondre aux multiples besoins de celles-ci. Deux types d'approches peuvent être distingués en ACV : d'une part l'ACV est attributionnelle ou conséquentielle et d'autre part l'ACV prospective et rétrospective.

Il est ainsi possible de distinguer l'ACV attributionnelle (ACV-A) et conséquentielle (ACV-C). La première évalue les impacts d'un système de produits alors que la deuxième évalue l'impact d'une décision et des changements dans le système de produits provoqués par celle-ci (les différences entre l'ACV-C et l'ACV-A seront développées dans la section 1.3.1).

La caractéristique temporelle distingue l'ACV rétrospective (ACV-R), de l'ACV prospective (ACV-P). La première étudie le passé et la seconde est tournée vers le futur (l'ACV-P est développée dans la section 1.4). L'ACV-C est souvent prospective, car cette dernière étudie souvent les conséquences environnementales futures de décisions. À l'inverse, l'ACV-A étudie souvent des systèmes passés ou présents, suivant par défaut l'approche rétrospective. Mais, tel que développé par Weidema [59], il est parfaitement possible de réaliser des ACV-C rétrospectives étudiant l'impact de décisions prises dans le passée et des ACV-A prospectives de produits ou technologies futurs.

1.3 ACV-conséquentielle

L'implantation massive de centres de données au Canada (première solution envisagée pour répondre à la problématique liée à la consommation importante d'électricité des centres de données) provoquerait des changements dans le système énergétique nord-américain. Pour évaluer les conséquences environnementales liées à ces changements, il est nécessaire d'utiliser l'ACV conséquentielle. Cette section approfondit l'ACV-C, avec une première partie sur les différences entre l'ACV-C et l'ACV-A, suivie par une présentation de certains aspects méthodologiques à considérer lors de la réalisation d'une ACV-C.

1.3.1 ACV-attributionnelle et ACV-conséquentielle

L'ACV est née en se basant sur des méthodes préexistantes de suivi de flux de matière et d'énergie, avec pour objectif la considération de l'ensemble des impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie. Selon Weidema et al. [60], ce sont ces fondations qui expliquent pourquoi l'ACV-A ne considère pas les liens de causalité entourant chaque système, mais uniquement des flux physiques et monétaires parfaitement quantifiables (produit, matière, argent…). L'ACV-C est née pour pallier cette faiblesse avec pour objectif la quantification des impacts d'une décision, car les changements provoqués par celle-ci peuvent toucher des systèmes n'étant pas directement liés par un flux physique ou monétaire, mais par des phénomènes économiques, tels que la concurrence et les équilibres de marché [60]. Outre cette différence fondamentale, il est possible de distinguer quatre dissemblances majeures entre l'ACV-C et l'ACV-A : les frontières du système, l'unité fonctionnelle et l'échelle, l'origine des données et les méthodes d'allocation utilisées [60-63].

1.3.1.1 Les frontières du système

Les frontières du système en ACV-A sont définies par le cycle de vie du produit, il est donc nécessaire de prendre en considération l'ensemble des processus liés par un flux physique ou monétaire, à chacune des phases du cycle de vie du produit. Au contraire l'ACV-C ne se limite pas au cycle de vie sujet à une décision le modifiant, mais englobe l'ensemble des systèmes touchés par cette décision [61]. Par exemple : un système ou deux produits, A et B, nécessitent tous les deux la matière première C, de telle sorte que toute la production de C est consommée par la fabrication de A et B. Si la décision prise est d'augmenter la production de A, la consommation de C pour le produit A augmentera, si cette même production est limitée en quantité, B ne pourra plus recevoir suffisamment de C et la production de B, si aucune alternative n'est trouvée, devra diminuer. Dans une telle situation, pour une ACV-C, il est nécessaire d'inclure le cycle de vie du produit B, pour prendre en considération la diminution de sa production ou les mesures alternatives.

Les conséquences d'une décision peuvent être extrêmement nombreuses, en effet la quantité de phénomènes à considérer grandit avec la précision du système étudié. Cependant, plus une conséquence est éloignée de la décision initiale, plus elle est difficile à quantifier et plus l'incertitude sur celle-ci est grande [61]. Ekvall et al. [61] proposent de mettre les frontières du système là où les conséquences du phénomène sont si petites ou l'incertitude si grande qu'une extension du système n'apporte plus aucune information.

1.3.1.2 L'unité fonctionnelle et l'échelle

L'unité fonctionnelle, en ACV-A, indique une quantité de produits ou de services et permet de normaliser les impacts, mais sa valeur, c'est-à-dire l'échelle du système étudié, a peu d'importance, car en ACV-A il est fait l'hypothèse que les impacts pour « n » fois un produit A sont égaux à « n » fois les impacts du produit A.

Lors d'une ACV-C, l'unité fonctionnelle est utilisée pour quantifier un changement. L'ampleur de la perturbation est très importante, car les impacts d'une perturbation sont rarement linéaires [59, 64] : un fournisseur peut en général répondre à une légère augmentation de la demande de son client, mais si la quantité augmente drastiquement il sera probablement nécessaire de rechercher un autre fournisseur, pour répondre à cette demande supplémentaire. L'ACV-C doit donc prendre en considération ces non-linéarités, pour être le plus réaliste possible.

1.3.1.3 L'origine des données

En ACV on distingue deux types de données : les données moyennes et les données dites marginales. Les premières sont obtenues en faisant la moyenne des données disponibles pour un procédé, une technologie, un produit ou un secteur. Les secondes représentent la technologie (ou le procédé) qui répond à un petit changement dans la demande d'un produit ou d'un service [60, 63]. Par exemple, si la consommation en électricité augmente, la technologie qui est utilisée pour répondre à cette demande représente la technologie marginale. Ainsi, les technologies ou procédés ayant une production fixe ne sont pas, à priori, considérés comme marginaux. L'identification des technologies et procédés marginaux est encore sujette à débat dans le monde de l'ACV et les différentes stratégies d'identification sont présentées dans la section 1.3.2.

De nombreux experts [65] recommandent, pour l'ACV-A, l'utilisation de données moyennes pour l'arrière-plan (les processus d'arrière-plan constituent l'ensemble des processus indirectement utilisés, car ils sont appelés par les processus d'avant-plan). En revanche il est conseillé d'utiliser des données spécifiques pour les processus d'avant-plan (les processus d'avant-plan constituent l'ensemble des processus directement utilisés par le praticien). Au contraire, pour l'ACV-C ayant pour but d'intégrer les conséquences d'une décision, il est nécessaire d'utiliser des données correspondant aux technologies marginales aussi bien pour l'arrière-plan que pour l'avant-plan, car ce sont celles-ci qui seront affectées par les décisions [60, 63]. La collecte de données est très différente dans le cas d'une ACV-A et d'une ACV-C. Certains auteurs estiment que cette collecte pour l'ACV-A est plus courte, car l'étape d'identification de technologies marginales, parfois très difficile, n'est pas nécessaire [66]. Cependant, les auteurs ayant développé des techniques d'identification, qu'ils appliquent rapidement et efficacement, considèrent la collecte pour l'ACV-C plus courte, car il est uniquement nécessaire de trouver les données pour la(les) technologie(s) marginale(s) et non pas pour l'ensemble des technologies utilisées dans le secteur étudié et également, car il n'est pas nécessaire de considérer l'ensemble des procédés du cycle de vie, mais uniquement ceux subissant des changements [59, 60, 67]. Finalement, Thomassen et al. [68] indiquent que la quantité de données nécessaires dans les deux cas est équivalente, car effectivement le nombre de procédés dans le cycle de vie étudié diminue, mais il est nécessaire d'inclure des processus d'autres cycles de vie, touchés par la décision initiale, augmentant ainsi le nombre de processus à considérer, et compensant la première diminution.

1.3.1.4 Méthode d'allocation

L'ACV-A utilise majoritairement la méthode d'allocation par imputation (bien que la norme ISO recommande l'utilisation de l'extension des frontières lorsque la séparation du processus n'est pas possible). Au contraire, les processus multifonctionnels sont toujours gérés par extension des frontières en ACV-C, car par exemple si la production du procédé multifonctionnel est réduite, il est évident que les conséquences de cette diminution affecteront l'ensemble des produits du procédé multifonctionnel [61].

1.3.2 Aspects méthodologiques

Les deux aspects méthodologiques primordiaux de l'ACV-C sont l'identification des technologies et procédés touchés par une décision et la quantification de la contribution de chaque technologie répondant à l'augmentation ou à la baisse de production.

1.3.2.1 « Step-wise » méthode

La méthode dite de « step-wise » est une des premières méthodes d'identification de technologies marginales développée en ACV [59, 60]. Elle se décompose en 5 étapes :

- Identifier l'horizon de temps : cette étape consiste à analyser les changements provoqués pour identifier si ceux-ci ont un impact à court, moyen ou long terme. Ce n'est pas uniquement le nombre d'années qui définit l'horizon temporel, mais aussi la réactivité du secteur économique affecté. Effectivement, un horizon de temps long signifie que des investissements en équipement et infrastructures sont possibles (par exemple la construction de nouvelles centrales électriques pour répondre à la demande future en électricité), au contraire un horizon court ne permet pas de tels investissements et on doit répondre à la nouvelle demande à partir d'une augmentation de l'utilisation de la capacité déjà installée (si celle-ci n'est pas utilisée à son maximum).

- Identifier l'influence de la demande : il est nécessaire de déterminer si la demande influence une seule technologie (une seule entreprise…) ou tout un marché. Dans le premier cas, la technologie marginale est la technologie influencée.

- Identifier la tendance du marché : il est important d'étudier le marché pour savoir si sa tendance est en baisse ou en hausse. Dans le premier cas, la technologie marginale fait partie

des plus chères, c'est-à-dire des moins rentables (souvent les plus anciennes), car elles représentent les technologies qui sont actuellement retirées du marché puisque la demande est en baisse. Dans le second cas, les technologies marginales sont les plus nouvelles (souvent les plus rentables), c'est-à-dire celles qui sont installées actuellement puisque la demande est en hausse.

- Parmi l'ensemble des technologies répondant aux critères précédents, il faut identifier les technologies non contraintes, car les technologies contraintes ne sont pas, a priori, des technologies marginales. Une technologie est dite contrainte lorsque son installation ou son développement est impossible ou si sa flexibilité ne lui permet pas de varier en fonction de la demande, l'obstacle pouvant être de nature juridique (par exemple le nucléaire dans certaines régions), logistique (flexibilité du nucléaire), naturelle (pas assez de ressources, par exemple pour les barrages hydrauliques), etc.

- Finalement, la technologie marginale pour le long terme est la plus rentable (sur le long terme), parmi les technologies non contraintes identifiées précédemment.

L'une des faiblesses de cette stratégie est qu'elle ne permet en aucun cas de quantifier la réponse de la technologie identifiée, ou qu'elle assume simplement que cette dernière répond entièrement au besoin du système. Pour résoudre cette problématique Ekvall et al. [61] ont proposé une approche développée dans la section suivante.

1.3.2.2 Modèle d'élasticité simplifié

La stratégie développée par Ekvall et al. [61] est divisée en deux étapes : premièrement, une identification de la technologie touchée à partir de la méthode « step-wise ». Deuxièmement, un modèle économique simplifié, utilisant des coefficients d'élasticité, est utilisé pour quantifier la réponse de la technologie marginale.

Le modèle économique, utilisé par Ekvall et al. [61], est basé sur le principe économique « d'équilibre ». Ce dernier stipule que la demande est égale à l'offre, c'est-à-dire que la quantité produite (offre) est égale à celle consommée (demande) [69]. Ainsi, si la demande diminue, selon le principe d'équilibre, le prix diminuera, ce qui fera diminuer la production, et finalement, par un mécanisme de marché, l'offre sera à nouveau égale à la demande. Les économistes ont pour habitude de représenter leurs courbes d'offre et de demande dans un graphique ayant pour axes le

prix et la quantité (Figure 1-3). Dans un tel graphique, le point d'équilibre est situé à l'intersection des courbes, car c'est en ce point que producteurs et consommateurs sont d'accord sur le prix [69]. Par ailleurs, ce graphique permet de représenter un changement de l'offre des producteurs ou de la demande des consommateurs, qui se traduit par un mouvement de la courbe, déplaçant alors le point d'équilibre [69].

Figure 1-3 : Modèle d'équilibre (adapté de [69])

Pour pouvoir quantifier l'évolution du point d'équilibre lorsque l'offre ou la demande change, il est possible d'utiliser l'élasticité. On peut définir l'élasticité de la demande comme le rapport entre la variation du prix d'un produit et celle de la demande pour celui-ci, tel que présenté dans l'équation ci-dessous [61, 70].

$$\eta_{Demande} = \frac{\frac{Demande_{Finale} - Demande_{Initiale}}{Demande_{Initiale}}}{\frac{Prix_{Final} - Prix_{Initial}}{Prix_{Initial}}} = \frac{\frac{\Delta Demande}{Demande}}{\frac{\Delta Prix}{Prix}} \quad \text{ou } \eta \text{ est l'élasticité}$$

On peut définir de manière similaire l'élasticité de l'offre.

$$\eta_{Offre} = \frac{\frac{Offre_{Finale} - Offre_{Initiale}}{Offre_{Initiale}}}{\frac{Prix_{Final} - Prix_{Initial}}{Prix_{Initial}}} = \frac{\frac{\Delta Offre}{Offre}}{\frac{\Delta Prix}{Prix}} \quad \text{ou } \eta \text{ est l'élasticité}$$

Le modèle développé par Ekvall et al. [61] est basé sur deux hypothèses primordiales. Premièrement, la variation est petite par rapport à l'ensemble du marché et qu'elle n'influence pas la tendance de celui-ci. Deuxièmement, les conséquences de la variation sont confinées au marché étudié. La première hypothèse permet de considérer une élasticité constante (en temps normal l'élasticité varie avec la quantité et/ou le prix du produit [61]). La deuxième hypothèse permet de

garder un système simple avec peu d'éléments [69] (seulement ceux directement influencés par le changement et la technologie marginale). ¸

Cette méthode a déjà été utilisée par de nombreux auteurs d'ACV-C [66-68, 71-74]. Le défaut principal de cette méthode repose dans sa simplicité. Effectivement, ne tenir compte que d'un marché en le considérant isolé peut amener à négliger certains phénomènes économiques importants [69]. Par ailleurs, les facteurs d'élasticité n'ont pas été calculés pour tous les marchés et peuvent varier selon de nombreux paramètres (temps, localisation si marché régional...) [61]. Pour résoudre la problématique liée à l'accessibilité des facteurs d'élasticité Ekvall et al. [61] proposent 3 solutions :

- attribuer la valeur « 0 » à une des élasticités, signifiant que l'offre ou la demande est inélastique (inaffectée par le prix);
- choisir une valeur d'élasticité pour la demande opposée à celle de l'offre ($\eta_{Demande} = -\eta_{Offre}$); ou
- utiliser des scénarios pour évaluer l'influence de l'élasticité sur les impacts environnementaux du système modélisé.

Cependant, il existe d'autres solutions possibles pour résoudre cette problématique. Par exemple, Ekvall [75], bien que conscient des difficultés d'une telle approche, propose de combiner les modèles économiques déjà existants avec l'ACV. Effectivement, les économistes essayent de traiter des problèmes similaires d'offre et de demande depuis plusieurs siècles et ont développé des modèles beaucoup plus complexes tels que présentés dans la section suivante [76].

1.3.2.3 Modèle d'équilibre

La théorie de l'équilibre, fondement des modèles d'équilibre, a été formalisée en 1776, par Adam Smith, dans son Œuvre « La richesse des nations » [77]. Un siècle plus tard, en 1874, Léon Walras définit les premiers principes des modèles d'équilibre général dans son livre « Éléments d'économie politique pure » [78]. Néanmoins, il faut attendre 1954 pour que la structure mathématique de ces modèles soit développée par Kenneth Arrow et Gérard Debreu dans leur article « Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy » [79].

La complexité des modèles d'équilibre provient des différentes équations utilisées pour calculer le point d'équilibre. Il existe différents types de modèles d'équilibre classés selon leurs

caractéristiques, celles-ci peuvent toucher le fonctionnement du modèle, le système qu'il décrit ou la manière de le construire. Ainsi, on distingue 5 caractéristiques majeures [80, 81]:

- l'échelle économique du modèle : équilibre partiel ou général;
- la construction du modèle : « top-down » ou « bottom-up »;
- l'échelle géographique du modèle : local ou multirégional;
- la dimension temporelle du modèle : statique ou dynamique; et
- le système d'équations du modèle : linéaires ou non linéaires.

Les modèles d'équilibre partiel ne s'intéressent qu'à une partie de l'économie, c'est-à-dire à un nombre restreint de secteurs économiques, voire à un seul. Ces modèles posent l'hypothèse de « Ceteris paribus », qui soutient que les modifications dans les secteurs étudiés n'ont aucun impact sur le reste de l'économie [82]. Cette hypothèse représente à la fois la faiblesse et la force de ces modèles. Effectivement, avec cette hypothèse il n'est pas possible de prendre en compte l'ensemble des conséquences d'une décision sur l'économie, car d'autres marchés non modélisés sont potentiellement impactés par un changement dans le marché modélisé. Cependant, limiter le nombre de secteurs économiques considérés permet de limiter le nombre de données nécessaires au modèle et d'obtenir une modélisation assez précise des secteurs économiques modélisés [69]. La première étape, pour construire un modèle d'équilibre partiel, consiste à décrire la situation présente des marchés étudiés. Pour ce faire, il est nécessaire de décrire les différents agents présents (technologies, procédés, société…) dans les secteurs économiques considérés, c'est-à-dire les paramètres descriptifs de ceux-ci (capacité, part de marché…), ainsi que les relations entre ceux-ci. Ensuite, il est nécessaire de décrire l'évolution de certains paramètres tels que la démographie, les revenus, la consommation des ménages… Finalement, pour atteindre l'équilibre, le modèle utilise une fonction d'optimisation se basant sur les relations précédemment décrite pour maximiser le « surplus total » du système tout en respectant un certain nombre de contraintes (temporelles, financières, de capacité maximale ou minimale…) [64, 81]. Le surplus est une notion économique représentant le gain que chaque acteur du système considère avoir fait. On distingue le surplus du consommateur qui est la différence entre le prix d'achat du produit et le prix que le consommateur serait prêt à payer, et le surplus du producteur qui représente la différence entre le coût de production et le prix de vente du produit. La Figure 1-4 représente les différents surplus [81].

Figure 1-4 : Équilibre et surplus (adapté de [81])

Dans un modèle d'équilibre partiel où la demande est fixée de manière exogène, la fonction d'optimisation tente uniquement de minimiser le prix de production, en fonction des différentes technologies présentes et accessibles (et des coûts de celles-ci). La notion d'équilibre des marchés est la fondation de tous les modèles d'équilibre, pourtant atteindre l'équilibre est impossible, car il faudrait un marché parfait où l'ensemble des acteurs possède toutes les informations nécessaires pour prendre les meilleures décisions possibles [81].

Les modèles d'équilibre général contrairement aux modèles d'équilibre partiel essayent de prendre en considération l'ensemble de l'économie, c'est-à-dire les équilibres des différents marchés existants ainsi que les relations, par exemple de substitution, entre ces différents marchés [64, 81-83]. De tels modèles permettent théoriquement de prendre en considération l'ensemble des conséquences d'une décision, mais nécessitent un nombre de données très important et restent souvent très agrégés au niveau des secteurs considérés [64, 84]. Similairement aux modèles d'équilibre partiel, les modèles d'équilibre général sont basés sur la description précise du système à une période présente ou passée [64]. Des coefficients d'élasticité et d'Armington seront ensuite utilisés. Les premiers pour décrire le comportement des marchés à une hausse ou une diminution de la demande ou des prix, les seconds pour décrire la substituabilité des produits des marchés de différentes régions [83]. Les modèles d'équilibre général optimisent, de la même manière que les modèles d'équilibre partiel, une fonction de coût, mais pour un grand nombre de marchés, de manière à atteindre l'équilibre, c'est-à-dire la production égalant la consommation [64, 85].

Les appellations « top-down » et « bottom-up » font référence à la manière dont le modèle est construit [80, 81]. Dans le premier cas, des données agrégées décrivant les secteurs économiques ainsi que le comportement macroscopique de ceux-ci sont utilisées. Ce type d'approche est souvent utilisé pour les modèles d'équilibre général, car il permet de prendre en compte l'ensemble des secteurs sans nécessiter des données trop détaillées sur ceux-ci. Les ruptures temporelles (changements brusques dans un secteur économique) ne sont en général pas prises en compte par ce type de modèle (car ils sont basés sur des relations historiques), signifiant une précision sur le long terme réduite par rapport au modèle « bottom-up ». Effectivement, les modèles « bottom-up » sont dits « technologies explicites », signifiant qu'ils sont basés sur une description précise des technologies actuelles. Ces modèles sont très pertinents lorsqu'il s'agit de décrire avec précision comment chaque technologie interagit avec une autre ou pour décrire les chaines de production, mais les aspects économiques tels que l'offre ou la demande doivent en général être ajoutés de manière exogène. L'approche « bottom-up » est en général utilisée pour les modèles d'équilibre partiel où la demande et son évolution sont ajoutées de manière exogène et le modèle doit optimiser la production.

La dimension géographique est aussi importante dans un modèle. Effectivement, certains modèles sont locaux, car ils n'étudient qu'une seule région et modélisent de manière exogène les importations et exportations ou de manière endogène, mais artificielle en ajoutant une région contenant « le reste du monde » [63]. Au contraire, d'autres modèles sont multirégionaux, signifiant qu'ils essayent de prendre en compte l'ensemble du marché étudié en tenant compte des différentes régions où celui-ci est présent et des interactions entre ces dernières. Par exemple, il existe un modèle énergétique TIMES/MARKAL pour la France se limitant à la description du système énergétique français [86] et un modèle similaire (NELSON) pour l'ensemble des pays nordiques (Suède, Norvège, Danemark, Finlande), car les échanges entre ceux-ci sont très importants, ce qui aurait limité l'utilité d'un modèle local décrivant uniquement le système énergétique d'un de ces pays [87].

Il est possible de distinguer les modèles statiques calculant le nouvel équilibre causé par une perturbation des modèles dynamiques calculant le nouvel équilibre, mais également le chemin pour atteindre l'équilibre. Les premiers modélisent directement l'équilibre de la perturbation étudiée. Les seconds calculent itérativement l'évolution du marché à travers plusieurs périodes, en se basant sur les résultats de la période précédente, chaque période influençant la suivante [80].

Finalement, une distinction est faite entre modèle linéaire et non linéaire. Cette différence est présente dans les équations utilisées par le modèle. Par exemple, dans un modèle énergétique linéaire, si la demande en énergie augmente de 1,767MW il sera possible d'installer une nouvelle centrale produisant exactement 1,767 MW sans tenir compte de la taille réelle de ce type de centrale, car les équations décrivant la capacité et les contraintes liées à celle-ci sont linéaires [81]. Bien entendu, une telle hypothèse est peu réaliste avec des sources énergétiques telles que les centrales nucléaires (pour lesquelles la taille est peu flexible), il est donc nécessaire d'utiliser des modèles non linéaires lorsque de telles technologies jouent un rôle important dans le système étudié [81].

L'utilisation de modèles économiques et plus particulièrement d'équilibre partiel est très récente en ACV, expliquant le faible nombre d'articles disponibles. L'étude de Mattsson et al. [87] fait partie des premières études ayant combiné les deux outils. Dans celle-ci le modèle NELSON, un modèle d'équilibre partiel, « bottom-up », dynamique et multirégional décrivant le système énergétique nordique est utilisé pour déterminer la production d'électricité marginale à court et long terme, répondant à une fermeture prématurée des centrales nucléaires. Mattsson et al. [87] justifient l'utilisation du modèle économique NELSON par la complexité des systèmes économiques ou énergétiques réels, qui ne peut pas être prise en compte par des méthodes trop simplifiées. Cependant, Mattsson et al. [87] indiquent que les incertitudes liées à l'utilisation de tels modèles sont très grandes et que leurs propres résultats ne sont en aucun cas quantitatifs. Finalement, ils encouragent la communauté scientifique à poursuivre les recherches pour améliorer ces modèles et réduire les incertitudes liées à ceux-ci. Les études de Dalgaard et al. [88] et de Earles et al. [89] sont d'autres exemples d'études combinant l'ACV et les modèles économiques d'équilibre partiel. Dalgaard et al. [88], après avoir déterminé les plantations marginales à l'aide de la méthode d'Ekvall et Weidema [61], utilisent le modèle ESMERALDA pour déterminer les producteurs marginaux de colza et d'orge de printemps, parmi 31 types de fermes du Danemark. Earles et al. [89] utilisent le modèle USDFP (U.S. Forest Product Model) pour analyser l'impact d'un scénario énergétique, où l'utilisation de bois pour la production d'éthanol est augmentée drastiquement aux États-Unis. Une méthodologie en 3 étapes est développée dans cette étude : premièrement, les impacts économiques des différentes politiques sont modélisés à partir du modèle d'équilibre partiel permettant l'identification des technologies marginales ensuite, des procédés provenant de bases de données d'ACV sont utilisés pour représenter les technologies

marginales identifiées et finalement les impacts environnementaux sont calculés à partir de ces bases de données. D'autres études similaires, combinant l'ACV et les modèles d'équilibre partiel existent, mais restent assez rares ([90-93]). Lors de l'utilisation de modèles économiques pour déterminer la technologie marginale d'un secteur économique, il est nécessaire de prendre en compte les paramètres politiques pouvant avoir une influence sur celui-ci. Par exemple pour le secteur énergétique, la taxe carbone et les limitations sur le nucléaire présentes dans certains pays sont de bons exemples d'actions politiques pouvant orienter les technologies marginales à la fois sur le long terme (car les centrales installées devront respecter les normes et permettre au pays d'atteindre ses objectifs environnementaux) et sur le court terme (car le prix de fonctionnement pourrait être fortement impacté par des taxes telles que la taxe carbone) [91, 94, 95]. La prise en compte de ces paramètres donne un certain réalisme au modèle, mais produit aussi une certaine incertitude, car les politiques peuvent beaucoup fluctuer d'un gouvernement à l'autre ou peuvent s'adapter aux souhaits de la population.

Finalement, bien que l'utilisation de modèles économiques d'équilibre partiel permette de prendre en compte un nombre plus important de paramètres, les phénomènes plus globaux touchant un grand nombre de secteurs économiques ne sont pas pris en compte. Ces phénomènes de marché pourraient être pris en compte grâce à l'utilisation de modèle d'équilibre général. Cependant, l'utilisation de modèles d'équilibre général en ACV est peu courante et l'étude de Kloverpis et al. [96] est une des premières à combiner les deux outils. Kloverpis et al. [96] utilisent le modèle économique GTAP pour identifier les terres affectées, à une échelle globale, par une augmentation de la demande en blé au Brésil, aux États-Unis, au Danemark et en Chine. Pour pouvoir identifier les terres affectées, certaines modifications, telle l'implantation de courbes d'offre de terres cultivables, ont dû être ajoutées (le modèle GTAP considère la surface cultivable constante, or il est nécessaire de prendre en considération l'augmentation de cette surface lorsque la demande pour des produits agricoles augmente). Cependant, l'étude de Kloverpis et al. [96] ne tient compte que des changements dans le secteur de l'agriculture, n'utilisant pas GTAP pour modéliser les impacts sur l'ensemble de l'économie.

L'électricité est un secteur de l'économie particulièrement concerné par ces phénomènes globaux, car elle est nécessaire pour pratiquement l'ensemble des autres secteurs économiques [95]. Dès lors, une augmentation (ou diminution) de son prix pourrait affecter sérieusement l'ensemble de l'économie. La seule étude ACV actuelle ayant spécifiquement utilisé un modèle

d'équilibre général pour quantifier les conséquences à une échelle globale d'un changement dans le secteur énergétique, est l'étude de Dandres et al. [84]. Effectivement, Dandres et al. [84] utilisent le modèle économique GTAP pour modéliser l'influence d'une politique énergétique européenne sur l'économie globale ainsi que les impacts environnementaux potentiels de ces changements. Ainsi, cette étude est la première à utiliser le modèle d'équilibre général GTAP pour modéliser l'ensemble de l'économie en ACV. Une méthodologie similaire à celle d'Earles et al. [89] est utilisée pour combiner l'ACV et GTAP, mais à beaucoup plus grande échelle, car ce ne sont pas des produits dont l'impact doit être modélisé, mais des secteurs économiques entiers, rendant la correspondance, entre la base de données ACV et les résultats du modèle économique, beaucoup plus complexe. Par ailleurs, une évolution économique et technologique est prise en compte, car la politique énergétique étudiée se déroule sur 20 ans (2005-2025).

Cependant, les modèles d'équilibre général sont très agrégés, rendant l'identification d'une technologie marginale très grossière et incertaine. Une solution déjà présente dans certains modèles décrivant le secteur énergétique est l'utilisation en parallèle d'un modèle énergétique d'équilibre partiel avec un modèle d'équilibre général. Ainsi, les deux modèles échangent leurs données de manière itérative jusqu'à ce qu'une convergence soit atteinte : le modèle général alimente le modèle énergétique avec une demande à combler, ensuite ce dernier calcule le prix de l'électricité pour répondre à celle-ci et le modèle général calcule à nouveau un équilibre en fonction de ce prix, etc. [97]. Le modèle canadien E3MC est proche de cette combinaison, car celui-ci utilise le modèle énergétique et économique Énergie 2020 et le modèle économétrique et macro-économique Informetrica (TIM) [97]. Les modèles économétriques sont basés sur l'identification de relation économique grâce à des statistiques économiques et non pas sur l'optimisation d'un système [98].

Bien qu'Earles et al. [63] indiquent que les études combinant l'ACV avec un modèle économique soient de plus en plus courantes, cette combinaison est loin de faire l'unanimité dans la communauté ACV. Effectivement, certains auteurs indiquent que les limitations des modèles économiques (décrites dans la section suivante) pourraient être trop importantes pour permettre un réel apport d'informations ou ce serait à un coût très (trop) important [75].

1.3.2.4 Les limitations des modèles économiques

Les principales limitations des modèles économiques sont :

- L'investissement financier, temporel, ainsi que le besoin très important en données (souvent difficilement accessibles) font de la création d'un modèle économique détaillé, un processus long et complexe, nécessitant souvent la participation d'experts, à la fois pour leur création et pour leur utilisation [64, 85].
- Les modèles économiques sont peu adaptés pour décrire l'évolution économique des pays en voie de développement, car une part importante de leur économie n'est pas monétaire (marchés informels), ne permettant pas l'obtention des données nécessaires pour la quantifier et la considérer dans le modèle [80]. Les modèles « bottom-up » étant basés sur une approche plus technologique qu'économique permettent souvent de mieux aborder cette problématique [80].
- Les modèles d'équilibre et plus particulièrement d'équilibre partiel ne permettent pas, ou difficilement, la prise en compte des comportements humains [64]. Effectivement, des hypothèses telles que la clairvoyance sont souvent nécessaires pour justifier l'existence d'un point d'équilibre. Cette dernière suppose que chaque acteur du marché a en sa possession toutes les informations (présentes, mais également futures) nécessaires pour prendre une décision, permettant ainsi de toujours choisir la meilleure offre et signifiant une concurrence parfaite. Pour résoudre cette problématique, il existe des approches stochastiques, permettant d'imposer une probabilité sur chaque décision pour refléter le caractère parfois aléatoire du comportement humain. Marvuglia et al. [64] proposent d'utiliser des approches ayant pour fondation le comportement humain et non pas la perfection de la réflexion économique.
- Les modèles ne sont que des approximations de la réalité, signifiant qu'ils sont et seront toujours porteurs d'incertitude [61, 99]. Celle-ci est présente dans de nombreux éléments par exemple :
    - les équations utilisées qui décrivent de manière simplifiée des phénomènes très complexes.
    - Les paramètres du modèle, par exemple les facteurs d'élasticité, de substituabilité et d'évolution technologique. Les facteurs d'élasticité et de substituabilité sont incertains, car ils sont variables géographiquement (par exemple à travers la culture

des régions dans le monde) et temporellement (par exemple avec la mode). Le facteur d'évolution technologique est lié au futur et de par sa nature incertain.

- Une limite souvent rencontrée par les auteurs tentant d'allier l'ACV à un modèle économique est le couplage entre les résultats donnés par ce dernier avec les technologies présentent dans les bases de données ACV [64, 84]. D'une part, certains modèles donnent des résultats trop agrégés ne permettant pas une bonne correspondance. D'autre part, les bases de données ACV sont souvent incomplètes et ne permettent pas de modéliser l'ensemble de l'économie.

1.4 ACV-prospective

L'ACV conséquentielle réalisée dans ce mémoire est également prospective, car elle met en jeu plusieurs scénarios d'implantation future de centres de données au Canada. L'ACV prospective est une analyse environnementale tournée vers le futur et dont les systèmes de produits n'existent que sous forme de projets ou de possibilités. Cette section décrit la manière dont l'ACV utilise certaines méthodes d'évaluation du futur.

Pesonen et al [100] décrivent les résultats d'un groupe de travail, nommé par la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), ayant pour objectif le développement de l'ACV-P (nommé « Scenario Development in LCA »). L'utilisation de scénarios est choisie pour aborder la prospective en ACV et 5 catégories de méthodes permettant de construire ces scénarios sont identifiées [59, 101]:

- Les méthodes basées sur l'extrapolation : l'extrapolation est fondée sur l'analyse de données historiques pour prédire ce que sera le futur. Elle s'appuie donc sur l'hypothèse selon laquelle le futur est une extension du passé. C'est une méthode généralement précise à court et moyen terme dans des contextes où les ruptures et les évènements inattendus sont rares. Les méthodes classées dans cette catégorie sont par exemple l'analyse de tendance, les séries temporelles, les méthodes économétriques et la simulation de modélisation.
- Les méthodes basées sur la modélisation : la modélisation est basée sur l'hypothèse selon laquelle les différents mécanismes ayant bâti le passé construiront l'avenir. Le principe de ces méthodes est donc d'identifier les mécanismes passés pour modéliser les futurs les plus probables. L'analyse de similarité (« analogy analysis »), l'analyse séquentielle de

technologies (« technological sequence analysis »), l'analyse structurelle (« structural analysis »), les modèles technico-économiques et d'équilibre partiel et général font partie de cette catégorie de méthode d'évaluation.

- Les méthodes participatives : l'hypothèse de départ de cette catégorie est que le futur est trop complexe pour être modélisé à partir d'extrapolation ou de modélisation. Dès lors, il est nécessaire d'interroger des experts pour savoir ce que le futur devrait (pourrait) être. Il est possible d'utiliser les méthodes précédemment décrites comme point de départ pour aider les experts interrogés. Les méthodes appartenant à cette catégorie sont, par exemple, les groupes de travail, les visions d'experts, etc.
- Les méthodes exploratoires : cette catégorie a pour but l'identification des futurs possibles. Pour réaliser cet objectif, des méthodes analytiques et imaginatives sont combinées. Les premières permettent d'obtenir l'image la plus complète possible du système étudié tel qu'existant actuellement et les secondes permettent d'obtenir les données manquantes. L'analyse morphologique, les arbres de pertinence et les cartes heuristiques sont des exemples de méthodes exploratoires.
- Les méthodes normatives : contrairement à l'ensemble des méthodes précédentes, le point de départ des méthodes normatives est une situation future désirée ou crainte. Il est ensuite nécessaire de faire le chemin inverse pour connaitre les différentes étapes qu'il faut traverser pour relier le présent à ce futur. Ces méthodes sont particulièrement pertinentes lorsque le commanditaire est un acteur influençant le présent pour pouvoir ainsi l'orienter vers les étapes identifiées (ou au contraire, les éviter si la situation imaginée n'est pas désirée).

Pesonen et al [100] distinguent deux types de scénarios : « les scénarios, et si ? » et « les scénarios, pierre angulaire ». Les premiers ont des horizons temporels à court ou moyen terme et ont pour but la comparaison de systèmes dont la définition est déjà suffisamment précise pour limiter les hypothèses nécessaires pour leur description. Ces scénarios utilisent majoritairement les méthodes basées sur l'extrapolation et la modélisation. Au contraire, les scénarios « pierre angulaire » ont pour but une évaluation à moyen ou parfois long terme avec peu d'informations sur les systèmes étudiés. Les méthodes utilisées sont surtout participatives, normatives et exploratoires. Ces scénarios, « pierre angulaire », peuvent être la première étape d'une étude pour ainsi obtenir

des informations plus stratégiques. Ils permettent de passer en revue un grand nombre de possibilités pour ensuite restreindre l'étude aux plus pertinentes, qui seront étudiées par la suite, si la quantité d'informations le permet, avec des scénarios « et si ? ». L'implantation de centres de données au Canada correspond à un scénario « et si? », car le cadre est défini en détail.

Finalement, le groupe de travail détermine comment incorporer cette approche basée sur les scénarios, à l'ACV. La Figure 1-5 résume les résultats de cette union [100].

Figure 1-5 : Incorporation de l'approche par scénario dans l'ACV (adapté de [100, 102])

Un paramètre souvent abordé en ACV-prospective est l'évolution technologique. Effectivement, réaliser une ACV, évaluant des scénarios sur 10, 25, voire 50 ans, avec les technologies et procédés d'inventaire tels qu'utilisés dans le présent, peut mener à des biais importants. Mais l'évaluation d'évolutions technologiques est très compliquée à modéliser. Frischknecht et al. [103] identifient 3 difficultés que devront surmonter les ACV voulant incorporer l'évolution technologique : premièrement, les technologies nouvellement développées sont généralement évaluées sur leurs performances en laboratoire qui peuvent être très différentes de celles qui seront observées sur le terrain. Deuxièmement, les conditions environnementales,

sociales et économiques changeront probablement pendant la mise en place et l'expansion de la technologie ce qui pourra fortement influencer sa croissance et sa pénétration dans le marché. Finalement, les prédictions des différents paramètres précédemment cités et de l'évolution technologique sont incertaines de par leur nature touchant au futur. Rasmussen et al. [104] proposent une méthode hybride répondant à cette problématique en combinant l'analyse du cycle de vie et la prospective technologique (« technology foresight »). Le problème majeur d'une telle combinaison est la quantité de données requises. En effet, la prospective technologique permet de créer une image de la technologie telle qu'elle pourrait être dans le futur, mais cette image est rarement suffisamment précise pour combler le besoin important de données de l'ACV [104]. Un compromis est donc nécessaire permettant d'utiliser la complémentarité de ces méthodes pour les améliorer mutuellement.

1.5 L'Analyse du cycle de vie et les TIC

Chacune des solutions étudiées pour résoudre la problématique liée à la consommation électrique des centres de données possède ses propres difficultés en termes de méthodologie ACV. D'une part, l'implantation massive de centres de données au Canada cause une hausse de la production d'électricité qu'il est difficile de modéliser, tel que présenté dans la section 1.5.1. Une partie de ses difficultés est directement liée à l'utilisation de l'ACV conséquentielle et a déjà été présentée dans la section 1.3. D'autre part, l'évaluation des bénéfices de la virtualisation est problématique, car l'évaluation des impacts directement causés par la production, l'utilisation et la fin de vie des TIC est souvent très difficile (section 1.5.2).

1.5.1 Problématique de l'ACV et de l'électricité

L'évaluation des impacts liés à l'électricité est une problématique reconnue depuis déjà plusieurs années dans le monde de l'ACV. Effectivement, la consommation d'électricité contribuant de façon importante aux impacts environnementaux dans un grand nombre d'ACV, il a été nécessaire d'approfondir la modélisation de la production électrique en ACV. Curran et al. [65], ainsi que différents auteurs, traitant de ce sujet, ont identifié 6 problématiques majeures lors de la modélisation des impacts environnementaux de la production et consommation d'électricité [65, 95, 105]:

- la modélisation des impacts environnementaux liés aux infrastructures de transport d'électricité et aux pertes électriques;
- la modélisation des impacts environnementaux des nouvelles technologies de production et des technologies de production n'utilisant pas de combustibles fossiles;
- l'étendue temporelle à considérer;
- l'étendue géographique à considérer;
- les méthodes d'allocation; et
- l'approche à considérer (vision attributionnelle ou conséquentielle).

Les impacts liés aux infrastructures du réseau de transport d'électricité et aux pertes électriques sont difficiles à prendre en compte, car le réseau de transport d'électricité peut être très étendu et très complexe [65].

Les impacts environnementaux des nouvelles technologies de production sont incertains [65], car souvent elles ne sont pas installées à grande échelle et peu de données les caractérisant existent ou sont confidentielles. Par ailleurs, ces technologies étant nouvelles, il est fort probable qu'elles évoluent encore beaucoup, introduisant une incertitude importante sur leurs impacts si des données de projets pilotes sont utilisées [65]. Les technologies de production n'utilisant pas de combustibles fossiles possèdent une grande incertitude sur leurs impacts, car la majorité de ceux-ci sont réalisés lors de la construction et de la fin de vie (phases pour lesquelles les données sont moins précises) [106, 107], contrairement aux technologies de production utilisant des combustibles fossiles dont l'impact est principalement dû à la combustion et extraction de matières fossiles [95, 108].

L'électricité est produite et consommée simultanément à de multiples endroits du réseau. Pour pouvoir associer les impacts d'un kWh consommé, il est nécessaire de déterminer par qui celui-ci a été produit. Cependant lors de la production d'électricité il est impossible de suivre les électrons la constituant. Les impacts associés sont donc ceux de l'ensemble des technologies, c'est-à-dire le grid mix, alimentant le réseau sur lequel le kWh évalué a été consommé. Ainsi, il peut être problématique de déterminer le territoire sur lequel est produite l'électricité alimentant le procédé étudié. Il est possible de choisir un grid mix local, régional, national (ce qui est souvent le cas en ACV [95]), continental ou mondial. La justification de ce choix est parfois compliquée et

souvent arbitraire, car les réseaux électriques nationaux sont souvent très étendus et interconnectés entre eux, par exemple : le réseau électrique européen englobe un grand nombre de pays. Weber et al. [109] ont comparé les impacts associés à la production d'un kWh aux États-Unis pour différentes régions et échelles géographiques, en considérant ou pas les importations et exportations. Les résultats obtenus indiquent des impacts environnementaux pour la production d'un kWh pouvant varier d'un facteur 100 en fonction de la situation étudiée.

L'étendue temporelle fait référence à la période de temps sur laquelle le grid mix est modélisé. De nombreuses études ACV considèrent une période de un an [95]. Pourtant le grid mix peut varier énormément entre différentes années, saisons, périodes de la journée (particulièrement entre les heures creuses ou heures de pointe) [95]… Ainsi, à l'exception des procédés consommant uniformément de l'électricité pendant toutes les heures de la journée, et ce, durant toute l'année, il est pertinent d'utiliser des grids mix temporels (variant en fonction de l'heure, de la journée et de la période de l'année) pour tenir compte en ACV des variations de consommation d'électricité du procédé étudié. Les données pour calculer les grid mix horaire n'étant pas toujours disponibles, une amélioration possible demandant moins d'informations est la séparation des processus fonctionnant en heures de pointe ou en heure creuses, car les grids mix de ces deux périodes sont souvent très différents [110].

La production d'électricité n'échappe pas au problème d'allocation souvent rencontré en ACV. Les centrales à cogénération (CHP, « combined heat and power »), très utilisées dans les pays nordiques, sont un procédé multiple produisant à la fois de la chaleur et de l'électricité. L'attribution des impacts entre électricité et chaleur peut se faire selon différents critères. Soimakallio et al. [95] illustrent cette problématique en montrant les résultats de l'allocation pour 6 critères différents démontrant la variabilité des résultats en fonction des choix d'allocation.

L'échelle géographique, temporelle et la méthode d'allocation, pouvant affecter énormément les évaluations d'impacts environnementaux de la production d'un kWh, plusieurs auteurs ([65, 95, 109]) recommandent qu'un processus d'harmonisation soit engagé pour pouvoir définir la méthode à utiliser en fonction des différents cas pouvant être rencontrés.

Finalement, une séparation entre méthode attributionnelle et conséquentielle est aussi présente dans le domaine de l'électricité [111, 112]. Comme décrit précédemment, la méthode attributionnelle s'intéresse à une situation en « régime permanent » et utilise principalement des

grid mix nationaux et annuels. Au contraire, la méthode conséquentielle tente d'identifier avec précision la technologie utilisée pour répondre à la demande supplémentaire en électricité (ou la source inutilisée si la demande diminue). Lors de cette identification, il est nécessaire de connaitre l'horizon de temps du changement. À court terme, le système énergétique ne peut pas subir de changement important, car la capacité maximale reste constante et il est nécessaire d'augmenter l'utilisation des centrales présentes pour répondre à une augmentation de la demande. À long terme, il est possible d'installer de nouvelles centrales et les possibilités sont donc beaucoup plus nombreuses. Mathisen et al. [105] ont étudié la précision et la pertinence de la méthode de Weidema et al. [60] au domaine de l'électricité en l'appliquant historiquement et en comparant différentes études ayant été réalisées dans des contextes similaires. Les résultats de l'analyse historique démontrent que la technologie marginale réelle correspond rarement à celle identifiée à partir des données disponibles à la période étudiée. De plus, l'analyse comparative indique que la méthode simplifiée n'est pas utilisée de manière homogène, car chaque auteur identifie une technologie marginale différente et la justifie avec ses propres arguments ne permettant pas clairement de savoir qui a tort et qui a raison [105]. Finalement, Mathisen et al. [105], au vu de l'incertitude planant sur la technologie marginale identifiée, conseillent l'utilisation de scénarios pour analyser la sensibilité des résultats au choix de la technologie marginale. Par ailleurs, Mathisen et al. [105] indiquent qu'en raison de la complexité des systèmes énergétiques, c'est probablement un mix de technologies qui répond à un changement de la demande électrique. Pour identifier les technologies marginales, ils proposent l'utilisation de modèles économiques et énergétiques. Ils illustrent leurs propos avec une étude de cas évaluant l'impact de l'incinération des déchets sur le système énergétique danois et identifient 3 à 4 technologies, répondant à ce changement, ainsi que l'ampleur de leur participation, en utilisant un modèle énergétique. L'utilisation de modèles énergétiques et/ou économiques en ACV est assez récente et il existe peu d'études combinant les deux. Néanmoins, Il est possible de citer l'étude de Mattsson et al. [87], précédemment décrite (section 1.5.2), celle d'Eriksson et al. [93], celle de Lund et al. [91] et de Pehnt et al. [94]. Eriksson et al. [93] utilisent les résultats de l'étude de Mattsson et al. [87] pour déterminer deux grids mix potentiels de technologies marginales (le pire et le meilleur cas) et ensuite comparent la production de chaleur à partir de l'incinération de déchets avec de la biomasse ou du gaz naturel. Lund et al. [91] utilisent un modèle pour identifier, sur le long terme (2030), les technologies affectées par une installation massive d'éoliennes au Danemark. Celle-ci est une des

seules études faisant une distinction entre les saisons et le jour et la nuit permettant l'obtention d'une plus grande finesse dans les résultats. Finalement, Pehnt et al. [94]. évaluent également l'impact de l'implantation d'éoliennes, à long terme (2020), mais dans le contexte allemand et en insistant sur les caractéristiques négatives des sources éoliennes, c'est-à-dire leur intermittence nécessitant un accroissement de la capacité de production d'autres sources pour répondre à la demande lorsque les éoliennes de fonctionnent pas.

Néanmoins, bien que l'utilisation de modèle économique permette de prendre en considération un grand nombre de paramètres, elle comporte également un certain nombre de désavantages, tels que décrits dans la section 1.3.2.4.

Ce mémoire, grâce à l'utilisation d'un modèle économique, permet de répondre directement à la problématique de l'étendue géographique et de l'approche à considérer.

1.5.2 Problématiques de l'ACV et des TIC

Au vu de l'importance des TIC dans la société actuelle et de leur empreinte écologique, un grand nombre d'évaluations environnementales, sous la forme d'ACV ou d'empreinte carbone, ont déjà été réalisées. Pourtant Yao et al. [113] et Grimm et al [24], estiment que ces analyses environnementales, de par leurs disparités méthodologiques, rendent leur comparaison et l'obtention de conclusions sur les tendances des empreintes environnementales très difficiles, voire impossibles. Ces différences sont présentes à différents niveaux [24, 113, 114]:

- Les catégories d'impacts environnementaux considérées sont rarement identiques, bien que les empreintes carbone et les analyses de l'énergie consommée sur l'ensemble du cycle de vie soient les plus courantes.
- Les frontières du système peuvent être très différentes d'une étude à l'autre : incluant parfois la production ou restant centrées uniquement sur l'utilisation.
- Les hypothèses, surtout sur la phase d'utilisation, varient fortement.
- Les approches peuvent être « bottom-up », signifiant que les appareils sont démontés et que les pièces les composant sont évaluées séparément [115], ou « top-down », en utilisant des matrices économiques du secteur électronique et en reliant les impacts environnementaux directement aux valeurs économiques des produits étudiés. Cette dernière approche est

fortement critiquée par Yao et al. [113] qui indiquent que les coûts financiers des matériaux composant les TIC sont souvent très élevés ce qui a pour résultat de surestimer les impacts de la phase de production et d'extraction des matières premières dans une approche « top-down ».

- La qualité des données d'inventaire varie beaucoup : les sources de données peuvent être des bases de données génériques telles qu'ecoinvent, ou des données fournies directement par le fabricant [116].

De plus, des incertitudes sur les données d'inventaire des TIC sont présentes, à la fois dans leur phase de production, de fin de vie et d'utilisation :

- Les données d'inventaire de la phase de production sont souvent très difficiles à obtenir. Car, d'une part, les producteurs, pour des raisons de confidentialité ou simplement parce qu'ils ne veulent pas mesurer l'ensemble des paramètres nécessaires, ne fournissent pas les données d'émission et de consommation de ressources de leurs processus de fabrication. Et d'autre part, le nombre important de petits équipements ainsi que leur complexité rendent l'obtention de l'ensemble des données les caractérisant très compliquée. Par ailleurs, l'étude de Guldbrandsson et al. [114] indique que le nombre de marques et de modèles par appareil existant est aussi un problème (par exemple il existe déjà 10 types d'iPhone différents…), car chaque étude est spécifique à celui qu'elle évalue et les résultats peuvent énormément varier d'une étude à l'autre. Cette variation provient à la fois du poids, qui varie énormément, mais même lorsque les résultats sont normalisés à 1 kg, ils peuvent être très différents en fonction de la marque et du modèle étudié. Guldbrandsson et al. [114] donnent l'exemple d'études sur les téléphones mobiles dont les impacts de la production peuvent varier de -50% à +100%.
- La fin de vie est la phase la plus incertaine du cycle de vie des TIC. En effet, une grande partie des TIC sont envoyées vers des pays, tels que l'Inde, la Chine ou des pays africains, où ils sont pris en charge via des grands réseaux informels de démantèlement et de recyclage [117]. Ainsi ce sont souvent des personnes non éduquées, non qualifiées et inconscientes des risques pour la santé qui travaillent, souvent sans protection, dans ces réseaux [117]. Il est extrêmement compliqué d'obtenir des informations précises sur de tels réseaux informels. Par ailleurs, bien que de nombreux pays commencent à développer leurs

propres filières de recyclage pour ce genre de déchets, les impacts de celles-ci sont encore très peu documentés [114].

- L'utilisation est une phase problématique de par sa variabilité [114, 118]. En effet, la phase d'utilisation dépend du modèle d'appareil étudié, plus particulièrement de ses fonctionnalités (veille, économie d'énergie…) et de sa consommation, mais aussi du comportement de l'utilisateur [113, 114]. Dès lors, il est nécessaire, lorsqu'une étude tente d'évaluer les impacts liés à l'utilisation de TIC, de créer des scénarios réalistes pour la situation étudiée. Mais ces scénarios peuvent être à l'origine de variations importantes au niveau des résultats entre différentes études. Par ailleurs, une hypothèse supplémentaire très importante est souvent nécessaire pour caractériser la phase d'utilisation : la durée de vie du matériel. Celle-ci pourrait sembler facile à obtenir, pourtant Yao et al. [113] et Grimm et al. [24] indiquent qu'elle varie entre 2 et 6,6 ans entre les études. La variation de la durée de vie explique pourquoi certaines études concluent par une domination des impacts environnementaux de la phase d'utilisation et d'autres de la phase de production. Finalement, l'utilisation est une phase dont les impacts proviennent majoritairement de la consommation d'électricité. Ainsi, le grid mix utilisé, c'est-à-dire la proportion de chaque technologie utilisée pour produire de l'électricité, est d'une importance capitale pour ce genre d'étude [24].

Bien que ces études varient énormément dans leurs méthodologies, leurs hypothèses et leurs résultats, il semble que le bénéfice potentiel pouvant être apporté par les TIC fasse consensus parmi les études comparant des systèmes standards à leurs homologues électroniques [24, 113]. Malgré cette observation encourageante, certains auteurs indiquent que la majorité de ces études négligent complètement les effets rebonds en raison de la complexité qu'entraine leur quantification [113]. Dès lors, des études incluant ces derniers sont nécessaires pour évaluer l'impact de ceux-ci sur les conclusions.

En définitive, il est important de signaler que les TIC ont changé énormément et rapidement au cours des 30 dernières années et que cette tendance ne semble pas diminuer. Dès lors, les évaluations environnementales les caractérisant sont souvent obsolètes ou très approximatives après une période de temps très courte [113, 114].

L’analyse effectuée dans la suite de ce mémoire reste préliminaire, ainsi la qualité des données des différentes phases du cycle de vie doit être considéré faible excepté pour la phase d’utilisation, pour laquelle des données détaillées ont été obtenues. Pour répondre à la problématique de disparité et de transparence des analyses environnementales des TIC, celle effectuée dans ce mémoire sera décrite en détail pour être la plus transparente possible.

CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

2.1 Résumé de la problématique

Aujourd'hui, la société est de plus en plus concernée par les problèmes environnementaux et la croissance de la consommation d'électricité est un enjeu majeur qui est au centre de nombreuses études. Le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC), qui utilise déjà 8% de la production mondiale d'électricité, est particulièrement concerné puisque sa consommation énergétique au cours des dernières années n'a fait qu'augmenter. Parmi les TIC, les centres de données représentent une partie de la solution, car ils sont un des éléments essentiels des stratégies de dématérialisation et d'optimisation, et une partie du problème, car ils sont responsables à eux seuls de 17% de la consommation d'électricité des TIC. De nombreuses recherches ont déjà été faites pour optimiser la phase de fonctionnement des centres de traitement de données en maximisant l'efficacité de ceux-ci, par exemple à travers la proportionnalisation ou en recherchant des nouvelles approches de refroidissement.

Deux solutions potentielles sont envisagées et évaluées dans ce mémoire. La première est l'implantation massive de centres de données au Canada, car celui représente un avantage de par sa météo (température froide) et la production importante d'hydroélectricité. Cependant, la méthode pour prendre en considération la demande énergétique importante des centres de données doit être développée, car bien que l'ACV existe depuis plusieurs décennies, la prise en compte de l'électricité varie énormément d'une étude à l'autre. En effet, les normes ISO 14040-44 laissent beaucoup de liberté aux analystes. Les ACV étudiant des décisions provoquant des changements dans le secteur énergétique à moyen ou long terme, c'est-à-dire les ACV prospectives et conséquentielles, sont particulièrement touchées par ce manque de standardisation. En effet, l'identification des technologies marginales futures est un processus délicat, car de nombreux paramètres techniques, géographiques, politiques, environnementaux… doivent être pris en compte. L'objectif de cette étude est l'identification de technologies marginales futures répondant à la demande des nouveaux centres de données dans le secteur électrique nord-américain, à travers l'intégration d'un modèle économique. Pour ce faire, la méthode d'ACV conséquentielle et prospective est utilisée en parallèle avec un modèle économique et énergétique, pour identifier les technologies marginales de production d'électricité et évaluer l'impact environnemental de l'implantation future de centres de données au Canada. L'utilisation de modèle énergétique et

économique en ACV est très récente et il existe peu d'études de cas. Cette étude est ainsi une des premières à combiner l'ACV-conséquentielle avec un modèle énergétique et économique dans un cadre nord-américain.

La deuxième solution envisagée est l'utilisation de la virtualisation. Différentes incohérences et lacunes sont actuellement présentes dans les méthodologies utilisées pour évaluer les bénéfices environnementaux des stratégies d'optimisation des centres de données. Effectivement, la majorité des études d'évaluation environnementale des TIC ne possèdent pas une vision globale, car seule la phase d'utilisation est considérée et d'autre part, les impacts environnementaux étudiés sont souvent centrés uniquement sur l'énergie ou le carbone. La méthode ACV apparait comme une solution possible à cette problématique, car celle-ci possède à la fois une vision complète, en considérant l'entièreté du cycle de vie, et multicritère, en évaluant plusieurs impacts environnementaux. Ainsi, une ACV préliminaire évaluant les impacts d'un service de vidéoconférences, pour lequel les serveurs utilisent la virtualisation, est réalisée dans ce mémoire.

2.2 Objectifs

1. **Modéliser**, à l'aide d'un modèle ***économique***, la consommation d'énergie de la phase d'utilisation d'un groupe de serveurs générant un nuage informatique (la perturbation) implanté au Canada, de 2015 à 2030.

    a. **Identifier** les conséquences de l'implantation de centres de données sur les exportations d'électricité du Canada

    b. **Identifier** les technologies marginales des provinces canadiennes dans lesquelles un centre de données est implanté

    c. **Évaluer** l'influence de la taille de la perturbation (quantité de centres de données implantée) sur les résultats des objectifs 1.a et 1.b.

    d. **Identifier** la perturbation pour laquelle les impacts environnementaux par kWh marginal consommés sont minimaux.

    e. **Comparer** les approches attributionnelle et conséquentielle dans un contexte prospectif

2. **Évaluer** les bénéfices environnementaux potentiels de la virtualisation avec la méthode ACV.
    a. **Évaluer** les impacts environnementaux potentiels d'un service de vidéoconférences.
    b. **Comparer** les résultats obtenus avec un grid mix horaire ou annuel
    c. **Comparer** les résultats de l'approche attributionnelle et conséquentielle

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Résumé de la méthodologie

Deux méthodologies sont nécessaires pour atteindre les deux objectifs principaux présentés à la section 2.2. La première méthodologie traite l'objectif 1, c'est-à-dire la problématique liée à la modélisation conséquentielle et prospective, à partir d'un modèle économique, du secteur énergétique canadien. Ensuite, la deuxième méthodologie présente l'ACV préliminaire réalisée pour évaluer les bénéfices environnementaux de la virtualisation et ainsi atteindre l'objectif 2.

3.1.1 Résumé de la combinaison de l'ACV avec un modèle économique

Cette partie du travail porte sur l'incorporation d'un modèle économique dans une ACV-C, avec pour objectif l'identification des technologies marginales de production d'électricité sur le long terme. Une analyse du réseau électrique canadien et plus particulièrement de sa réponse à une augmentation de la demande en énergie est ainsi réalisée. L'étude de cas utilisée pour illustrer une telle perturbation est l'implantation de centres de données au Canada. Effectivement, le Canada semble être un choix très pertinent à la fois pour sa production importante d'hydroélectricité (source d'électricité peu émettrice de GES) et pour son climat, suffisamment froid, dans de nombreuses régions, pour permettre l'utilisation du « free-cooling ».

La réalisation de cette étude est faite en plusieurs étapes telles qu'illustrées dans la Figure 3-1. La première étape est la mise au point de scénarios, décrivant l'évolution de la consommation électrique des centres de données au cours du temps. Un scénario de référence est également défini à des fins de comparaison. Le scénario de référence décrit l'évolution macroéconomique du Canada incluant le secteur des TIC, mais excluant la demande supplémentaire en électricité pour les centres de données de l'étude de cas. La seconde étape est la modélisation de ces scénarios dans le modèle E3MC (modèle énergie-émission-économie du Canada). L'étape suivante est l'identification des technologies marginales utilisées pour répondre à la demande des centres de données, celle-ci est faite en comparant les différents scénarios au scénario de référence. La quatrième étape est l'évaluation des impacts environnementaux. Ceux-ci sont calculés à partir des technologies marginales identifiées à l'étape précédente. Finalement, la dernière étape est l'interprétation des résultats obtenus et l'optimisation de la demande énergétique des centres de données en fonction des impacts environnementaux.

Pour évaluer la pertinence de l'approche prospective conséquentielle, les résultats ont été comparés à ceux d'une approche prospective attributionnelle, permettant ainsi de justifier son utilisation.

Figure 3-1 : Résumé de la méthodologie utilisée pour combiner l'ACV avec un modèle économique

3.1.2 Résumé de l'évaluation des bénéfices environnementaux de la virtualisation

Les bénéfices environnementaux de la virtualisation sont évalués à travers une ACV préliminaire (« screening LCA ») comparative d'un service de vidéoconférences, hébergé dans un cas sur un serveur lame utilisant la virtualisation et dans l'autre sur un serveur lame sans virtualisation. Un serveur lame contient tous les équipements électroniques d'un serveur, mais arrangés de manière compacte pour minimiser l'espace nécessaire. Cette ACV est dite préliminaire, car ce sont principalement des données secondaires qui sont utilisées pour bâtir l'inventaire. Le système étudié est ainsi composé de quatre éléments principaux : les ordinateurs et les équipements d'accès à internet des clients utilisant le service de vidéoconférences, la consommation d'énergie des infrastructures permettant le transfert de l'information et le système de serveurs contenant le serveur lame hébergeant le service de vidéoconférences. Les données concernant l'utilisation du serveur lame sont néanmoins précises, car elles ont été obtenues à partir d'un modèle empirique construit à partir de données mesurées sur les équipements utilisés par le serveur lame.

Trois scénarios d'utilisation du serveur lame sont modélisés : dans le premier, le serveur lame hébergeant le service de vidéoconférences n'utilise pas la virtualisation. Dans le second scénario, la virtualisation est utilisée par le serveur lame. Dans le troisième, deux serveurs lames ayant recours à la virtualisation sont utilisés pour héberger le service de vidéoconférences, pour ainsi améliorer la fiabilité du service.

3.2 Combinaison de l'ACV avec un modèle économique

Cette section est divisée en quatre parties. La première décrit le fonctionnement du modèle économique ainsi que la méthode utilisée pour modéliser les scénarios d'implantation des centres de données. La deuxième s'intéresse aux scénarios ayant été simulés avec le modèle. La troisième partie décrit comment les résultats du modèle ont été incorporés dans l'ACV-C. Finalement, la dernière partie décrit la méthode utilisée pour réaliser l'ACV-A, nécessaire pour comparer les deux approches.

3.2.1 Modèle E3MC

Tel que décrit dans la section 1.3.2.3 il existe différents types de modèles pouvant être utilisés pour décrire le secteur énergétique nord-américain. Le modèle E3MC a été sélectionné, car il utilise le modèle d'équilibre partiel, Énergie 2020, décrivant avec précision le secteur énergétique nord-américain (tel que décrit dans la section 3.2.1.2) et permet de faire des analyses à long terme correspondant ainsi aux objectifs de l'étude. Les modèles d'équilibre général tel que GTAP n'ont pas été considérés, car ils donnent des résultats trop agrégés du secteur énergétique ne permettant pas une identification précise des technologies marginales utilisées.

3.2.1.1 Fonctionnement du modèle E3MC

Le modèle E3MC, utilisé par Environnement Canada pour évaluer les émissions futures de GES du Canada [97], est subdivisé en deux modèles, un premier énergétique, nommé « Énergie 2020 », et un second macroéconomique, nommé « informetrica » (TIM) [97]. Énergie 2020 simule le marché de l'énergie nord-américain, c'est-à-dire la consommation et la production d'énergie ainsi que l'ensemble des paramètres liés à ceux-ci (prix, changement de la consommation, émission de GES, investissement dans le secteur énergétique…). Les résultats obtenus à partir du modèle Énergie 2020 sont ensuite utilisés comme données pour le modèle TIM, qui projette l'économie

canadienne. Le modèle TIM contient 133 industries et saisit les différentes interactions entre celles-ci, pour projeter leurs réactions à des changements de prix, de revenu… tout en considérant des paramètres tels que l'équilibre fiscal du gouvernement, les flux monétaires, les taux d'intérêt et de change, les importations, les exportations… [97]. Ensuite, le modèle Énergie 2020 calcule l'évolution de la demande énergétique canadienne à partir de l'évolution économique canadienne prédite par le modèle TIM. Plusieurs itérations ont lieu entre les deux modèles jusqu'à ce qu'une convergence soit atteinte. Le processus est représenté dans la Figure 3-2.

Figure 3-2 : Modèle énergie-émissions-économie du Canada [97]

Dans l'étude de cas, la demande électrique du secteur des TIC a été augmentée dans le modèle Énergie 2020 pour évaluer les répercussions de l'installation de nouveaux centres de données au Canada sur le reste du système énergétique canadien. Les scénarios modélisés considèrent une augmentation de la demande électrique allant de 20MW à 500MW (les scénarios seront développés en détail dans la section 3.2.2). À noter qu'une demande de 500MW ne représente que 0,8% de la production actuelle d'électricité du Canada, ce qui selon l'équipe d'Environnement Canada reste marginale, signifiant que cette consommation supplémentaire n'influence pas suffisamment le prix de l'électricité pour bouleverser le reste de l'économie. Dès lors, la modélisation a pu s'effectuer sans le modèle TIM.

3.2.1.2 Modèle Énergie 2020

Le modèle Énergie 2020 est un modèle énergétique et économique d'équilibre partiel modélisant à la fois la demande, la production et les émission de GES de l'ensemble des sources d'énergie d'Amérique du Nord [119]. Dans le cadre de ce projet, les impacts environnementaux sont calculés à partir d'une méthodologie ACV, et les indicateurs environnementaux du modèle Énergie 2020 ne sont pas considérés.

Les caractéristiques majeures du modèle Énergie 2020 sont les suivantes [119, 120] :

- Multirégional : Le modèle Énergie 2020 couvre chaque région d'Amérique du Nord : les 50 états, le District de Columbia, les 10 provinces canadiennes et les 3 territoires canadiens.
- Demande désagrégée : La demande est modélisée de manière très précise (4 secteurs subdivisés en plus de 56 catégories), permettant la modélisation de la demande des centres de données.
- Théorie des choix qualitatifs : Contrairement à de nombreux modèles économiques, Énergie 2020 n'utilise pas de coefficients d'élasticité pour décrire les relations entre le prix et la consommation, mais des équations provenant de la théorie de choix qualitatifs (« qualitative choice theory »). Celles-ci décrivent l'influence de différents paramètres sur le choix de la population entre différentes alternatives. Ces paramètres peuvent être le prix, le goût, le style, la connaissance, etc. La combinaison d'une grande précision dans le module de demande et de l'utilisation de ce type de liens de causalité rend le modèle particulièrement pertinent pour l'analyse de politique de maitrise de la demande énergétique. Par ailleurs, cette combinaison permet aux utilisateurs du modèle d'identifier les différents comportements des consommateurs et permet de faire des analyses d'incertitudes plus détaillées en étudiant exactement quels liens de causalité modélisant le comportement des consommateurs sont incertains.
- Modèle reproduisant le passé : Contrairement à de nombreux modèles basés sur l'extrapolation du passé et ne permettant pas de modéliser des ruptures temporelles, le modèle Énergie 2020, grâce à la théorie des choix qualitatifs, peut prédire plus précisément le comportement humain face à certains choix ce qui permet à la fois une reproduction du passé, mais aussi des prévisions incluant des phénomènes de ruptures.

Le modèle Énergie 2020 est constitué de plusieurs modules interagissant entre eux. Les différents modules sont ceux de la demande en énergie, de la production en électricité, de la cogénération (production de chaleur et d'électricité), de la production de gaz et finalement de la production d'autres sources d'énergie (pétrole, charbon) [119]. Un schéma des modules et des interactions entre ceux-ci est présenté dans la Figure 3-3.

Figure 3-3 : Modules d'Énergie 2020 (adapté de [119])

Le module de demande d'énergie contient 4 secteurs (mais il est possible d'en ajouter si nécessaire) : résidentiel, commercial, industriel et transports. Chaque secteur est subdivisé en différentes catégories. Le secteur résidentiel contient les catégories : « familles uniques », « familles multiples » et « familles rurales ». Le secteur des transports contient les catégories : « transports de marchandises », « transports de passagers » et « transports autres que routiers ». Les secteurs commercial et industriel contiennent ensemble plus de 50 catégories [121]. Finalement, ces différentes catégories sont elles-mêmes subdivisées en différentes utilisations finales (chauffage de locaux, chauffage d'eau, éclairage…), donnant une grande précision au modèle.

Le module de production d'électricité peut déterminer les extensions de capacité du système de production, la production d'électricité, l'utilisation de carburant, les transmissions et distributions, les émissions et le prix de l'électricité [122]. Le modèle, pour prendre en

considération les différentes régions nord-américaines, utilise une structure en toile d'araignée, c'est-à-dire avec différents nœuds possédant chacun leur propre demande, reliés entre eux par des lignes de transmission ayant chacune une capacité, un coût et une efficacité de transmission [122]. Différents résultats sont obtenus pour chaque nœud grâce à une série d'opérations dont une représentation simplifiée est présente dans la Figure 3-4.

Figure 3-4 : Étapes de calcul du module "production d'électricité" (adapté de [122])

Bien que la majorité des utilisateurs nord-américains s'approvisionnent en électricité à partir du réseau électrique local, certains gros consommateurs utilisent des turbines à gaz et à diesel pour produire la chaleur et/ou l'électricité qu'ils consomment [119]. Dans Énergie 2020, toute l'énergie utilisée pour la production de chaleur est considérée comme potentiellement utilisée en cogénération et traitée dans le module cogénération (Figure 3-3)[119]. Pour calculer la part de marché que représente la cogénération, le coût de celle-ci (principalement calculé à partir du coût des installations, de leur maintenant et du carburant utilisé) est comparé au coût de l'électricité [119].

3.2.1.3 Hypothèses et données de référence du modèle E3MC

Pour comprendre les résultats du modèle E3MC, il est nécessaire de connaitre les différentes hypothèses et données utilisées pour soutenir et calibrer le modèle. Celles-ci portent à la fois sur les aspects économiques, démographiques, énergétiques et politiques [123]. Deux types de sources de données sont utilisés pour alimenter le modèle : les données historiques provenant principalement de Statistique Canada et les données prévisionnelles provenant de différentes enquêtes prédictives réalisées par le ministère des Finances [124, 125]. L'ensemble des hypothèses et sources de données décrites dans la suite de cette section proviennent du rapport « Tendance en matière d'émission au Canada » produit en octobre 2013 par Environnement Canada [123].

Les hypothèses économiques primordiales sont celles portant sur la croissance économique, l'indice des prix à la consommation et la productivité de la main-d'œuvre [123]. Les prévisions sur l'économie utilisent deux sources de données : la première, de 2013 à 2018, est le rapport réalisé par le ministère des Finances en 2013 [124], la seconde est le rapport produit par le ministère des Finances s'intitulant « Conséquence économique et financière du vieillissement de la population » [125]. Les 3 hypothèses sont présentées dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1: Hypothèses économiques [123]

Hypothèses	2011-2020
Produit intérieur brut (croissance économique)	2,2 %
Indice des prix à la consommation	1,9 %
Productivité de la main-d'œuvre	1,2 %

Les hypothèses démographiques concernent la croissance de la population, la formation des ménages et la croissance de la population active. Celles-ci sont capitales, car elles ont un impact considérable sur la consommation autant d'un point de vue économique, qu'énergétique [123]. Les 3 hypothèses sont présentées dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Hypothèses démographiques [123]

Hypothèses	2011-2020
Croissance de la population	1,1 %
Croissance de la formation des ménages	1,3 %
Croissance de la population active	0,8 %

Les hypothèses portant sur les aspects énergétiques du système sont très importantes, car elles déterminent la réponse du modèle face à une perturbation de la demande énergétique. Les hypothèses énergétiques touchent à la fois les prix des différents carburants, les investissements dans le domaine énergétique et les grands projets d'approvisionnement en électricité. Ces hypothèses influencent directement le développement de sources telles que l'hydroélectricité, l'exploitation de sable bitumineux ou l'installation de nouvelles centrales nucléaires. Les hypothèses énergétiques reposent sur les prévisions de l'Office national de l'énergie [123]. Le prix du pétrole et du gaz utilisés dans ce modèle sont présentés dans le Tableau 3-3. L'évolution des prix présentée dans le Tableau 3-3 n'est pas linéaire et est disponible plus en détail dans la figure A.2.1 et la figure A.2.2 du rapport « Tendance en matière d'émission au Canada ».

Tableau 3-3 : Hypothèses énergétiques [123]

Hypothèses	**2010-2020**
Prix du pétrole (WTI*)	80 → 102 $ US/baril
Prix du gaz	4 → 5,3 $/GJ
*WTI = West Texas Intermediate	

Les aspects politiques du modèle sont importants et représentent principalement les différentes mesures gouvernementales prises pour diminuer les émissions de polluants et particulièrement de GES. Les objectifs personnels des différentes provinces canadiennes ne sont pas pris en compte, seules les mesures concrètes déjà mises en place, sont considérées dans le modèle. Les mesures prises en considération par le modèle E3MC sont disponibles dans l'Annexe A .

3.2.2 Scénarios

L'objectif des scénarios modélisés dans le modèle E3MC est d'évaluer l'impact sur le réseau électrique canadien de l'implantation future de centres de données au Canada. Cette analyse a pour but l'identification des technologies marginales qui seraient mises à profit pour répondre à la demande électrique supplémentaire de nouveaux centres de données. La modélisation des scénarios dans le modèle E3MC a été réalisée en 3 étapes par l'équipe d'Environnement Canada.

La première étape pour modéliser la demande des centres de données est l'identification du secteur économique correspondant aux centres de données dans le modèle Énergie 2020. Ces secteurs sont classés à l'aide des codes du système de classification d'Amérique du Nord (North

American Industrial Classification System (NAICs) codes). Ainsi, le code du secteur économique le plus proche des centres de données est le 5182, correspondant aux « Data Processing, Hosting, and Related Services ». Ce dernier est situé dans le secteur de « l'information et de la culture » du modèle Énergie 2020.

La deuxième étape est l'identification des variables devant être modifiées pour simuler la perturbation des scénarios. Dans ce projet, la perturbation est une augmentation de la consommation en électricité du secteur 5182 ce qui peut être modélisé en augmentant la variable « capital energy requirement » (CERMS), qui est positivement corrélée avec la demande énergétique des centres de données (le modèle n'ayant pas été obtenu la corrélation exacte nous est inconnue). Seule la variable CERMS est modifiée de manière exogène, le reste des paramètres demeurant inchangé.

Finalement, la troisième étape est la modélisation des différents scénarios en modifiant de manière exogène la valeur du CERSM. La variable CERSM est corrélée avec la valeur de la demande énergétique des centres de données, mais le modèle modélise de manière endogène les valeurs de demande énergétique des différents secteurs. C'est pourquoi il a été nécessaire de modifier de manière itérative la valeur du CERSM jusqu'à ce que la valeur de demande obtenue, après modélisation par le modèle, soit égale à celle voulue dans le scénario. Six scénarios ont été modélisés dans le modèle E3MC, le premier est le scénario de référence (scénario réf) pour lequel la valeur du CERSM n'a pas été modifiée et les cinq suivants (scénario 1-5) sont les scénarios pour lesquels la demande énergétique des centres de données a été modifiée. L'implantation de centres de données est modélisée de façon progressive dans le temps, ainsi les scénarios se déroulent sur 16 ans de 2015 à 2030, période pendant laquelle la capacité de ceux-ci croît plus ou moins rapidement en fonction du scénario. Le scénario 1 représente une situation où une entreprise moyenne implante un centre de données au Canada (25 MW) et conserve la même capacité pendant 16 ans. Le scénario 5, au contraire, représente une situation où le Canada devient plus attractif et où plusieurs entreprises viennent installer leurs centres de données au Canada (expliquant la croissance importante). Finalement, les scénarios 2, 3 et 4 sont des situations intermédiaires. Ces scénarios ont été validés par les experts du laboratoire Synchromedia de l'ETS. Les scénarios sont représentés dans la Figure 3-5 (à l'exception du scénario de référence pour lequel la valeur est toujours égale à zéro) et leurs valeurs chiffrées sont disponibles dans l'Annexe B.

Figure 3-5 : Scénarios d'implantation de centres de données

Trois provinces canadiennes ont été choisies pour abriter les centres de données : l'Alberta, l'Ontario et le Québec. Ces provinces ont été sélectionnées, car elles représentent les trois provinces avec la plus grosse production d'électricité et les plus densément peuplées du Canada (excepté la Colombie-Britannique ayant une population et une production d'électricité légèrement supérieures à celles de l'Alberta), permettant ainsi d'installer les centres de données à proximité des utilisateurs. Le nombre de simulations pouvant être effectuées étant limité, les centres de données ont été implantés dans ces trois provinces simultanément avec une répartition Ontario/Alberta/Québec de 0,5/0,25/0,25. Le processus itératif d'augmentation de la demande (en modifiant la valeur du CERSM), décrit ci-dessus, a ainsi dû être réalisé pour chaque province créant une légère différence entre la proportion choisie et celle modélisée. Les répartitions obtenues pour chaque scénario et pour chaque année sont présentées dans l'Annexe I.

3.2.3 Interprétation des résultats

3.2.3.1 Évaluation des technologies marginales

Le modèle E3MC fournit la production énergétique par année, par technologie, par région et par scénario. En soustrayant la production de chaque scénario à celle du scénario de référence, il est possible d'obtenir les productions marginales de chaque technologie de production d'énergie, c'est-à-dire celles uniquement utilisées pour alimenter les centres de données. Cette approche permet de calculer la production électrique marginale à partir de l'équation (1).

$$Prod\ CD_{t_s} = \left(Prod_{t_s} - Prod_{t_{ref}}\right) \tag{1}$$

Où $Prod\ CD_{t_s}$ est la production énergétique marginale pour les centres de données à partir de la technologie « t » dans le scénario « s », $Prod_{t_s}$ est la production énergétique totale à partir de la technologie « t » pour le scénario « s » et $Prod_{t_{ref}}$ est la production énergétique totale à partir de la technologie « t » pour le scénario de référence.

Le « grid mix » marginal est ensuite calculé en faisant le ratio de la production énergétique marginale à partir de la technologie « t » avec la production énergétique marginale totale, tel que présenté dans l'équation (2).

$$r_t = \frac{Prod\ CD_t}{\sum_{i=1}^{n} Prod\ CD_i} \tag{2}$$

Où $Prod\ CD_t$ est la production énergétique marginale pour les centres de données à partir de la technologie « t », où $Prod\ CD_i$ est la production énergétique marginale pour les centres de données à partir de la technologie « i », « r_t » le ratio de la technologie « t » dans le grid mix marginal alimentant les centres de données et « n » le nombre total de technologies utilisées pour produire 1'électricité.

Les technologies marginales principales à court et moyen terme sont ensuite identifiées à partir du grid mix marginal. Une technologie marginale est considérée principale lorsqu'elle participe à plus de 5% du grid mix marginal. Les technologies marginales répondant à la demande énergétique des nouveaux centres de données pendant les 5 premières années (2005-2015) ont été considérées comme des technologies marginales à court terme. Les technologies marginales

répondant à la demande des centres de données après les 5 premières années (2020-2030) ont été considérées comme des technologies marginales à long terme.

3.2.3.2 Évaluation de l'origine de l'électricité

Des lignes électriques de grande capacité relient les réseaux des États-Unis et du Canada, créant un marché d'importation et d'exportation très important. La carte, présentée dans la Figure 3-6, présente un schéma des échanges entre le Canada et les États-Unis en 2011.

Figure 3-6 : Échanges électriques entre le Canada et les États-Unis (adapté de [126])

Pour répondre à la demande énergétique des nouveaux centres de données, le Canada peut utiliser 4 méthodes différentes :

- Augmenter sa production;
- Diminuer la consommation d'autres secteurs économiques;
- Diminuer ses exportations vers les États-Unis; ou
- Augmenter ses importations depuis les États-Unis.

Dans la suite de cette étude, lorsque les États-Unis doivent augmenter leur production suite à l'implantation de nouveaux centres de données au Canada, il est fait référence à la « production compensatoire marginale des États-Unis ».

L'étude de l'origine géographique de l'électricité marginale, produite en réponse à l'implantation des centres de données, est réalisée en deux étapes. Premièrement, la production marginale aux États-Unis et au Canada est comparée en utilisant l'équation (3), similaire à l'équation (1), mais différenciant les provinces et non pas les technologies.

$$Prod\ CD_{p_s} = \left(Prod_{p_s} - Prod_{p_{ref}}\right) \quad (3)$$

Où $Prod\ CD_{p_s}$ est la production énergétique marginale pour les centres de données dans la province « p » dans le scénario « s », $Prod_{p_s}$ est la production énergétique totale dans la province « p » dans le scénario « s » et $Prod_{p_{ref}}$ est la production énergétique totale dans la province « p » dans le scénario de référence.

Deuxièmement, les méthodes utilisées (parmi les 4 possibilités citées ci-dessus) par les trois provinces canadiennes sélectionnées pour abriter les centres de données, sont étudiées et comparées. Le modèle E2020 fournit les importations et exportations de chaque province. Pour obtenir les changements marginaux des exportations et importations de chaque scénario, il faut soustraire les exportations (ou importations) de chaque scénario à celles du scénario de référence. Finalement, la différence entre la demande des nouveaux centres de données et la somme de la production marginale, des exportations marginales et des importations marginales donne la diminution marginale dans d'autres secteurs économiques canadiens.

3.2.3.3 Évaluation des impacts environnementaux

Les processus de production d'électricité sont identifiés dans la base de données ecoinvent V2.2. La base de données ecoinvent a été sélectionnée, car elle est exhaustive (plus de 4000 procédés et produits), désagrégée, transparente et de haute qualité (car vérifiée par des experts dans le domaine). Bien qu'elle décrive un contexte européen, la majorité des processus et produits ont été adaptés au contexte nord-américain par le CIRAIG. Seuls 8 processus ecoinvent de production d'électricité ont été utilisés, car les autres ne participent pas de manière significative à la production

canadienne ou américaine (ex. le solaire). Les différentes technologies identifiées sont présentées dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Processus sélectionnés d'ecoinvent

Sources	**Procédés ecoinvent**
Biomasse	Electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation energy/CH U AmN CIRAIG*
Charbon	Electricity, hard coal, at power plant/NPCC U AmN CIRAIG*
Diesel	Electricity, at cogen 200kWe diesel SCR, allocation exergy/CH U AmN CIRAIG*
Pétrole lourd	Heavy fuel oil, burned in power plant/RER U AmN CIRAIG*
Hydro	Electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/RER U AmN CIRAIG*
Gaz naturel	Electricity, natural gas, at power plant/NPCC U AmN CIRAIG*
Nucléaire	Electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor/US U AmN CIRAIG*
Éolien	Electricity, at wind power plant/RER U AmN CIRAIG*
*AmN CIRAIG signifie que les processus ecoinvent ont été modifiés par le CIRAIG pour correspondre à un contexte nord-américain, principalement dans la provenance d'électricité utilisée pour la production des infrastructures.	

La méthode IMPACT 2002+ version 2.15 a été sélectionnée pour calculer les impacts environnementaux du système, car c'est une méthode d'impacts exhaustive, contenant de nombreuses aires de protection. Les 15 catégories problèmes et 4 catégories dommages de cette méthode d'impact ainsi que leur unité sont présentées dans le Tableau 3-5.

Tableau 3-5 : Catégories d'impact d'IMPACT 2002+ [45]

Catégories problèmes	**Unités**	**Catégories dommages**	**Unités**
Cancérigène	kg C_2H_3Cl eq	Santé Humaine	DALY
Non-Cancérigène	kg C_2H_3Cl eq		
Effets respiratoires	kg PM2.5 eq		
Radiation Ionisante	Bq C-14 eq		
Déplétion de la couche ozone	kg CFC-11 eq		
Oxydation photochimique	kg C_2H_4 eq		
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	Qualité des écosystèmes	PDF*m2*yr
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil		
Acidification/eutrophisation Terrestre	kg SO_2 eq		
Occupation des terres	m^2org.arable		
Acidification aquatique	kg SO_2 eq		
Eutrophisation aquatique	kg PO_4 P-lim		
Réchauffement global	kg CO_2 eq	Changement Climatique	kg CO2 eq
Énergie non renouvelable	MJ primary	Ressources	MJ primary
Extraction minérale	MJ surplus		

Les impacts liés à la production d'un kWh sont ensuite calculés pour chacune des technologies de production d'énergie précédemment identifiées. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le Tableau 3-6.

Tableau 3-6 : Impacts par source énergétique pour 1 kWh

Sources	**Changements Climatiques (kg CO2 eq/kWh)**	**Santé Humaine (DALY)**	**Qualité des Écosystèmes (PDF*m^2*année)**	**Ressources (MJ)**
Biomasse	1,96E-02	4,30E-07	1,60E-01	2,98E-01
Charbon	1,12E+00	5,93E-07	1,49E-01	1,09E+01
Diesel	7,23E-01	2,03E-07	5,08E-02	1,07E+01
Pétrole lourd	3,26E-01	2,33E-07	3,57E-02	4,70E+00
Hydro	7,95E-03	5,61E-09	1,08E-03	6,06E-02
Gaz naturel	6,32E-01	1,19E-06	1,37E-02	1,24E+01
Nucléaire	1,31E-02	5,15E-08	3,18E-02	1,51E+01
Éolien	1,16E-02	1,47E-08	5,97E-03	1,81E-01

Le « grid mix » électrique approvisionnant les centres de données, calculé à partir de la méthode présentée à la section 3.2.3.1, permet de calculer les impacts environnementaux potentiels

grâce à l'ACV des filières électriques impliquées (Tableau 3-6). Le calcul de l'impact d'un kWh est exécuté avec l'équation (4).

$$IMPACT_{1kWh} = \sum_{t=1}^{n} IMPACT_{1kWh_t} \times r_t \quad (4)$$

Ou « $IMPACT_{1kWh_t}$ » représente l'impact pour produire 1 kWh avec la technologie « t », « r_t » le ratio de la technologie « t » dans le grid mix alimentant les centres de données et « n » le nombre total de technologies utilisées pour produire l'électricité.

Les impacts annuels liés à chaque scénario sont calculés en sommant les impacts potentiels de chaque filière électrique utilisée pendant cette année pour alimenter les centres de données. Les impacts globaux sont ensuite calculés en sommant les impacts annuels sur 16 ans (durée des scénarios). Ces calculs sont respectivement réalisés avec l'équation (5) et l'équation (6).

$$IMPACT_{Annuel} = \sum_{t=1}^{n} IMPACT_{1kWh_t} \times P_t \quad (5)$$

Où « P_t » est la production électrique annuelle (en kWh) pour alimenter les centres de données.

$$IMPACT_{Globaux} = \sum_{a=1}^{16} IMPACT_{Annuel_a} \quad (6)$$

3.2.3.4 Évaluation de l'influence de l'ampleur de la perturbation

Pour évaluer l'influence de la taille de la demande énergétique des centres de données implantés sur les impacts environnementaux, chaque scénario a été défini avec une évolution de la consommation des centres de données différente. La consommation totale en GWh de chaque scénario est présentée dans le Tableau 3-7.

Tableau 3-7 : Consommation des centres de données sur 16 ans

	Consommation (GWh)
Scénario 1	3500
Scénario 2	4818
Scénario 3	7700
Scénario 4	13607
Scénario 5	35026

L'analyse de l'influence de l'ampleur de la perturbation est réalisée en trois étapes évaluant l'influence sur les exportations, ensuite sur le grid mix et finalement sur les impacts par kWh.

- L'influence de l'ampleur de la perturbation sur les exportations est évaluée en calculant le ratio, pour chaque scénario, de la production marginale canadienne pour les centres de données sur 16 ans avec la production marginale totale (canadienne et américaine) pour les centres de données sur 16 ans. Un graphique traçant la relation entre ce ratio et la consommation totale des centres de données de chaque scénario (présentées dans le Tableau 3-7) est ensuite réalisé.
- L'influence de l'ampleur de la perturbation sur le grid mix marginal est évaluée en calculant le grid mix marginal total sur 16 ans de chaque scénario, permettant ainsi de comparer les grids mix marginaux des différents scénarios. Chaque scénario ayant une perturbation différente (Tableau 3-7), cette comparaison permet de comparer l'influence de la perturbation sur le grid mix marginal. Le grid mix marginal sur 16 ans est évalué en sommant la production de chaque technologie sur 16 ans et en utilisant ensuite l'équation (2).
- L'influence de l'ampleur de la perturbation sur les impacts environnementaux par kWh marginal est évaluée en calculant les impacts marginaux totaux de chaque scénario sur 16 ans et en divisant les valeurs ainsi obtenues par la production marginale totale de chaque scénario. Le scénario le moins polluant par unité d'énergie produite marginalement peut alors être identifié.

3.2.4 Approche prospective attributionnelle

Cette section présente la méthodologie prospective attributionnelle utilisée pour faire une comparaison entre les résultats obtenus à partir d'une approche prospective attributionnelle et ceux

obtenus avec une approche prospective conséquentielle. Le grid mix utilisé pour l'approche prospective attributionnelle a été obtenu en sommant les grids mix sur 16 ans du scénario de référence pour l'Ontario, l'Alberta et le Québec avec un ratio 0,5/0,25/0,25 pour tenir compte de la répartition des centres de données (déterminée dans la section 3.2.2). L'équation (7) représente le calcul pour obtenir le grid mix prospectif attributionnel.

$$r_{t_{Attributionnel}} = r_{t_{Ontario}} \times 0{,}5 + r_{t_{Alberta}} \times 0{,}25 + r_{t_{Québec}} \times 0{,}25 \tag{7}$$

$r_{t_{Attributionnel}}$ représente le ratio de la technologie « t » dans le grid mix prospectif attributionnel, r_{t_p} représente le ratio de la technologie « t » dans le grid mix de la province « p » pour le scénario de référence.

Les impacts par kWh, pour la méthode prospective attributionnelle, sont ensuite calculés à partir de l'équation (8).

$$\begin{aligned} IMPACT_{kWh} = {} & IMAPCT_{kWh_{Ontario}} \times 0{,}5 + IMAPCT_{kWh_{Alberta}} \times 0{,}25 \\ & + IMAPCT_{kWh_{Québec}} \times 0{,}25 \end{aligned} \tag{8}$$

Où $IMPACT_{kWh}$représente les impacts par kWh produit pour les centres de données, $IMAPCT_{kWh_p}$ sont les impacts par kWh de la province « p ».

Les $IMPACT_{kWh_p}$de la province « p » sont calculés en divisant les $IMPACT_{Globaux}$ de la province « p » (calculés à partir des équations (5) et (6)), par la production totale sur 16 ans de la province « p ».

3.3 Évaluation des bénéfices environnementaux de la virtualisation

L'ACV de la virtualisation est basée sur une étude de cas du laboratoire Synchromedia de l'ETS. Ainsi de nombreux paramètres techniques ont été obtenus par des mesures en laboratoire et la majorité des hypothèses de scénarios sont basées sur l'étude de cas réalisée par le laboratoire Synchromedia de l'ETS.

3.3.1 Définition de l'objectif et du système

Objectifs

Le premier objectif de cette ACV est l'évaluation des bénéfices environnementaux apportés par l'utilisation de la virtualisation par des serveurs lames supportant un service de vidéoconférences similaire à des vidéoconférences Skype. Cette ACV est dite préliminaire, car ce sont principalement des données secondaires qui sont utilisées. Cette ACV permet d'identifier les points chauds et d'observer certaines tendances, mais ne peut pas être utilisée à des fins commerciales. La méthodologie ACV est utilisée, car elle permet une analyse multicritère en prenant en compte l'entièreté du cycle de vie du produit évitant ainsi tout déplacement d'impacts.

Le second objectif de cette ACV est d'étudier l'influence de la précision temporelle du grid mix sur les résultats finaux. Cette comparaison est réalisée en comparant les résultats obtenus à partir d'un grid mix horaire et d'un grid mix moyen annuel.

Le troisième objectif de cette ACV est la comparaison entre une approche attributionnelle et une approche conséquentielle prospective. Cette comparaison est faite en utilisant les résultats obtenus en combinant l'ACV au modèle économique E3MC à partir de la méthodologie présentée dans la section 3.2.

Fonction

La fonction du service de vidéoconférences est la communication audio et visuelle entre deux interlocuteurs.

Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle a été choisie en coopération avec l'équipe du laboratoire Synchromedia de l'ETS pour pouvoir remplir les objectifs précédemment décrits

L'unité fonctionnelle choisie pour cette étude est : « fournir un service de vidéoconférences avec une résolution de 640 x 480 et 30fps (frame per second) pour 4 millions de clients, en considérant 5 appels de 60 minutes par jours par client, pendant 1 an ».

Il est considéré que les clients communiquent uniquement avec d'autres clients utilisant le même service, signifiant que si 4 millions de clients sont en vidéoconférence il y a 2 millions de vidéoconférences.

Scénarios

Les vidéoconférences sont réalisées grâce à un IP multimedia system (IMS). Celui-ci fonctionne en trois étapes :

- l'utilisateur se connecte au serveur lame;
- l'IMS connecte ensemble les deux utilisateurs; et
- la vidéoconférence peut avoir lieu.

Trois scénarios ont été utilisés pour évaluer les gains environnementaux apportés par la virtualisation :

- Scénario 1 : le premier scénario est utilisé comme référence. Dans celui-ci, l'IMS est directement installé sur un serveur lame hébergeant le service de vidéoconférences sans utiliser la virtualisation.
- Scénario 2 : dans le second scénario, l'IMS est installé sur une VM créée sur un serveur lame utilisant la virtualisation.
- Scénario 3 : Dans le troisième scénario, deux serveurs lames sont localisés à deux endroits différents et l'IMS est installé sur une VM créée sur chaque serveur lame. Ce scénario correspond à une situation dans laquelle le client nécessite un service où la connexion doit impérativement être conservée. Le dédoublement de serveurs lames permet ainsi de conserver la connexion si un des serveurs lames cesse de fonctionner (ex. coupure de courant, panne informatique…) en migrant la VM hébergeant l'IMS vers le second serveur lame. La charge de travail générée par la gestion des vidéoconférences est répartie équitablement entre les deux serveurs lames.

Le système de produits

Les frontières du système englobent l'équipement nécessaire à la réalisation de la vidéoconférence, c'est-à-dire les ordinateurs portables, les équipements d'accès à internet, l'infrastructure supportant internet et le système de serveurs contenant le serveur lame hébergeant les vidéoconférences (la consommation du serveur lame est considérée égale à celle de son CPU). Le système de serveur est l'ensemble des équipements utilisés en parallèle avec le serveur lame.

Une description précise de ces équipements est présentée dans la section 3.3.1.3. Les frontières du système sont représentées dans la Figure 3-7.

Figure 3-7 : Frontières du système[1]

Cette étude ACV est divisée en deux parties. La première se concentre uniquement sur le système de serveurs et sur son cycle de vie, c'est-à-dire sur sa production, son utilisation et sa fin de vie, pour ainsi permettre une analyse précise des bénéfices de la virtualisation sur les impacts du système de serveurs lors de son utilisation, la seconde étudie les impacts environnementaux de l'ensemble du système nécessaire pour la mise en place d'un service de vidéoconférence. Cette distinction a pour but de mettre en perspective la marge de manœuvre de l'opérateur du système de serveurs et de l'amélioration de son profil environnemental.

[1] Images de http://pixabay.com/fr/poste-de-travail-ordinateur-bureau-147953/, http://pixabay.com/fr/routeur-r%C3%A9seau-sans-fil-internet-29021/ , http://pixabay.com/fr/navigateur-internet-www-global-98386/ et http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Server-multiple.svg.

Paramètres clés

Les différents paramètres clés, leur valeur ainsi que la source de celle-ci sont présentés dans le Tableau 3-8. Les données ayant pour source « Jugement d'experts » sont basées sur des avis professionnels provenant d'experts du laboratoire Synchromedia de l'ETS et du CIRAIG.

Tableau 3-8 : Paramètres clés

Nom	**Valeur**	**Source**
Durée de vie de l'ordinateur portable	4 années (pour une utilisation de 8 heures/jour, 5 jours/semaine, 50 semaines/année)	Jugement d'experts
Vitesse de transfert des données (ascendante, « upload »)	500 kbps	Skype [127]
Vitesse de transfert des données (descendante, « download »)	500 kbps	Skype [127]
Charge de travail moyenne* des serveurs lames	70%	Jugement d'experts
Consommation d'un ordinateur pendant une vidéoconférence	30W	ecoinvent
Durée de vie du système de serveurs	5 années	Jugement d'experts
Quantité d'énergie nécessaire pour transférer l'information	0,1567 Wh/MB	Adapté de Coroama et al. [128]
Durée de vie des équipements d'accès à internet	2 ans (pour une utilisation de 24 heures/jour, 7 jours/semaines, 52 semaines/années)	Jugement d'experts
* La charge de travail moyenne représente la proportion moyenne de la capacité maximum des serveurs lames utilisés pendant la journée		

Les flux de références

Les flux de référence sont présentés ci-dessous :

- ordinateur portable;
- consommation électrique de l'ordinateur portable;
- système de connexion à internet;
- système de serveurs;
- consommation électrique du système de serveurs; et
- consommation électrique pour la transmission de données (internet).

Les règles d'allocation à utiliser

La méthode d'allocation est décrite dans la section 3.3.1.2, car elle est fortement liée à la phase d'inventaire.

3.3.1.1 Consommation d'électricité

La consommation d'électricité étant une source importante d'impacts sur l'environnement par le système de serveurs et les appareils électroniques, il est nécessaire de définir avec précision le grid mix électrique. Différents grid mix sont utilisés pour répondre aux trois objectifs principaux de cette ACV (section 0).

3.3.1.1.1 Grid mix pour répondre au premier objectif de cette ACV

La modélisation du système pour évaluer les bénéfices de la virtualisation est réalisée en utilisant le grid mix horaire de l'Ontario. Effectivement, cette étude considère que le système de serveurs et l'ensemble des utilisateurs sont localisés en Ontario. Ce choix est dû au fait que la compagnie d'électricité en Ontario IESO fournit des données détaillées de sa production d'électricité. Le grid horaire considère la variation temporelle de l'utilisation des sources d'énergie et permet une évaluation de l'impact de la production d'un kWh en fonction de l'heure de la journée. Le grid mix a été déterminé par Maurice et al. [129] à partir des données fournies par IESO pour l'année 2012 [130]. Les impacts environnementaux (orientés dommages) horaires de ce grid mix sont ensuite calculés à partir de la méthode IMPACT2002+ et les résultats sont présentés dans la Figure 3-8, Figure 3-9, Figure 3-10 et Figure 3-11.

Figure 3-8 : Les impacts des changements climatiques du grid mix ontarien

Figure 3-9 : Les impacts sur la santé humaine du grid mix ontarien

Figure 3-10 : Les impacts sur la qualité des écosystèmes du grid mix ontarien

Figure 3-11 : Les impacts sur les ressources du grid mix ontarien

3.3.1.1.2 Grid mix pour répondre au deuxième objectif de cette ACV

Pour remplir le deuxième objectif la même méthodologie que celle appliquée pour atteindre le premier objectif est utilisée (section 3.3.1.1.1) mais avec la moyenne annuelle du grid mix. Les impacts environnementaux (orientés dommages) de ce grid mix annuel sont calculés à partir de la méthode IMPACT2002+ et les résultats sont présentés dans la Figure 3-8, Figure 3-9, Figure 3-10 et Figure 3-11.

3.3.1.1.3 Grid mix pour répondre au troisième objectif de cette ACV

Pour remplir le troisième objectif, le grid mix obtenu à partir de la modélisation conséquentielle et prospective de l'implantation de centre de données présentées dans la section 3.2, est utilisé. Celui-ci contient les technologies marginales répondant à la demande additionnelle en énergie des centres de données. L'utilisation de ces résultats indique que l'étude est abordée de manière prospective, signifiant que le service de vidéoconférences est considéré comme un service prochainement proposé, mais pas encore disponible. Par ailleurs, cette étude considère une implantation de centre de données à la fois en Alberta, en Ontario et au Québec, ainsi dans cette seconde partie de l'étude les utilisateurs et le système de serveurs sont dispersés dans ces trois provinces. Le modèle utilisé (Énergie 2020) pour modéliser le grid mix conséquentiel prospectif et attributionnel prospectif n'ayant une précision horaire, des grids mix moyens annuels ont été utilisés. Ainsi les résultats de cette partie ne peuvent pas être directement comparés à ceux utilisant un grid mix horaire.

3.3.1.2 Phase d'utilisation

3.3.1.2.1 Système de serveur

L'unité fonctionnelle indique que 10.000.000 de vidéoconférences devront être gérées chaque jour (4 millions de clients communiquant entre eux, avec 5 vidéoconférences par client par jour). La première étape de l'inventaire de la phase d'utilisation du système de serveurs est la création d'un scénario définissant le profil d'utilisation du système de serveurs, c'est-à-dire le nombre de vidéoconférences à chaque heure de la journée. Effectivement, le grid mix, tel que défini précédemment, varie dans la journée. Il est donc nécessaire de prendre en considération cette variabilité dans l'utilisation du système de serveurs. Pour simplifier les calculs, il a été considéré que les vidéoconférences ont lieu de manière uniforme pendant toute l'heure. La Figure 3-12

présente le profil utilisé dans cette étude. Celui-ci a été réalisé avec la coopération des experts du laboratoire Synchromedia de l'ETS et considère un pic d'utilisation entre 17h et 18h (heure correspondant à la période où les utilisateurs rentrent à la maison et peuvent utiliser le service de vidéoconférences) et une très faible utilisation entre 2h et 7h du matin. La distribution journalière est imposée par l'étude de cas réalisée en coopération avec l'équipe du laboratoire Synchromedia de l'ETS.

Figure 3-12 : Profil de création de vidéoconférences

La seconde étape consiste à déterminer la consommation énergétique de l'équipement nécessaire pour réaliser les vidéoconférences. La consommation du système de serveur est considérée équivalente à celle des serveurs lames. Chaque serveur lame contient un CPU composé de 12 cœurs. Un cœur est un ensemble logique de base permettant la réalisation d'instructions simples à haute fréquence [131]. La puissance électrique requise pour un serveur lame en fonction de la charge de travail qui lui est demandé est présentée dans l'équation (9) provenant de l'étude de Moghaddam et al. [132].

$$P = P_0 + m \times CT \tag{9}$$

Où « P » représente la puissance (en Watt) requise par le serveur lame, « P_0 » représente la puissance minimale du serveur lame, c'est-à-dire la puissance lorsque le serveur lame est allumé sans qu'aucune tâche ne lui soit demandée, « m » est la différence entre la puissance maximum consommée par le serveur lame (« P_{max} ») et « P_0 », et « CT » représente la charge de travail.

Pour connaitre la charge de travail (« CT ») en fonction du nombre de vidéoconférences, des tests ont été faits au laboratoire Synchromedia de l'ETS par Saida Khazri supervisé par Kim Khoa Nguyen, où le nombre de cœurs nécessaires pour gérer une quantité définie de vidéoconférences a été mesuré. Deux mesures ont été nécessaires, car la quantité de vidéoconférences pouvant être gérée dans le scénario 1 est légèrement supérieure à celle des scénarios 2 et 3. Effectivement, la gestion des VM par l'hyperviseur représente une charge de travail supplémentaire diminuant la capacité disponible du serveur lame pour les vidéoconférences. L'ensemble des paramètres d'un serveur lame et des mesures effectuées sont présentés dans le Tableau 3-9 (fournis par les experts du laboratoire Synchromedia de l'ETS).

Tableau 3-9 : Paramètres d'utilisation d'un serveur lame

Nom	**Notation**	**Quantité**	**Unité**
Consommation minimale d'un serveur lame	P_0	60	Watt
Consommation maximale d'un serveur lame	P_{max}	240	Watt
Nombre d'appels sans la virtualisation	$NB1_{VC}$	405000	Appels
Quantité de cœurs nécessaires sans virtualisation	L1	0,93	Unité
Nombre d'appels avec la virtualisation	$NB2_{VC}$	360000	Appels
Quantité de cœurs nécessaires avec virtualisation	L2	0,97	Unité

Pour exprimer la consommation d'un serveur lame en fonction du nombre de vidéoconférences, il est nécessaire d'insérer les paramètres du Tableau 3-9 dans l'équation (9), ayant pour résultat l'équation (10). La charge de travail est définie comme le ratio entre le nombre de vidéoconférences hébergées par le serveur et le nombre de vidéoconférences total pouvant être hébergées par le serveur. Le nombre de vidéoconférences total pouvant être hébergées par le serveur est obtenu en faisant le ratio entre le paramètre « Nombre d'appels avec/sans la virtualisation » du Tableau 3-9 et la quantité de CPU nécessaire pour héberger ce nombre appels. Cette quantité de CPU est obtenue en divisant par 12 le paramètre « Quantité de cœurs nécessaire avec/sans la virtualisation » du Tableau 3-9, puisqu'un CPU contient 12 cœurs.

$$P = P_0 + (P_{max} - P_0) \times \frac{nb_{vc}}{\frac{NB_{k_{VC}}}{L_k} \times 12} \qquad (10)$$

Où P représente la puissance (en Watt) requise par le serveur lame lorsqu'elle gère uniquement des vidéoconférences, k indique si la virtualisation est utilisée ($k = 2$ si la virtualisation est utilisée et $k = 1$ si elle n'est pas utilisée) et nb_{vc} est le nombre de vidéoconférences à gérer.

Les scénarios 2 et 3 utilisent la virtualisation permettant de partager un serveur lame entre différentes tâches. Ainsi si seule une partie de la capacité du serveur lame est utilisée pour les vidéoconférences le reste de celui-ci peut être utilisé pour d'autres tâches. Il est dès lors nécessaire de répartir la consommation du serveur lame entre ses différentes tâches. Pour ce faire, un facteur d'allocation doit être ajouté dans l'équation (10) devant le terme « P_0 ». Le second terme de l'équation $((P_{max} - P_0) \times \frac{nb_{vc}}{\frac{NB_{kVC}}{L_k} \times 12})$ est déjà directement proportionnel au nombre de vidéoconférences et indépendant des autres tâches. En introduisant ce facteur d'allocation, on obtient l'équation (11).

$$P_{VC} = FAL_i \times P_0 + (P_{max} - P_0) \times \frac{nb_{vc}}{\frac{NB_{kVC}}{L_k} \times 12} \qquad (11)$$

Où « P_{VC} » est la puissance requise par le serveur lame pour les vidéoconférences et FAL_i est le facteur d'allocation du scénario i.

En moyenne, il a été considéré que les serveurs lames sont utilisés à tout moment de la journée à 70% (Tableau 3-9, jugement d'experts) de leur capacité maximale, ce qui signifie dans notre cas que, grâce à la virtualisation, si 30% du serveur lame est utilisé pour gérer les vidéoconférences, 40% sont consacrés à d'autres tâches. Le facteur d'allocation, FAL, calcule la quantité exacte de serveurs lames nécessaires pour gérer les vidéoconférences et permet ainsi d'imputer équitablement une partie de la consommation de base P_0 entre les différentes tâches effectuées par un serveur lame.

Dans cette étude, la virtualisation permet de partager la capacité d'un serveur lame, mais pas celle d'un cœur, ainsi si la gestion des vidéoconférences nécessite 25% de la capacité d'un cœur il est tout de même nécessaire de lui allouer un cœur entier même si ce dernier ne travaille pas au maximum de sa capacité. Dès lors, le facteur d'allocation pour un serveur lame peut être défini comme le ratio entre le nombre de cœurs utilisés pour les vidéoconférences et le nombre total de cœurs utilisés dans le serveur lame. Il est possible que plusieurs serveurs lames soient nécessaires pour la gestion des vidéoconférences. Dans une telle situation, le facteur d'allocation total est égal à la somme des facteurs d'allocation de chaque serveur lame utilisé pour la gestion des vidéoconférences. Différentes situations se distinguent en fonction de la capacité nécessaire, telles que présentées dans le Tableau 3-10.

Tableau 3-10 : Calcul du facteur d'allocation des serveurs lames pour la phase d'utilisation

	Scénario 1	**Scénario 2**	**Scénario 3**
Formule générale	$FAL = \sum_{k=1}^{n} \frac{c_{VC_k}}{c_{T_k}}$ où n *est le nombre de lame utilisé*		
Notation utilisée	$c_{VC_k} = nombre\ de\ coeurs\ utilisés\ pour\ les\ vidéoconférences\ dans\ la\ lame\ k$ $c_{T_k} = nombre\ de\ coeurs\ utilisés\ au\ total\ dans\ la\ lame\ k$ $c_{VC_T} = \sum_{k=1}^{n} c_{VC_k} = nombre\ de\ coeurs\ total\ utilisés\ pour\ les\ vidéoconférences$		
Situation 1	la capacité nécessaire pour traiter les vidéoconférences est inférieure à 70% d'un CPU.		
c_T	$c_{T_1} = c_{VC_1}$	$c_{T_1} = 0{,}7 \times 12 = 8{,}4$	$c_{T_{1/2}} = 0{,}7 \times 12 = 8{,}4$
Explication	La virtualisation n'est pas utilisée, le CPU ne peut donc pas être partagé.	La virtualisation permet de partager la capacité d'un serveur lame et cette dernière est utilisée en moyenne à 70% de sa capacité. Un serveur lame est composé de 12 cœurs et 70% de ceux-ci sont utilisés, il y a donc 8,4 cœurs qui sont utilisés.	Deux serveurs lames sont utilisés avec une répartition égale de la charge de travail et une utilisation moyenne similaire pour chaque serveur (de 70%).
FAL	$FAL = 1$	$FAL = \frac{c_{VC_T}}{8{,}4}$	$FAL = \frac{c_{VC_1}}{8{,}4} + \frac{c_{VC_2}}{8{,}4} = \frac{c_{VC_T}}{8{,}4}$
Explication	Application de la formule générale		Deux serveurs lames sont utilisés et la charge de travail est répartie équitablement entre les deux. Attention le c_{VC_T} du scénario 2 et 3 ne sont pas nécessairement égaux.
Situation 2	la capacité nécessaire pour traiter les vidéoconférences est entre 70% et 100% d'un CPU.		
c_T	$c_{T_1} = c_{VC_1}$	$c_{T_1} = c_{VC_1}$	$c_{T_{1/2}} = 0{,}7 \times 12 = 8{,}4$
Explication	Identique à la situation 1	La capacité nécessaire pour les vidéoconférences est supérieure à l'utilisation moyenne d'un serveur lame signifiant que l'entièreté du serveur lame est consacrée à la gestion des vidéoconférences.	La répartition du travail étant équitable entre les deux serveurs lames, seuls 35 à 50% de chaque serveur lame est utilisé pour gérer les vidéoconférences et la virtualisation est utilisée pour combler la charge de travail du reste des cœurs non utilisés.

Tableau 3-10 : Calcul du facteur d'allocation des serveurs lames pour la phase d'utilisation

	Scénario 1	**Scénario 2**	**Scénario 3**
FAL	$FAL = 1$	$FAL = \frac{c_{VC_1}}{c_{T_1}} = 1$	$FAL = \frac{c_{VC_1}}{8{,}4} + \frac{c_{VC_2}}{8{,}4} = \frac{c_{VC_T}}{8{,}4}$
Explication	Application de la formule générale		Identique à la situation 1

Les facteurs d'allocation obtenus à partir de la distribution illustrée dans la Figure 3-12 et de la méthodologie du Tableau 3-10 sont présentés dans la Figure 3-13.

Figure 3-13 : Facteurs d'allocation des serveurs lames

La Figure 3-13 indique que seules les situations 1 et 2 sont rencontrées avec la distribution et le nombre d'appels choisis pour cette ACV. Une généralisation à plus de 100% de capacité de CPU utilisée, c'est-à-dire plus d'un serveurs lames alloués aux vidéoconférences, est présentée dans l'Annexe D.

La puissance déterminée à partir de l'équation (11) doit être multipliée par une période de temps pour obtenir l'énergie utilisée pour alimenter les serveurs lames. Tel que présenté dans la Figure 3-12 les périodes d'utilisation ont été séparées en heure il est donc nécessaire de multiplier par une heure la puissance pour obtenir l'énergie consommée par le serveur lame pour les vidéoconférences. L'expression mathématique est présentée dans l'équation (12).

$$E_h = \left(FAL_i \times P_0 + (P_{max} - P_0) \times \frac{L_k \times \frac{nb_{vc}}{NB_{kVC}}}{12} \right) \times 1 \qquad (12)$$

Où h représente la période dans la journée étudiée, E_h l'énergie consommée pendant cette période (en Wattheures) et 1 la durée de la période h, qui est d'une heure.

3.3.1.2.2 Internet

Un paquet de données lorsqu'il voyage d'un serveur à l'utilisateur ou d'un utilisateur à l'autre doit faire un certain nombre de bonds en passant par différents nœuds. Un bond est le passage d'un équipement réseau (routeur ou passerelle), appelé nœud, à un autre équipement réseau, grâce à des câbles, des lignes optiques, des réseaux WiFi, des réseaux de satellites… Pour déterminer la consommation d'énergie nécessaire pour transférer 1 MB, avec une approche « bottom-up », il est ainsi nécessaire de sommer la consommation de chaque nœud et de chaque bond parcouru par les données. L'article de Coroama et al. [128] est utilisé dans cette étude comme référence pour définir l'énergie nécessaire aux transferts de données. Ceux-ci calculent la consommation du transfert de données, dans le cadre d'une vidéoconférence entre la Suisse et le Japon. Coroama et al. [128] associent un facteur d'allocation à chacun des équipements par lesquels transite l'information (en divisant la capacité nécessaire pour transférer les données et la capacité totale utilisée de l'équipement) et identifient la consommation électrique de chaque équipement. Finalement en sommant la consommation de chaque équipement multipliée par son facteur d'allocation ils calculent la consommation totale nécessaire pour le transfert d'un MB. Le résultat ainsi obtenu est 0,1993Wh/MB. Mais le chemin parcouru par les données dans l'étude de Coroama et al. [128] est très long (27117 km) et contient un grand nombre de nœuds (24). Or pour l'étude de cas réalisée dans ce mémoire, les deux participants ainsi que le centre de données sont situés en Ontario. Pour garder une certaine cohérence vis-à-vis de l'échelle géographique les résultats de l'étude de Coroama et al. [128] ont été modifiés. Ainsi, seuls les nœuds dans la ville de départ, dans la ville d'arrivée et en Europe ont été considérés dans le calcul, ramenant ainsi la consommation par MB transféré à 0,1567 Wh/MB. Les nœuds dans la ville de départ et dans la ville d'arrivée doivent être considérés, car ils représentent une part importante de la consommation totale et il y a toujours un point d'arrivée et de départ lors d'un transfert de données.

L'énergie nécessaire au transfert des données d'une vidéoconférence est calculée en multipliant la quantité de données transférées par vidéoconférence par la consommation énergétique par MB transféré (déterminée ci-dessus). La quantité de données transmises durant une vidéoconférence est déterminée en multipliant la durée d'une vidéoconférence par la vitesse des flux de transfert de données. Il faut considérer à la fois le flux de données entrant (download) et sortant (upload) de l'ordinateur, car chaque participant envoie ses propres données et reçoit celles de son interlocuteur. Les vitesses de transferts de données ont été déterminées dans la section 0 et valent respectivement 500 kbps et 500 kbps. La quantité de données transférées calculée à partir de ces paramètres vaut 3600000 kb (439.45 MB), résultant en une consommation de 87,58 Wh par vidéoconférence.

Les impacts environnementaux liés à l'utilisation d'internet dans le cadre d'une vidéoconférence sont obtenus en multipliant la consommation énergétique pour le transfert de données d'une vidéoconférence par les facteurs d'impact de la production d'un kWh (présenté dans la section 3.3.1.1). Les facteurs d'impact dépendent du grid mix et donc de l'heure à laquelle se déroule la vidéoconférence. Pour simplifier les calculs, il a été considéré que l'entièreté du transfert de données d'une vidéoconférence avait lieu pendant la plage horaire à laquelle commence la vidéoconférence. Ainsi, pour une conférence débutant à 15h35 et se terminant à 16h35 le grid mix défini de 15h à 16h est utilisé pour quantifier l'impact environnemental du transfert de données de la vidéoconférence.

3.3.1.2.3 Ordinateur portable

Pour quantifier l'électricité consommée par les deux ordinateurs portables pendant la vidéoconférence, il faut multiplier la durée d'une vidéoconférence par la consommation électrique des ordinateurs. Ces deux paramètres ont été déterminés dans la section 0 avec pour valeurs respectives 1 heure et 30 Watts, résultant en une consommation de 30 Wh par ordinateur et de 60 Wh par vidéoconférence (car deux ordinateurs sont utilisés, un pour chaque participant). En multipliant cette énergie par le nombre de vidéoconférences (10 millions), il est possible de calculer la consommation totale des ordinateurs utilisés pour le service de vidéoconférences.

Les impacts environnementaux liés à l'utilisation de l'ordinateur dans le cadre d'une vidéoconférence sont obtenus en multipliant la consommation énergétique de l'ordinateur par les facteurs d'impact de la production d'un kWh. À nouveau, les facteurs d'impact dépendent de

l'heure à laquelle se déroule la vidéoconférence et pour simplifier les calculs, la même hypothèse que pour le transfert de données a été posée.

3.3.1.3 Phase de production et de fin de vie

3.3.1.3.1 Système de serveur

Le système de serveurs utilisé dans cette étude pour héberger le service de vidéoconférences est composé de 51 serveurs lames, d'équipement réseau (18 routeurs et 1 équipement d'accès au réseau) et d'équipement additionnel (UPS, stockage de données, ventilateurs…). Les données d'inventaire exact du système de serveur étant indisponibles, des proxys provenant de la base de données ecoinvent ont été utilisés pour modéliser la phase de production de celui-ci. Ainsi, les serveurs lames et les équipements supplémentaires ont été approximés par des ordinateurs de bureau et les équipements de réseau par des routeurs et des équipements d'accès au réseau. La quantité d'équipement ainsi que les procédés ecoinvent utilisés pour les représenter sont résumés dans le Tableau 3-11. Un serveur lame ayant approximativement la taille et le poids d'un ordinateur, un serveur lame est assimilé à un boitier d'ordinateur de bureau.

Tableau 3-11 : Équipements du système de serveurs

Système de serveurs		Processus ecoinvent	
Nombre	Produit	Nombre	Processus
51	Serveur lame	51	Desktop computer, without screen, at plant/GLO U
6	Équipement supplémentaire	6	Desktop computer, without screen, at plant/GLO U
1	Équipement d'accès réseau	1	Network access devices, internet, at user/CH/I U
18	Routeur	18	Router, IP network, at server/CH/I U

La phase de fin de vie a été approximée de manière similaire, en utilisant le procédé ecoinvent « démantèlement d'ordinateur ». Celui-ci représente les impacts causés par une certaine masse d'ordinateurs démantelés. Deux types de démantèlement ont été considérés, le premier, mécanique aux USA et le deuxième, manuel en Chine. Un ratio de 2 pour 3 a été arbitrairement considéré, signifiant que pour 5 kg démantelés, 3 le sont en chine et 2 aux USA. La fin de vie de chaque équipement informatique a été considérée équivalente à celle d'un ordinateur de 5 kg. Le Tableau 3-12 résume les données utilisées pour représenter la fin de vie du système de serveurs.

Tableau 3-12 : Processus ecoinvent utilisés pour la fin de vie du système de serveurs

Produits		Processus de fin de vie ecoinvent	
Équipement	Poids (kg)	Poids (kg)	Processus
Serveurs lames (51)	255	153	Dismantling, desktop computer, manually, at plant/CH U
		102	Dismantling, desktop computer, mechanically, at plant/GLO
Équipement supplémentaire (6)	30	18	Dismantling, desktop computer, manually, at plant/CH U
		12	Dismantling, desktop computer, mechanically, at plant/GLO
Routeur (18)	90	54	Dismantling, desktop computer, manually, at plant/CH U
		36	Dismantling, desktop computer, mechanically, at plant/GLO
Équipement d'accès réseau (1)	5	3	Dismantling, desktop computer, manually, at plant/CH U
		2	Dismantling, desktop computer, mechanically, at plant/GLO

Une allocation doit être réalisée pour déterminer quelle quantité du système de serveurs est nécessaire pour remplir l'unité fonctionnelle. Deux facteurs d'allocation doivent être calculés, un pour les serveurs lames du système de serveurs et un autre pour les équipements réseaux et équipements supplémentaires du système de serveur. Le facteur d'allocation des serveurs lames peut être calculé à partir du facteur d'allocation développé précédemment (Tableau 3-10). Ce dernier détermine la quantité de serveurs lames nécessaire pour gérer les vidéoconférences pendant une heure. En faisant une moyenne du facteur d'allocation de chaque heure, on obtient le facteur d'allocation pour une journée et pour un serveur lame. Ensuite, en tenant compte de l'hypothèse selon laquelle chaque journée est identique, il suffit de multiplier ce facteur par le nombre d'années où le serveur lame est utilisé pour remplir l'unité fonctionnelle et de le diviser par la durée de vie du serveur lame pour obtenir la quantité de serveurs lames nécessaires pour remplir l'unité fonctionnelle. Finalement, en divisant ce facteur par le nombre total de serveurs lames dans le système de serveurs on obtient le facteur d'allocation pour les serveurs lames du système de serveurs (la proportion des 51 serveurs lames du système de serveurs nécessaire pour gérer 2 millions d'utilisateurs pendant 1 an).

Pour les scénarios 2 et 3, le facteur d'allocation des équipements réseau et des équipements supplémentaires est identique au facteur d'allocation des serveurs lames, mais ce n'est pas le cas pour le scénario 1. Effectivement, le scénario 1 n'ayant pas recours à la virtualisation, même lorsqu'une fraction du serveur lame est nécessaire pour gérer les vidéoconférences, l'entièreté de celui-ci doit leur être allouée. Mais ce n'est pas le cas des équipements réseau et des équipements supplémentaires, en effet ceux-ci sont partagés entre les différents serveurs lames que la virtualisation soit utilisée ou pas. Dès lors, un facteur d'allocation pour les équipements réseau et les équipements supplémentaires doit être calculé pour le scénario 1. Ce facteur est calculé en utilisant les expressions développées pour le facteur d'allocation du scénario 2. En effet, la situation est identique à celle du scénario 2 avec une utilisation légèrement inférieure du serveur lame, car la virtualisation n'est pas utilisée.

Les différents facteurs d'allocation ainsi que les équations nécessaires pour les calculer sont présentés dans le Tableau 3-13.

Tableau 3-13 : Facteurs d'allocation du système de serveur pour la phase de production

	Scénario 1	**Scénario 2**	**Scénario 3**
Formule générale pour les serveurs lames	$FASL_i = \frac{\left(\frac{\sum_{h=1}^{nb_h} FAL_{i_h}}{nb_h}\right)}{nb_{lame} \times ddv_{lame}} = \frac{\left(\frac{\sum_{h=1}^{24} FAL_{i_h}}{24}\right)}{51 \times 5} = \frac{\sum_{h=1}^{24} FAL_{i_h}}{6120}$		
$FASL$	$FASL_1 = 0{,}392\%$	$FASL_2 = 0{,}077\%$	$FASL_3 = 0{,}121\%$
Formule générale pour les équipements réseau et équipements supplémentaires	$FAE_1 = \frac{\sum_{h=1}^{24} FAL_{1'_h}}{6120}$ $FAL_{1'}$ est calculé avec les mêmes équations que FAL_2 mais avec les c_{VC} du scénario 1.	$FAE_{2/3} = \frac{\sum_{h=1}^{24} FAL_{i_h}}{6120}$	
FAE	$FAE_1 = 0{,}073\%$	$FAE_2 = 0{,}077\%$	$FAE_3 = 0{,}121\%$

L'inventaire lié à la production et fin de vie du système de serveur peut être calculé à partir des formules ci-dessous :

$$INV_{serveur_i} = FASL_i \times INV_{serveurs\ lames\ i} + FAE_i \times INV_{équipements\ réseau\ et\ équipements\ supplémentaires_i} \quad (13)$$

Avec :

$$INV_{a_i} = INV\ Prod_{a_i} + INV\ FdV_{a_i} \tag{14}$$

Où i est le scénario évalué.

3.3.1.3.2 Ordinateur portable

Le processus ecoinvent « Laptop computer, at plant/GLO U AmN CIRAIG» a été utilisé pour modéliser la production et la fin de vie des ordinateurs portables. Ce dernier contient les différentes extractions et émissions lors de la phase de production et de fin de vie de l'ordinateur. Pour déterminer quelle portion de l'ordinateur est nécessaire, l'équation (15) est utilisée pour calculer un facteur de mise à l'échelle.

$$FMEO_{VC} = \frac{Temps\ d'utilisation\ pour\ une\ vidéoconférence}{Temps\ d'utilisation\ pendant\ toute\ la\ durée\ de\ vie} \tag{15}$$

Où $FMEO_{VC}$ est facteur de mise à l'échelle de l'ordinateur portable pour une vidéoconférence.

Ce qui donne le résultat suivant :

$$FMEO_{VC} = \frac{60\ minutes}{8\ \frac{heures}{jour} \times 5\ \frac{jours}{semaine} \times 50\ \frac{semaines}{année} \times 4\ années\ \times 60\ \frac{minutes}{heure}} = 0{,}025\%$$

Pour obtenir le nombre d'ordinateurs nécessaire pour l'unité fonctionnelle, il faut multiplier le facteur obtenu ci-dessus par le nombre annuel de vidéoconférences et par le nombre de participants à chaque vidéoconférence (dans ce cas-ci 2).

3.3.1.3.3 Équipement d'accès à internet

Le procédé ecoinvent « Network access devices, internet, at user/CH/I U AmN CIRAIG» est utilisé pour représenter les équipements d'accès à internet directement utilisés par chaque participant. Ce processus ecoinvent inclut les phases de production et de fin de vie du modem, du routeur, des câbles et d'un multiplexeur d'accès DSL (« DSLAM »). Il faut à nouveau calculer un facteur de mise à l'échelle, ce qui est fait à partir de l'équation (16).

$$FMEERU_{VC} = \frac{Temps\ d'utilisation\ pour\ une\ vidéoconférence}{Temps\ d'utilisation\ pendant\ toute\ la\ durée\ de\ vie} \quad (16)$$

Où $FMEERU_{VC}$ est le facteur de mise à l'échelle des équipements d'accès à internet chez l'utilisateur pour une vidéoconférence.

Ce qui donne comme résultats :

$$FMEERU_{VC} = \frac{60\ minutes}{24\ \frac{heures}{jour} \times 7\ \frac{jours}{semaine} \times 52\ \frac{semaines}{année} \times 2\ années\ \times 60\ \frac{minutes}{heure}}$$
$$= 0{,}0057\%$$

Il faut ensuite multiplier ce facteur par le nombre annuel de vidéoconférences et le nombre de participants par vidéoconférence pour obtenir la quantité d'équipements d'accès à internet nécessaire pour remplir l'unité fonctionnelle.

3.3.2 Évaluation des impacts

Lors de la phase d'évaluation, les impacts environnementaux sont calculés à partir de la méthode d'impact IMPACT2002+ précédemment décrite dans la section 3.2.3.3, celle-ci associe à chaque substance émise ou extraite un facteur de caractérisation la reliant à un des impacts du Tableau 3-5.

3.3.3 Interprétation

La phase d'interprétation est réalisée en deux étapes. Premièrement, les points chauds du système global et les bénéfices environnementaux de la virtualisation sur le fonctionnement du système de serveurs sont identifiés. Deuxièmement, les résultats des analyses de sensibilité sont présentés. Ces analyses évaluent la robustesse des conclusions et indiquent l'importance des différentes hypothèses posées sur l'obtention des résultats finaux. L'ensemble des paramètres pour lesquels une analyse de sensibilité a été réalisée ainsi que la plage de variation de ceux-ci sont listés dans le Tableau 3-14 (l'analyse de sensibilité sur la région du grid mix a été réalisée en remplaçant le grid mix de l'Ontario par le grid mix de l'Alberta et du Québec).

Tableau 3-14 : Liste des analyses de sensibilité

Paramètre	**Valeur actuelle**	**Plage de variation**
Distribution journalière des vidéoconférences	Figure 3-12	Les différentes courbes évaluées sont présentées dans la section 5.4.1.
Charge de travail totale des serveurs lames	70%	10 – 100%
Vitesse de transfert des données	500kbps	256kbps – 3 Mbps
Grid mix utilisé	Ontario	Alberta/Québec

CHAPITRE 4 RÉSULTATS : COMBINAISON DE L'ACV AVEC UN MODÈLE ÉCONOMIQUE

L'ensemble des simulations utilisant le modèle E3MC ont été faites directement par des experts travaillant chez environnement Canada (EC). Les résultats transmis par EC sont l'ensemble des productions électriques des différentes provinces du Canada par source d'énergie et par année. Le modèle et les données utilisées pour le calibrer n'ont pas pu être obtenus pour des raisons de confidentialité. Dès lors, l'interprétation des résultats, directement liés au modèle E3MC est basée sur les connaissances accessibles concernant le modèle et le système énergétique nord-américain. Cependant, certains résultats, demandant de plus amples informations, ont pu être discutés avec les experts d'EC.

Les résultats sont présentés en quatre parties. La première traite des conséquences de l'implantation de centres de données sur les exportations d'électricité du Canada. En effet, des échanges d'électricité importants ont lieu entre le Canada et les États-Unis et cette première partie évalue l'impact de l'implantation de centres de données au Canada sur ceux-ci. La deuxième partie présente les technologies marginales utilisées pour alimenter les centres de données. La troisième partie présente l'influence de l'ampleur de la perturbation sur les résultats. La quatrième partie revient sur l'inventaire du système étudié. Finalement, la cinquième partie compare les résultats obtenus avec une approche conséquentielle prospective et attributionnelle prospective.

4.1 Conséquences de l'implantation de centres de données sur les exportations d'électricité du Canada

Les graphiques de la Figure 4-1 illustrent l'impact de l'implantation de centres de données sur les échanges entre le Canada et les États-Unis. Le premier présente l'électricité marginale produite au Canada pour répondre à la demande énergétique des centres de données et le second l'électricité marginale compensatoire produite aux États-Unis faisant suite à la diminution des exportations canadiennes d'électricité.

Figure 4-1 : Comparaison de la production marginale d'électricité au Canada et aux États-Unis

Les deux graphiques de la Figure 4-1 indiquent que les quantités d'électricité marginale produite aux États-Unis et au Canada sont du même ordre de grandeur. La portion importante d'électricité marginale produite aux États-Unis pourrait s'expliquer par la présence d'échanges très importants entre ces deux pays tel que présenté dans la Figure 3-6. Chaque province canadienne peut répondre à une demande énergétique supplémentaire des centres de données de six façons différentes : en augmentant sa production, en augmentant ses importations depuis une province canadienne voisine, en diminuant ses exportations vers ces mêmes provinces, en diminuant ses exportations vers les États-Unis, en augmentant ses importations depuis les États-Unis, ou en diminuant la consommation d'un autre secteur économique.

Une augmentation de la production électrique peut se faire à travers la construction de nouvelles centrales, mais aussi par une augmentation de l'utilisation de centrales déjà existantes, si celles-ci ne sont pas utilisées à pleine capacité. Dans le cadre de cette étude, la demande électrique des centres de données supplémentaires étant marginale, il semble peu probable que de nouvelles centrales soient construites uniquement pour répondre à leur consommation et une augmentation de la production est sans doute réalisée avec la deuxième méthode.

La réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour les scénarios 4 et 5 est présentée dans la Figure 4-2. Les exportations et importations depuis et vers les provinces

canadiennes voisines étant très faibles, elles ont été regroupées sous l'appellation « importation marginale depuis les régions canadiennes ». Les résultats pour les scénarios 1 à 3 sont très similaires à celui du scénario 4 et sont disponibles dans l'Annexe C.

Figure 4-2 : Réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour les scénarios 4 et 5

Les graphiques de la Figure 4-2 indiquent que le Québec, pendant les deux premières années, répond à la demande électrique des nouveaux centres de données en diminuant marginalement ses exportations électriques vers les États-Unis et en augmentant marginalement ses importations électriques depuis les États-Unis. Ensuite, jusqu'en 2023 le Québec répond presque uniquement à la demande des nouveaux centres de données en diminuant marginalement ses exportations vers les États-Unis. Entre 2024 et 2027 on observe une augmentation marginale des importations depuis les autres provinces canadiennes. Finalement, après 2027 pour les 4 premiers scénarios et dès 2023 pour le scénario 5 le Québec semble commencer à augmenter sa production marginale interne d'électricité pour répondre à la demande électrique des centres de données.

La réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 5 est présentée dans la Figure 4-3. Les exportations et importations depuis et vers les provinces

canadiennes voisines étant très faibles, elles ont été regroupées sous l'appellation « importation marginale depuis les régions canadiennes ». Les résultats pour les scénarios 1 à 4 sont similaires à celui du scénario 5 et sont disponibles dans l'Annexe C.

Figure 4-3 : Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 5

La Figure 4-3 indique que l'Ontario, pour répondre à l'implantation des centres de données, contrairement au Québec, augmente sa production marginale interne et répond en moyenne (sur 16 ans) à 35% de sa demande supplémentaire. Le reste de l'électricité nécessaire pour répondre à la demande électrique des nouveaux centres de données est majoritairement obtenu grâce à une diminution marginale des exportations vers les États-Unis, excepté pour les années 2016 et 2017 où l'Ontario augmente ses importations depuis les États-Unis.

La réaction de l'Alberta à l'implantation de centres de données pour les scénarios 1, 3 et 5 est présentée dans la Figure 4-4. Les exportations et importations depuis et vers les provinces canadiennes voisines étant très faibles, elles ont été regroupées sous l'appellation « importation marginale depuis les régions canadiennes ». Les résultats pour le scénario 2 et 4 sont disponibles dans l'Annexe C, mais ne sont pas présentés ici, car les résultats du scénario 2 sont intermédiaires à ceux du scénario 1 et 3 et les résultats du scénario 4 sont intermédiaires à ceux du scénario 3 et 5.

Figure 4-4 : Réaction de l'Alberta à l'implantation de centres de données pour les scénarios 1, 3 et 5

La Figure 4-4 indique que l'Alberta, dans un premier temps, contrairement au Québec et à l'Ontario, change marginalement peu ses exportations, importations et sa production, mais répond à la demande électrique des centres de données avec une diminution marginale de la demande dans d'autres secteurs économiques. Le graphique du scénario 1 et 3 de l'Alberta dans la Figure 4-4, indique qu'en 2016, non seulement l'Alberta diminue marginalement la demande dans certains secteurs économiques pour répondre à la consommation des centres de données, mais que cette diminution est supérieure à celle nécessaire, résultant en une diminution globale de la

consommation entre les scénarios et le scénario de référence (expliquant les valeurs négatives visibles dans la Figure 4-4). Cette même année, pour le scénario 5, la demande des centres de données est plus importante et la diminution dans les autres secteurs n'est pas suffisante, ainsi l'Alberta augmente également sa production. À partir de 2017, la production marginale interne de l'Alberta augmente progressivement dans les 5 scénarios pour répondre à la nouvelle demande. Les importations et exportations de l'Alberta semblent peu affectées par l'implantation de centres de données, ce qui s'explique probablement par les faibles échanges entre l'Alberta et les provinces voisines et entre l'Alberta et les États-Unis. Les résultats des 3 scénarios présentés dans la Figure 4-4 indiquent que la proportion de l'électricité, fournie aux nouveaux centres de données par une diminution marginale dans d'autres secteurs, diminue lorsque la quantité de centres de données augmente. Effectivement, pour le scénario 1 la demande des nouveaux centres de données provoque majoritairement une diminution marginale dans d'autres secteurs alors que les résultats du scénario 5 indiquent majoritairement une augmentation de la production marginale en Alberta (la demande des centres de données du scénario 5 est très supérieure à celle du scénario 1).

Trois comportements très différents sont observés pour les trois provinces dans lesquelles des centres de données sont implantés : le Québec répond principalement à la demande en changeant ses échanges, l'Alberta au contraire change sa consommation et production intérieure et l'Ontario est un cas intermédiaire et modifie ses échanges et sa production intérieure. Ces comportements peuvent s'expliquer grâce aux exportations d'électricité de chacune de ces provinces vers les États-Unis. En effet, tel qu'illustré dans la Figure 3-6, le Québec exporte vers les États-Unis presque 20000 GWh chaque année (10% de la production au Québec), l'Alberta moins de 41 GWh (0,07% de la production en Alberta), et l'Ontario un peu plus de 12000 GWh (8% de la production en Ontario), illustrant la relation entre la quantité d'échanges et le comportement de chaque province [133].

4.2 Technologies marginales

L'analyse des technologies marginales et de leurs impacts se concentre uniquement sur la production marginale (au Canada et aux États-Unis) et ignore la demande en électricité des centres de données fournie grâce à une diminution dans d'autres secteurs économiques. Effectivement, cette partie n'étant pas visible conséquentiellement dans les productions totales d'électricité, il n'est pas possible de l'étudier avec les données fournies par Environnement Canada. La Figure 4-5

présente l'évolution du grid mix marginal annuel depuis 2015 jusque 2030 pour les 5 scénarios implémentés dans le modèle.

Figure 4-5 : Évolution du grid mix annuel pour les différents scénarios

La Figure 4-5 indique que l'électricité marginale est principalement fournie à partir de gaz et de charbon. Les résultats de la section 4.1 indiquent qu'approximativement la moitié de l'électricité marginale est produite aux États-Unis, car le Canada diminue marginalement ses exportations. Or les États-Unis utilisent énormément le charbon et le gaz naturel, expliquant en partie leur présence dans le grid mix observé dans la Figure 4-5.

Une analyse plus détaillée du grid mix marginal de chaque province est présentée dans l'Annexe J et montre quelle source est favorisée pour chaque province. Ainsi, l'Alberta utilise en très grosse majorité le gaz naturel comme énergie marginale (à plus de 98%). Pourtant le modèle E3MC indique que l'Alberta ne produit que 13% de son énergie avec le gaz naturel et 76% avec le charbon, on pourrait ainsi s'attendre à ce que le charbon soit une énergie marginale. Cependant, les politiques actuellement mises en place aux niveaux fédéral et provincial, pour l'Alberta, tel que la « Norme de rendement pour la production d'électricité à partir du charbon » (présentée dans l'Annexe A) [123], sont très contraignantes et défavorisent considérablement, l'utilisation du

charbon ce qui pourrait expliquer pourquoi celui-ci n'est pas considéré comme une source marginale par le modèle E3MC alors qu'il représente une part si importante de la production.

L'Ontario utilise principalement le nucléaire et l'hydroélectricité comme sources d'énergie, qui représentent respectivement 56% et 24% de sa production électrique. Mais aucune de ces sources n'est présente dans le grid mix marginal de l'Ontario. Le nucléaire étant une source ne pouvant être installé qu'à grande échelle, il est probable que la perturbation soit trop faible pour provoquer l'installation de nouveaux réacteurs ou de nouvelles centrales. L'hydroélectricité semble être une source d'énergie marginale possible, car l'Ontario prévoit d'augmenter sa capacité en hydroélectricité [134], mais le modèle E2020 indique qu'il est sans doute plus rentable pour répondre à la demande des centres de données d'utiliser le gaz naturel. Par ailleurs, l'Ontario planifie également d'augmenter son utilisation de biomasse à court terme pour répondre, entre autres, à la demande de pointe et remplacer les centrales à charbon, ce qui s'illustre par l'utilisation importante de biomasse en 2017 et 2018 [134].

Finalement, le Québec produit en grande majorité de l'hydroélectricité, pourtant la Figure 4-2 indique que celui-ci exportant beaucoup (principalement vers les États-Unis), préfère diminuer marginalement ses exportations plutôt qu'augmenter marginalement sa production. Néanmoins, l'Annexe J et la Figure 4-2 indiquent qu'une augmentation de la production québécoise d'hydroélectricité dans les dernières années est tout de même visible pour les 4 premiers scénarios. Effectivement, celle-ci représente entre 6 et 20% du grid mix marginal de la dernière année. Cette augmentation de l'hydroélectricité apparait dès 2025 pour le 5e scénario (c'est-à-dire 3 ans plus tôt, par rapport au scénario 1 à 4).

La Figure 4-5 et le Tableau 7-7 de l'Annexe J indiquent que l'énergie marginale à long terme de l'Ontario, de l'Alberta et du Québec est en partie le gaz naturel pour les deux premiers et l'hydroélectricité pour le dernier (le reste étant une diminution des exportations vers les États-Unis). Les technologies marginales principales identifiées à partir de la Figure 4-5 et du Tableau 7-7 de l'Annexe J sont présentées dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Technologies marginales principales identifiées

Province	**Court terme**	**Long terme**
Alberta	Gaz naturel (PI)	Gaz naturel (PI)
Ontario	Gaz naturel (PI/DE) Charbon (DE) Biomasse (PI)	Gaz naturel (PI/DE) Charbon (DE)
Québec	Gaz naturel (DE) Charbon (DE)	Gaz naturel (DE) Charbon (DE) Hydroélectricité (PI)
PI = Production Interne ; DE = Diminution des Exportations		

La Figure 4-5 indique également une légère tendance à la baisse de l'utilisation marginale du charbon entre 2020 et 2030. Effectivement, une diminution allant de 14% pour le scénario 3 à 21% pour le scénario 2 est observable. Celle-ci est liée à deux phénomènes, pouvant être observés dans le Tableau 7-7 de l'Annexe J, premièrement une légère augmentation de la production marginale d'électricité au Canada (de 7% pour le scénario 1 à 25% pour le scénario 4), qui n'utilise pas le charbon comme source d'énergie marginale, et deuxièmement, une légère diminution de l'utilisation marginale de charbon aux États-Unis (de -2% pour le scénario 4 à -16% pour le scénario 2).

4.3 Influence de l'ampleur de la perturbation

L'influence de l'ampleur de la perturbation est analysée à travers l'amplitude de la demande électrique des centres de données dans chacun des cinq scénarios. L'analyse de l'ampleur de la perturbation se concentre également uniquement sur la production marginale (au Canada et aux États-Unis) et ignore la demande en électricité des centres de données fournie grâce à une diminution dans d'autres secteurs économiques. L'ampleur de la perturbation est analysée en 3 étapes, en évaluant premièrement les conséquences de celle-ci sur les exportations marginales, ensuite sur le grid mix marginal et finalement sur les impacts par kWh marginal. La Figure 4-6 présente l'influence de l'ampleur de la perturbation sur les exportations marginales entre le Canada et les États-Unis.

Figure 4-6 : Influence de l'ampleur de la perturbation sur les exportations

La Figure 4-6 indique une tendance à la hausse de la proportion de la production marginale canadienne dans la production totale marginale lorsque la demande en énergie des centres de données augmente. Cependant, même pour la plus grosse perturbation (scénario 5) ce sont les États-Unis qui produisent la majorité de l'électricité marginale, en réponse à la diminution des exportations du Canada.

Pour une petite perturbation les résultats du modèle E2020 indiquent qu'il est plus rentable de diminuer les exportations vers les États-Unis plutôt que de construire une nouvelle centrale électrique, un nouveau réacteur ou d'augmenter la production d'une centrale déjà existante. Au contraire, pour une plus grande perturbation, le modèle E2020 indique une plus grande proportion de l'énergie marginale produite au Canada. Cette augmentation pourrait s'interpréter par une augmentation de la rentabilité de certaines centrales lorsque la perturbation est plus grande. Par ailleurs, bien que les exportations vers les États-Unis diminuent dans chaque scénario (section 4.2 et Annexe C), l'exportation d'électricité vers les États-Unis est très rentable pour le Canada. Cette rentabilité pourrait expliquer pourquoi le Canada, pour une plus grande perturbation, préfère produire lui-même une plus grande partie de l'énergie consommée par les centres de données pour pouvoir ainsi minimiser la diminution des exportations vers les États-Unis.

La Figure 4-7 représente le grid mix total sur 16 ans de chaque scénario.

Figure 4-7 : influence de l'ampleur de la perturbation sur le grid mix

La Figure 4-7 indique que lorsque la perturbation augmente l'utilisation marginale de charbon diminue, l'utilisation marginale d'hydroélectricité augmente et l'utilisation marginale de gaz naturel augmente pour commencer (du scénario 1 au 3) et ensuite diminue faiblement (du scénario 3 au 5). Ces tendances dans le grid mix marginal sont directement liées à la diminution de la production compensatoire marginale des États-Unis lorsque la demande des centres de données augmente et à l'augmentation progressive de la demande électrique des centres de données. En effet, l'utilisation marginale de charbon ayant exclusivement lieu aux États-Unis, une diminution de la production compensatoire marginale des États-Unis (tel que montrée dans la Figure 4-6), mène directement à une diminution de l'utilisation marginale de charbon. Par ailleurs, les provinces canadiennes ont une électricité marginale à base de gaz naturel (pour l'Alberta et l'Ontario) et d'hydroélectricité (pour le Québec), il est donc normal que le ratio de ces technologies augmente avec le ratio de la production canadienne. Tel que mentionné dans la section 4.1, le Québec réagit plus rapidement si la perturbation est plus grande expliquant la croissance de l'utilisation d'hydroélectricité lorsque la perturbation augmente. L'augmentation progressive de la demande électrique des centres de données joue également un rôle dans l'obtention des résultats de la Figure 4-7, car cette augmentation n'est pas identique pour chaque scénario. Ainsi, dans le scénario 1 la demande électrique des centres de données est constante pendant toute la période modélisée alors que dans le scénario 5, elle augmente d'un facteur 10. Cette augmentation de la demande électrique

des centres de données au cours du temps signifie qu'en sommant la production marginale sur toutes les années, les résultats des dernières années auront plus de poids dans le grid mix marginal total. La production électrique à base charbon diminue au cours de la période modélisée (section 4.2). Par conséquent les scénarios avec une plus grande croissance de leur demande énergétique des nouveaux centres de données auront un grid mix avec une plus faible production électrique à base de charbon. Une observation similaire peut être faite pour l'hydroélectricité.

Finalement, la Figure 4-8 présente l'influence de la perturbation sur les impacts environnementaux par kWh du grid mix marginal.

Figure 4-8 : Influence de l'ampleur de la perturbation sur les impacts par kWh marginal

La Figure 4-8 indique que les impacts par kWh de la production marginale pour les catégories changements climatiques, qualité des écosystèmes et ressources sont plus faibles pour le scénario 5 et que les impacts de la catégorie santé humaine sont plus faibles pour le scénario 1 bien que le scénario 5 soit très proche (1%). Les impacts environnementaux d'un kWh sont liés aux technologies utilisées pour le produire, c'est-à-dire au grid mix utilisé pour produire le kWh. Ainsi, les impacts sur la santé humaine et sur les ressources sont majoritairement causés par l'utilisation de gaz naturel expliquant l'augmentation puis la diminution des impacts (suivant la croissance et diminution de l'utilisation de gaz naturel déjà mentionnée pour la Figure 4-7). En effet, les émissions d'hydrocarbures aromatiques lors de la production de gaz naturel causent la majorité des impacts de la catégorie santé humaine et la consommation de gaz naturel représente

la majorité des impacts de la catégorie ressource. Les impacts sur les changements climatiques et la qualité des écosystèmes sont, quant à eux, causés principalement par l'utilisation de charbon, justifiant leur décroissance (suivant la diminution de l'utilisation de charbon déjà mentionnée pour la Figure 4-7). Effectivement, les impacts sur les changements climatiques sont principalement causés par le dégagement de CO_2 lors de la combustion de charbon et les impacts sur les écosystèmes par le dégagement d'aluminium lors des opérations minières.

4.4 Signification en termes d'inventaire des impacts des technologies marginales

Bien que la majorité des résultats des ACV actuelles soient présentées sous forme d'impacts aux niveaux problèmes ou dommages, il est intéressant de revenir sur l'inventaire pour identifier quelles sont les substances extraites et émises depuis et vers l'environnement. En effet, bien que les modèles d'impacts permettent d'agréger l'inventaire pour permettre une interprétation et une comparaison des résultats, certaines catégories d'impacts sont très incertaines telle la catégorie ressource. Dès lors il est intéressant d'étudier plus en détail l'inventaire pour renforcer la robustesse des conclusions et pour connaitre les quantités de matière impliquées. Le Tableau 4-2 présente les ressources nécessaires pour produire 1 kWh à partir du grid mix marginal du scénario 1, ainsi que la contribution de chaque technologie à ces extractions. La liste complète des ressources contenant une centaine de substances, seules les substances représentant plus de 0,1% de la masse totale des flux élémentaires entrants sont indiquées (critère d'exclusion = 0,1%). Le gaz naturel est exprimé en m^3 et non pas en masse mais il a été inclus, car il représente une ressource importante.

Tableau 4-2 : Ressources nécessaires pour la production de 1 kWh à partir du grid mix marginal (scénario 1)

Ressources									
Substance	**Unité**	**Quantité**	**Ressources nécessaires pour chaque source d'énergie**						
			Biomasse	**Charbon**	**Diesel**	**Pétrole**	**Hydro**	**Gaz naturel**	**Éolien**
Charbon (anthracite)	kg	2,53E-01	0%	99%	0%	0%	0%	1%	0%
Gravier	kg	2,39E-02	2%	89%	0%	0%	3%	6%	0%
CO_2	kg	1,43E-02	89%	10%	0%	0%	0%	1%	0%
Calcite	kg	4,42E-03	0%	95%	0%	0%	2%	3%	0%
Pétrole brut	kg	4,14E-03	2%	91%	0%	3%	0%	4%	0%
Fer	kg	1,58E-03	1%	88%	0%	0%	0%	11%	0%
Charbon (lignite)	kg	5,31E-04	1%	61%	0%	0%	0%	37%	0%
Argile	kg	5,07E-04	1%	90%	0%	0%	5%	4%	0%
Gaz naturel	m^3	1,49E-01	0%	1%	0%	0%	0%	99%	0%

Le Tableau 4-2 indique que la majorité des ressources nécessaires sont utilisées par la production d'électricité à base de charbon. Effectivement, bien que la production à base de charbon ne représente que 46% du grid mix elle nécessite entre 61% et 99% des ressources. Seuls le CO_2 biogénique et le gaz naturel proviennent majoritairement respectivement de la production d'électricité à base de biomasse et de gaz naturel.

Le Tableau 4-3 présente les flux élémentaires sortants de l'inventaire, c'est-à-dire les émissions dans l'air, dans l'eau et dans le sol. Pour limiter la taille du tableau des critères d'exclusion pour les émissions dans l'air, dans l'eau et dans le sol, respectivement de 0,1%, 1% et 2%, sont arbitrairement utilisés.

Tableau 4-3 : Émissions lors de la production de 1 kWh à partir du grid mix marginal (scénario 1)

Substance	Quantité (kg)	Contribution de chaque source d'énergie aux émissions						
		Biomasse	Charbon	Diesel	Pétrole	Hydro	Gaz naturel	Éolien
Émission dans l'air								
CO_2, fossile	8,01E-01	0%	64%	0%	0%	0%	36%	0%
CO_2, biogénique	1,32E-02	97%	1%	0%	0%	0%	1%	0%
SO_2	5,52E-03	0%	49%	0%	0%	0%	51%	0%
Méthane, fossile	2,25E-03	0%	27%	0%	0%	0%	73%	0%
Oxyde d'azote	1,03E-03	2%	87%	0%	0%	0%	11%	0%
Émission dans le sol								
Pétrole	1,78E-05	2%	92%	0%	3%	0%	4%	0%
Fer	1,28E-05	3%	96%	0%	0%	0%	1%	0%
Calcium	5,43E-06	90%	9%	0%	0%	0%	1%	0%
Chlorure	1,71E-06	16%	79%	0%	1%	0%	3%	0%
Silicium	1,46E-06	98%	2%	0%	0%	0%	1%	0%
Potassium	9,92E-07	95%	5%	0%	0%	0%	1%	0%
Magnésium	6,55E-07	84%	14%	0%	0%	0%	1%	0%
Carbone	5,91E-07	36%	60%	0%	2%	0%	2%	0%
Aluminium	4,83E-07	74%	23%	0%	1%	0%	1%	0%
Émission dans l'eau								
Matières en suspension	2,09E-02	0%	1%	0%	0%	0%	99%	0%
Chlorure	1,95E-02	0%	13%	0%	0%	0%	87%	0%
Sulfate	1,75E-02	0%	99%	0%	0%	0%	1%	0%
Sodium	7,28E-03	0%	34%	0%	0%	0%	66%	0%
Calcium	5,57E-03	0%	72%	0%	0%	0%	28%	0%
Silicium	4,57E-03	0%	99%	0%	0%	0%	1%	0%
Magnésium	2,54E-03	0%	87%	0%	0%	0%	12%	0%
Potassium	1,70E-03	0%	99%	0%	0%	0%	1%	0%

Le Tableau 4-3 indique qu'entre 99 et 100% des émissions dans l'air et dans l'eau sont causées par la production d'électricité à base de gaz naturel et de charbon, excepté pour le carbone biogénique dont 97% des émissions sont produites lors de la production d'électricité à base de biomasse. Le Tableau 4-3 indique également qu'entre 90% et 100% des émissions dans le sol sont causées par la production d'électricité à base de charbon et de biomasse.

Les émissions et matières premières sont présentées pour 1 kWh, il est donc nécessaire de multiplier celles-ci par $2{,}751*10^9$ pour obtenir les ressources et émissions liées à la production marginale totale du premier scénario (2751 GWh d'électricité produits marginalement). Les 4

autres scénarios auront des émissions similaires qui dépendront du grid mix marginal (des sources d'électricité favorisées).

4.5 Comparaison entre les approches conséquentielle et attributionnelle

La Figure 4-9 et Figure 4-10 comparent les résultats obtenus avec la méthode conséquentielle et avec la méthode attributionnelle. Le premier graphique compare le grid mix des 5 scénarios avec celui obtenu à partir de la méthode attributionnelle et le deuxième compare les impacts liés à la production d'un kWh alimentant les centres de données pour chacune des approches conséquentielle et attributionnelle.

Figure 4-9 : Comparaison entre les grids mix attributionnel et conséquentiel

La Figure 4-9 indique que des différences importantes existent entre les résultats attributionnels et conséquentiels : l'hydroélectricité et le nucléaire sont beaucoup plus présents avec l'approche attributionnelle (respectivement 37% et 26% du grid mix). Le gaz naturel qui représente plus de 48% dans le grid mix des scénarios conséquentiels n'est que de 14% dans l'approche attributionnelle. De même, l'utilisation de charbon est au-dessus de 35% dans les scénarios conséquentiels et en-dessous de 17% dans le scénario attributionnel

Figure 4-10 : Comparaison entre les impacts par kWh des grids mix attributionnel et conséquentiel

La Figure 4-10 indique que les impacts environnementaux par kWh obtenus en utilisant l'approche attributionnelle sont inférieurs à ceux obtenus lorsque l'approche conséquentielle est utilisée, pour l'ensemble des catégories d'impacts. Cette différence est liée à l'utilisation d'hydroélectricité et du nucléaire qui représentent plus de 63% de la production dans l'approche attributionnelle, or la production hydroélectrique cause très peu de dommages environnementaux dans l'ensemble des catégories d'impact et le nucléaire est uniquement dommageable au niveau de la catégorie d'impact ressources (expliquant la plus faible différence dans celle-ci).

CHAPITRE 5 RÉSULTATS : ACV PRÉLIMINAIRE D'UN SERVICE DE VIDÉOCONFÉRENCES

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats de l'ACV préliminaire d'un service de vidéoconférences. Il est divisé en six parties, la première présente les impacts environnementaux liés au système de serveurs hébergeant le service de vidéoconférences et a pour but la mise en évidence des bénéfices environnementaux de la virtualisation pour le gestionnaire du système de serveurs, la deuxième présente l'ensemble des impacts du service de vidéoconférences tout au long de son cycle de vie, la troisième revient sur l'inventaire du système étudié, la quatrième présente l'évaluation de la variabilité et de la robustesse des résultats, la cinquième compare les impacts obtenus avec un grid mix horaire et annuel, et la sixième compare les résultats avec une approche attributionnelle et conséquentielle.

5.1 Évaluation environnementale de la virtualisation à l'échelle du système de serveurs

Trois scénarios, décrits à la section 0, ont été utilisés pour évaluer les bénéfices et coûts environnementaux de la virtualisation. Pour chacun d'eux, trois phases du cycle de vie ont été évaluées : la production, l'utilisation et la fin de vie. Les résultats de l'évaluation des impacts pour chacun de ces scénarios et chacune de ces phases sont présentés dans la Figure 5-1.

Figure 5-1 : Impacts environnementaux liés au système de serveurs pour chaque scénario

La Figure 5-1 montre que les impacts sur l'ensemble des catégories sont réduits de 60 à 70% lorsque la virtualisation est utilisée. Cette différence est directement liée au calcul des facteurs d'allocation. En effet, la virtualisation permet de partager la capacité du serveur lame avec d'autres services. La Figure 5-1 indique également que l'impact de la phase de production est important, car il représente entre 12 et 65% des impacts en fonction de la catégorie, ce qui est loin d'être négligeable et est supérieur aux résultats de précédentes études traitant un sujet similaire, qui indiquent des impacts pour la partie production proche de 10% [24]. Toutefois les données sont génériques rendant cette conclusion incertaine. Finalement, le scénario 3, même s'il nécessite 2 serveurs lames, semble rester compétitif (entre 37 et 45% des impacts du premier scénario), car il permet d'offrir une meilleure qualité de service pour un coût environnemental raisonnable (le scénario 3 représente entre 126% et 141% des impacts du scénario 2).

5.2 Évaluation des impacts environnementaux d'un service de vidéoconférences

Les résultats de l'évaluation des impacts environnementaux d'un service de vidéoconférences sont présentés dans la Figure 5-2. Les impacts liés au transfert de données, aux

équipements d'accès à internet et de l'ordinateur sont identiques pour chaque scénario, car seul le fonctionnement du serveur lame diffère d'un scénario à l'autre. Seuls les impacts du scénario 1 sont présentés, car les impacts du système de serveurs sont très faibles par rapport à ceux du reste du système.

Figure 5-2 : Impacts environnementaux d'un service de vidéoconférences

Il ressort de la Figure 5-2 que la majorité (99%) des impacts est causée par la production et la fin de vie de l'ordinateur, suivie par le transfert de données et l'électricité nécessaire pour l'ordinateur.

La Figure 5-2 indique également que les impacts du système de serveurs sont 5 ordres de grandeur plus petits que ceux du reste du système. Un tel résultat était attendu, car héberger un service de vidéoconférences demande peu de calculs au serveur lame, mais un trafic de données important est nécessaire, expliquant l'impact important du transfert de données. Par ailleurs, l'ordinateur, ne pouvant être utilisé que par un seul utilisateur à la fois, a été entièrement alloué à la vidéoconférence, pendant la durée de celle-ci, expliquant les impacts importants liés à celui-ci.

5.3 Signification en termes d'inventaire des impacts du système de serveur et du service de vidéoconférences

5.3.1 Analyse de l'inventaire du système de serveurs

La section 4.4 indiquait qu'il est intéressant d'étudier l'inventaire, car certaines catégories d'impact sont imprécises et en particulier la catégorie ressource. Effectivement, la catégorie ressource d'IMPACT 2002+ indique l'énergie supplémentaire nécessaire pour extraire les ressources, c'est-à-dire la différence entre la quantité d'énergie nécessaire pour extraire les ressources actuellement et dans le future [135]. Néanmoins, la catégorie ressource ne tient pas compte des stocks disponibles, de la fonction des ressources et de leur substituabilité. Un indice d'épuisement statique (sDi, static depletion index) est le ratio entre les réserves de base d'une ressource [136] et la dissipation actuelle de cette ressource (la production de cette ressource moins la production par le recyclage), c'est-à-dire la période avant que cette ressource ne soit épuisée avec la consommation actuelle. Un indice d'épuisement dynamique (dDi) est un sDi tenant compte de la capacité d'adaptation, c'est-à-dire de la substituabilité de ces matériaux [137]. Le Tableau 5-1 présente les ressources extraites depuis l'environnement, la participation de chaque phase à ces extractions ainsi que les indices d'épuisement dynamique (dDi) de chaque matériau. Les valeurs de dDi ont été extraites du travail de De Bruille et al. [137]. Ainsi, il est possible d'identifier les matériaux utilisés pour remplir l'unité fonctionnelle ayant des dDi faibles (qui représenteront un problème à plus ou moins court terme). À nouveau, la liste de l'ensemble des substances serait beaucoup trop grande pour être présentée au complet et un critère d'exclusion massique de 0,1% est utilisé. Aucun critère d'exclusion n'est utilisé pour les carburants.

Tableau 5-1 : Matières premières nécessaires pour le système de serveurs, par unité fonctionnelle

Minéraux et métaux						
Substance	**Unité**	**Quantité**	**Contribution des phases du cycle de vie**			**dDi (année)**
			Production	**Utilisation**	**Fin de Vie**	
Gravier	kg	2,59E+01	69%	31%	0%	>1000
Calcite	kg	1,07E+01	89%	11%	0%	n.a
Argile	kg	4,39E+00	92%	8%	0%	>1000
Fer	kg	2,17E+00	85%	15%	0%	94
Chlorure de sodium	kg	1,18E+00	95%	5%	0%	>1000
Aluminium	kg	2,64E-01	97%	3%	0%	∞
Cuivre	kg	1,95E-01	97%	3%	0%	192
Nickel	kg	1,77E-01	70%	30%	0%	177
Zinc	kg	8,02E-02	100%	0%	0%	65
Chrome	kg	7,07E-02	67%	33%	0%	898
Carburants						
Charbon (anthracite)	kg	4,42E+01	70%	30%	0%	/
Pétrole brut	kg	6,10E+00	61%	11%	28%	/
Uranium	kg	9,83E-03	0%	100%	0%	/
Gaz naturel	m³	3,32E+01	8%	91%	0%	/

Le Tableau 5-1 indique que de nombreux métaux sont présents dans l'inventaire et sont majoritairement utilisés pour la production du système de serveurs (entre 67% et 100%). Des métaux, plus rares, tel que l'or et l'argent sont également utilisés, mais en quantité beaucoup plus faible et ne sont donc pas visibles dans le Tableau 5-1. Parmi, les métaux présents dans le Tableau 5-1 il est possible d'identifier le fer, le zinc, le Nickel et le Cuivre qui ont une dDi inférieure à 200 ans. Il est également possible d'observer une dDi infini pour l'aluminium, une telle valeur signifie une substituabilité parfaite indiquant que des matériaux seront rapidement trouvés pour remplacer l'aluminium dans l'ensemble de ses utilisations. Les carburants présentés dans le Tableau 5-1 indiquent que 70% du charbon et 61% du pétrole sont utilisés pour la production, ce qui est attendu puisque celle-ci a lieu en Chine où le charbon est utilisé en grande quantité pour produire de l'électricité. L'uranium et le gaz naturel sont utilisés à 100% et 91% pendant la phase d'utilisation ce qui s'explique par leur contribution à l'électricité produite en Ontario, où a lieu la phase d'utilisation.

Le Tableau 5-2 présente les émissions dans l'air, dans l'eau et dans le sol ainsi que la participation de chaque phase à ces émissions. Pour limiter la taille du tableau des critères

d'exclusion pour les émissions dans l'air, dans l'eau et dans le sol, respectivement de 0,1%, 1% et 2%, sont arbitrairement utilisés.

Tableau 5-2 : Émissions causées par le système de serveurs, par unité fonctionnelle

Substances	Quantité (kg)	Contribution des phases du cycle de vie		
		Production	Utilisation	Fin de Vie
Émissions dans l'air				
CO_2, fossile	1,74E+02	48%	52%	0%
SO_2	1,38E+00	46%	54%	0%
CO_2, biogénique	8,33E-01	85%	15%	0%
Méthane, fossile	8,27E-01	55%	45%	0%
Oxyde d'azote	4,23E-01	77%	23%	0%
Émissions dans le sol				
Pétrole	2,32E-02	56%	44%	0%
Chlorure	4,26E-03	89%	11%	0%
Fer	2,39E-03	64%	36%	0%
Sodium	1,57E-03	91%	9%	0%
Calcium	7,92E-04	63%	37%	0%
Carbone	7,37E-04	71%	29%	0%
Émissions dans l'eau				
Silicium	1,29E+01	97%	3%	0%
Sulfate	1,26E+01	90%	10%	0%
Chlorure	4,42E+00	18%	82%	0%
Matières en suspension	4,25E+00	1%	99%	0%
Calcium	3,96E+00	86%	14%	0%
Magnésium	2,02E+00	91%	9%	0%
Sodium	1,85E+00	37%	63%	0%
DCO, Demande chimique en oxygène	1,18E+00	94%	5%	0%
Potassium	1,17E+00	90%	10%	0%

La présentation de l'inventaire sous forme de masse d'émissions et d'extractions est intéressante pour observer la quantité de substances devant être émises et extraites vers et depuis l'environnement pour remplir l'unité fonctionnelle. Cependant, pour connaitre l'impact de ces émissions et extractions il est nécessaire de réalisé l'étape d'évaluation des impacts environnementaux. Le Tableau 5-3 présente les 5 substances responsables de la majorité des impacts des quatre catégories d'impact dommages analysées avec IMPACT2002+.

Tableau 5-3 : Principales émissions et ressources en termes de contribution aux catégories d'impact pour le système de serveurs

Changements climatiques (kg CO2 eq)				**Santé humaine (DALY)**		
Substance	**Compartiment**	**Total**		**Substance**	**Compartiment**	**Total**
Total	/	1,85E+02		Total	/	2,71E-04
CO_2, fossile	Air	1,74E+02		SO_2	Air	7,51E-05
Méthane, fossile	Air	8,56E+00		Hydrocarbure aromatique	Air	7,46E-05
N_2O	Air	6,04E-01		Particules, < 2,5 µm	Air	4,50E-05
CFC-14	Air	4,91E-01		Oxyde d'azote	Air	3,77E-05
HFC-116	Air	3,89E-01		Arsenic	Eau	1,08E-05
Reste	/	1,07E+00		Reste	/	2,81E-05
Qualité des écosystèmes (PDF*m2*année)				**Ressources (MJ primaire)**		
Substance	**Compartiment**	**Total**		**Substance**	**Compartiment**	**Total**
Total	/	4,80E+07		Total	/	7,98E+03
Aluminium	Air	2,48E+07		Uranium	Matière première	5,50E+03
Cuivre	Air	4,19E+07		Gaz naturel	Matière première	1,34E+03
Zinc	Air	3,22E+07		Charbon (anthracite)	Matière première	8,41E+02
Oxyde d'azote	Air	2,42E+07		Pétrole brut	Matière première	2,79E+02
Cuivre	Sol	1,92E+07		Tin	Matière première	1,04E+01
Reste	/	1,15E+07		Reste	/	6,51E+00

La comparaison des Tableau 5-1 et Tableau 5-2 avec le Tableau 5-3 montre que de nombreuses substances émises ou extraites en grande quantité ne sont pas de grandes contributrices aux catégories d'impacts dommages présentées. Par exemple le gravier, la calcite et l'argile représentent les 3 extractions les plus importantes en termes de masse (57%, 24% et 10%), pourtant aucun impact n'est attribué à ces extractions dans la catégorie ressource. De même, les émissions d'hydrocarbures aromatiques sont très faibles (moins de 0,0043% des émissions dans l'air) pourtant elles représentent le deuxième impact le plus important pour la santé humaine. Ainsi, la comparaison entre les substances présentes dans le Tableau 5-1 et le Tableau 5-2 avec celles présentes dans le Tableau 5-3 permet de mettre en évidence l'importance de la phase d'évaluation des impacts pour pouvoir interpréter l'inventaire et évaluer l'impact de chaque émission.

5.3.2 Analyse de l'inventaire du service de vidéoconférences

Le Tableau 5-4 présente les matières premières extraites depuis l'environnement pour le service de vidéoconférences, la contribution de chaque processus à ces extractions et les dDi de chacun de ces matériaux. De même que dans la section 5.3.1, les minéraux et métaux ont été séparés des carburants. Un critère d'exclusion massique de 0,1% est aussi utilisé pour les métaux et minéraux. À nouveau, aucun critère d'exclusion n'est utilisé pour les carburants.

Tableau 5-4 : Ressources nécessaires pour le service de vidéoconférences, par unité fonctionnelle

Minéraux et métaux							
Substances	**Quantité (kg)**	**Contribution des processus du système**					**dDi (année)**
		Système de serveurs	**Transfert de données**	**Ordinateur (production et fin de vie)**	**Ordinateur (utilisation)**	**Équipement d'accès à internet**	
Gravier	5,43E+07	0%	6%	88%	5%	1%	>1000
Calcite	2,92E+07	0%	2%	96%	1%	0%	n.a
Argile	1,20E+07	0%	1%	97%	1%	0%	>1000
Chlorure de Sodium	2,85E+06	0%	1%	92%	1%	7%	>1000
Fer	2,03E+06	0%	7%	83%	6%	4%	94
Nickel	5,62E+05	0%	3%	93%	3%	1%	177
Magnésium	4,72E+05	0%	0%	100%	0%	0%	n.a
Cuivre	4,32E+05	0%	0%	92%	0%	7%	192
Aluminium	3,80E+05	0%	1%	97%	1%	1%	∞
Chrome	2,38E+05	0%	4%	92%	3%	1%	65
Carburants							
Charbon	6,18E+07	0%	10%	80%	8%	2%	/
Pétrole brut	1,09E+07	0%	8%	83%	7%	1%	/
Uranium	7,49E+03	0%	47%	12%	41%	0%	/
Gaz naturel (m^3)	4,27E+07	0%	31%	42%	27%	1%	/

Les résultats du Tableau 5-4 indiquent que les ressources de l'inventaire du service de vidéoconférences sont similaires à celles du système de serveur. Effectivement, les même principaux métaux sont utilisés pour l'ordinateur portable, mais en beaucoup plus grande quantité que pour le système de serveur, car de nombreux ordinateurs portables sont nécessaires pour remplir l'unité fonctionnelle.

Le Tableau 5-5 présente les émissions dans l'air, dans l'eau et dans le sol ainsi que la contribution de chaque processus à ces émissions. Pour limiter la taille du tableau des critères

d'exclusion pour les émissions dans l'air, dans l'eau et dans le sol, respectivement de 0,1%, 1% et 2%, sont arbitrairement utilisés.

Tableau 5-5 : Émissions causées par le service de vidéoconférence, par unité fonctionnelle

Substance	Quantité (kg)	Contribution des processus du système				
		Système de serveurs	Transfert de données	Ordinateur (production et fin de vie)	Ordinateur (utilisation)	Équipement d'accès à internet
Émissions dans l'air						
CO_2, fossile	2,39E+08	0%	17%	68%	14%	1%
CO_2, biogénique	5,18E+06	0%	1%	97%	1%	1%
SO_2	1,56E+06	0%	21%	60%	18%	1%
Méthane, fossile	6,34E+05	0%	25%	52%	22%	1%
Oxyde d'azote	5,17E+05	0%	8%	83%	7%	1%
Émissions dans le sol						
Pétrole	3,67E+04	0%	11%	78%	10%	1%
Carbone	2,94E+04	0%	0%	99%	0%	0%
Chlorure	1,14E+04	0%	2%	91%	1%	6%
Fer	6,23E+03	0%	6%	87%	5%	1%
Sodium	4,54E+03	0%	1%	97%	1%	1%
Calcium	2,14E+03	0%	5%	88%	5%	1%
Émissions dans l'eau						
Silicium	3,66E+07	0%	0%	99%	0%	0%
Sulfate	3,26E+07	0%	2%	96%	1%	1%
Calcium	1,00E+07	0%	2%	95%	2%	1%
Chlorure	5,29E+06	0%	30%	43%	26%	1%
Magnésium	5,13E+06	0%	2%	96%	1%	1%
Matières en suspension	4,87E+06	0%	37%	29%	33%	1%
DCO	3,34E+06	0%	1%	98%	1%	1%
Sodium	3,18E+06	0%	16%	69%	14%	1%
Potassium	2,95E+06	0%	2%	96%	2%	1%
Fluorure	2,60E+06	0%	0%	100%	0%	0%

Les substances responsables de la majorité des impacts potentiels des quatre catégories dommages d'IMPACT2002+ sont présentées dans l'Annexe E . À nouveau, la comparaison entre les Tableau 5-4 et Tableau 5-5 avec le Tableau 7-4 indique que de nombreuses substances émises ou extraites en grande quantité ne sont pas de grandes contributrices aux catégories d'impacts dommages présentées et qu'au contraire certaines substances émises en faible quantité provoquent des impacts importants.

5.4 Analyses de sensibilité

La présentation des analyses de sensibilité est séparée en deux parties. Premièrement, les analyses de sensibilité touchant directement au fonctionnent du serveur lame sont étudiées. Celles-ci sont particulièrement importantes, car elles ont un impact direct sur les bénéfices de la virtualisation. Seuls les impacts du système de serveurs sont présentés pour ces analyses de sensibilité, car l'objectif est d'indiquer la variabilité sur les bénéfices environnementaux que peut réaliser l'opérateur du centre de données. Deuxièmement, les analyses évaluant l'influence de paramètres touchant l'ensemble du système sont présentées.

5.4.1 Influence de la distribution journalière des vidéoconférences

Trois distributions journalières des vidéoconférences ont été créées pour évaluer l'influence de celles-ci sur les impacts du système de serveurs. La première est similaire à celle de référence, mais avec un pic moins drastique à entre 17h et 18h, pour ainsi évaluer une répartition plus uniforme. La deuxième distribution est plus adaptée au fonctionnement des entreprises. Dans celle-ci les vidéoconférences ont principalement lieu entre 10h00 et 12h00, une réduction de celles-ci est observable entre 12h et 13h, correspondant à la pause déjeuner, un autre pic prend place entre 14h et 16h avec finalement une diminution drastique après 18h où beaucoup d'employés finissent le travail. La troisième distribution est parfaitement uniforme, c'est-à-dire avec une utilisation du serveur lame identique à toute heure de la journée. Un tel cas est évidemment peu probable, car l'ensemble des utilisateurs est localisé en Ontario. Mais si le service de vidéoconférences est offert à différents endroits du globe il est possible que la distribution soit moins variable, car chaque région aurait ses propres heures de pointe uniformisant la courbe. Cette distribution est donc un cas extrême où il n'y a pas de variations au cours du temps. Les distributions sont présentées dans la Figure 5-3 et l'impact sur les changements climatiques associé à celles-ci est présenté dans la Figure 5-4. Seule une catégorie d'impact est présentée, car les changements sont pratiquement identiques pour toutes, l'Annexe F présente les résultats des autres catégories d'impacts.

Figure 5-3 : Distributions journalières des vidéoconférences pour l'analyse de sensibilité

Figure 5-4 : Influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur l'impact changements climatiques du système de serveurs

La Figure 5-4 indique que, dans le cadre de cette étude, la distribution a peu d'influence sur le résultat final. En effet les impacts calculés à partir de la distribution 1 et 2 sont similaires aux

impacts calculés avec la distribution de référence, seule la distribution 3 semble apporter un avantage non négligeable au scénario 3 qui diminue de 10%. Mais la distribution 3 étant uniforme pour chaque heure, le nombre d'appels est égal à 416.666 par heure (10 millions divisés par 24), ce qui représente 112% de cœurs. Ainsi, dans le scénario 2, il faut 2 cœurs (car les cœurs ne peuvent pas être partagés) et dans le scénario 3 il faut 1 cœur utilisé à 56% par serveur lame, c'est-à-dire 2 cœurs en tout ce qui est équivalent au scénario 2, expliquant les impacts environnementaux identiques pour les deux scénarios. Cependant, avec un nombre d'appels différent et nécessitant un nombre impair de cœurs, les résultats ne seraient pas identiques, car il faudrait un cœur supplémentaire pour le scénario 3, et les impacts environnementaux calculés à partir de la distribution 3 seraient semblables à ceux des autres distributions. Par exemple si 250% de cœur était nécessaire, dans le scénario 2, trois cœurs seraient utilisés, mais 2 fois 2 cœurs seraient utilisés dans le scénario 3, c'est-à-dire 4 cœurs, car 125% de cœur par serveur lame serait nécessaire.

5.4.2 Influence du nombre de vidéoconférences

La Figure 5-5 présente les résultats obtenus pour différentes études avec une quantité journalière de vidéoconférences allant de 2,5 millions à 100 millions. Les résultats sont présentés en % du scénario 1 par étude, signifiant que la référence utilisée change d'une étude à l'autre et que les scénarios peuvent être comparés uniquement dans une même étude. Effectivement, l'objectif n'est pas d'évaluer directement les impacts du système de serveurs lorsque le nombre de vidéoconférences augmente, mais de comparer la différence entre les trois scénarios pour chaque étude pour évaluer si les bénéfices de la virtualisation restent identiques lorsque le nombre de vidéoconférences change. La Figure 5-5 présente uniquement les impacts sur les changements climatiques, car les résultats sont très proches pour les différentes catégories. Les résultats pour les 3 autres catégories d'impacts sont disponibles dans l'Annexe G.

Figure 5-5 : Influence du nombre de vidéoconférences sur l'impact changements climatiques du système de serveurs

Les résultats présentés dans la Figure 5-5 indiquent que les bénéfices apportés par la virtualisation diminuent lorsque le nombre de vidéoconférences augmente. Un tel phénomène est parfaitement normal. Effectivement, la virtualisation permet de partager un serveur lame entre plusieurs tâches, mais si le nombre de vidéoconférences augmente, plusieurs serveurs lames peuvent être nécessaires et les bénéfices sont clairement moins importants puisque seul le serveur lame qui n'est pas entièrement consacré à la gestion des vidéoconférences peut être partagé. Si par exemple 13,5 serveurs lames sont nécessaires pour la gestion des vidéoconférences, les 13 premiers sont tous utilisés à leur capacité maximale et seul le 14e serveur lame peut réellement bénéficier de la virtualisation. Par ailleurs, la virtualisation possède un coût environnemental, car elle nécessite un hyperviseur pour gérer les VM, résultant en un nombre plus faible de vidéoconférences pouvant être gérées par serveur lame. Ainsi, lorsque le nombre d'appels augmente les bénéfices apportés par la virtualisation diminuent. Avec les paramètres utilisés dans cette étude, lorsque le nombre d'appels dépasse 90 millions par jour (représentant une utilisation de 8 serveurs lames entre 17 et 18h) les scénarios 2 et 3 causent plus d'impacts que le scénario 1.

5.4.3 Influence de la charge de travail moyenne des serveurs lames

La charge de travail moyenne représente la proportion moyenne de la capacité maximum des serveurs lames utilisée pendant la journée pour l'ensemble des applications hébergées par le serveur lame (pas uniquement les vidéoconférences). Dans cette étude, il a été considéré que cette charge de travail moyenne était constante dans le temps et égal à 70%. Une telle valeur dépend de l'opérateur du centre de données. La Figure 5-6 présente ainsi les impacts sur les changements climatiques en fonction de la charge de travail moyenne. Les variations pour les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes et ressources sont très similaires à celles sur les changements climatiques et sont disponibles dans l'Annexe H.

Figure 5-6 : Influence de la charge de travail moyenne des serveurs lames sur les impacts changements climatiques du système de serveurs

La Figure 5-6 indique que la charge de travail moyenne des serveurs lames influence les résultats puisqu'une inversion des conclusions est possible. Effectivement, pour une charge de travail moyenne de 20% ou moins les impacts environnementaux du scénario 3 sont supérieurs à ceux du scénario 1 et pour une charge de travail moyenne de 5% ou moins les impacts environnementaux du scénario 2 sont supérieurs à ceux du scénario 1. L'augmentation des impacts environnementaux des scénarios 2 et 3 lorsque la charge de travail moyenne diminue s'explique par le calcul des facteurs d'allocation. En effet, les facteurs d'allocation sont le ratio entre le nombre

de cœurs utilisés pour les vidéoconférences et le nombre total de cœurs utilisés dans le serveur lame. Si la charge de travail moyenne diminue, le nombre total de cœurs utilisés dans le serveur lame diminue et le facteur d'allocation augmente. D'un point de vue plus pratique, les gains pouvant être réalisés avec la virtualisation diminuent, car les serveurs lames sont en moyenne moins utilisés. Néanmoins, les valeurs de charge de travail moyenne pour lesquelles les conclusions s'inversent (20% pour le scénario 3 et 5% pour le scénario 2) sont très faibles et représentent des cas peu réalistes [23].

5.4.4 Influence de la qualité des vidéoconférences

Cette analyse de sensibilité évalue l'influence de la qualité des vidéoconférences sur les impacts environnementaux du service de vidéoconférences. Une meilleure qualité signifie une augmentation de la quantité de données transférées. La qualité des vidéoconférences a été modifiée en changeant la vitesse de transfert de données tout en gardant le temps d'une vidéoconférence constant. La Figure 5-7 présente les résultats de cette analyse.

Figure 5-7 : Impacts environnementaux du service de vidéoconférences pour différentes qualités de vidéoconférences

La Figure 5-7 indique une croissance importante des impacts liés au transfert de données lorsque la quantité de données transférées pendant la vidéoconférence augmente. Effectivement, lorsque la vitesse de transfert passe de 256 à 3000, l'impact total du service de vidéoconférences sur les changements climatiques augmente de 36%, l'impact sur la santé humaine de 58%, l'impact sur la qualité des écosystèmes de 20% et l'impact sur les ressources de 96%. Ainsi, l'augmentation des impacts environnementaux lorsque la qualité des vidéoconférences augmente dépend fortement de la catégorie d'impact. L'impact sur les ressources augmente beaucoup lorsque la qualité de la vidéoconférence augmente, car comme le montre la Figure 5-2, le transfert de données représente une part importante de cette catégorie d'impact. Au contraire, la Figure 5-2 indique que le transfert de données ne représente qu'une faible portion des impacts sur la santé humaine expliquant la faible augmentation des impacts sur la santé humaine lorsque la qualité des vidéoconférences augmente.

5.4.5 Influence géographique du grid mix

Les résultats présentés dans la section 5.1 indiquent qu'entre 13 et 66% des impacts d'une vidéoconférence sont liés à l'utilisation de l'ordinateur et aux transferts de données. Ces processus sont uniquement causés par une consommation d'électricité, et cette analyse a pour objectif l'évaluation de l'importance du grid mix sur les impacts totaux du service de vidéoconférences. Trois grids mix de différentes régions ont été choisis, pour observer l'influence géographique du grid mix.

Les grids mix régionaux sélectionnés sont ceux de l'Ontario (dans l'évaluation de référence) [130], celui de l'Alberta (2012) [138] et celui du Québec (en 2011, [139]). Le grid mix québécois ne permet pas une description horaire du grid mix, car la quantité d'informations pour celui-ci est trop faible, il a donc été considéré constant dans la journée. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 5-8.

Figure 5-8 : influence géographique du grid mix sur les impacts du service de vidéoconférences

La Figure 5-8 indique, d'une part, une augmentation des impacts environnementaux du service de vidéoconférences lorsque le grid mix de l'Alberta est utilisé et d'autre part, une diminution lorsque c'est le grid mix québécois qui est utilisé. L'augmentation des impacts environnementaux lorsque le grid mix de l'Alberta est utilisé s'explique par la grande portion d'énergie produite à partir de charbon et de gaz naturel en Alberta (53% et 37%) qui sont des sources très polluantes. La diminution des impacts lorsque le grid mix québécois est utilisé s'explique par la production très importante d'hydroélectricité dans cette région (96%), qui est une source d'énergie peu polluante. La Figure 5-8 indique également que les impacts de la catégorie ressources sont très proches lorsque le grid mix de l'Ontario ou de l'Alberta est utilisé, ce qui s'explique par l'utilisation importante de nucléaire en Ontario (le nucléaire ayant des impacts importants dans cette catégorie).

D'autre part, ce sont les impacts environnementaux liés au transfert de données et à l'utilisation de l'ordinateur qui augmentent ou diminuent en fonction du grid mix utilisé. Effectivement, ces deux processus sont représentés par une consommation d'électricité expliquant pourquoi ils changent autant quand le grid mix varie.

5.5 Influence de la précision temporelle du grid mix

Tel que présenté à la section 5.4.5 la consommation d'électricité représente une part importante des impacts du système de vidéoconférences. Ainsi, pour pouvoir évaluer l'influence de la précision temporelle du grid mix sur les résultats finaux, les impacts d'un service de vidéoconférences avec un grid mix horaire et annuel sont calculés et présentés dans Figure 5-9.

Figure 5-9 : Influence de la précision temporelle du grid mix sur les impacts environnementaux du service de vidéoconférences

La Figure 5-9 indique que les impacts du service de vidéoconférences sont inférieurs lorsque le grid mix annuel est utilisé, excepté pour la catégorie d'impact ressource. La diminution est assez faible : 4% pour les changements climatiques, 5% pour la santé humaine et 0,2 % pour la qualité des écosystèmes. Cependant, pour les changements climatiques et la santé humaine,

l'électricité représente respectivement 25% et 40% des impacts. Ainsi, la diminution de 4% pour les changements climatiques signifie une diminution de 15% des impacts provoqués par l'électricité et la diminution de 5% représente une diminution de 12% des impacts sur la santé humaine causés par l'électricité. Ces différences sont donc non-négligeables mettant en évidence l'importance de la précision temporelle du grid mix.

5.6 Influence de l'approche utilisée pour calculer le grid mix

Tel que mentionné à la section 5.4.5, le grid mix influence beaucoup les résultats finaux de l'étude. Ainsi, des grids mix conséquentiel et attributionnel déterminés dans la section 4.2 et 4.5 à partir du modèle Énergie 2020, sont utilisés pour comparer les résultats de l'approche attributionnelle et conséquentielle.

Les résultats obtenus en modélisant les impacts d'un service de vidéoconférences avec le grid mix attributionnel et le grid mix conséquentiel sont présentés dans la Figure 5-10. Le grid mix conséquentiel du scénario 1 (modélisé dans le modèle E2020) est utilisé pour cette analyse, car il représente une demande supplémentaire constante sur 16 ans ce qui serait le cas du service de vidéoconférences. Ces grids mix ne sont pas horaires et ont donc été considérés constants dans la journée.

Figure 5-10 : influence de la méthode (attributionnelle ou conséquentielle) de calcul du grid mix sur les impacts du service de vidéoconférences

La Figure 5-10 indique que les impacts du service de vidéoconférences sont supérieurs lorsque le grid mix conséquentiel est utilisé. Cette différence d'impact peut être expliquée, à nouveau, par la composition du grid mix. En effet, les productions d'électricité à base de charbon et de gaz naturel, qui sont très impactantes, représentent respectivement 46% et 48% du grid mix conséquentiel et seulement 17% et 14% du grid mix attributionnel. Ce dernier est composé majoritairement d'hydroélectricité et de nucléaire (37% et 26%) qui sont peu impactants (excepté le nucléaire pour la catégorie d'impact ressources). À nouveau on observe une différence non négligeable (diminution de 40% des impacts pour certaines catégories) dans l'évaluation des impacts environnementaux lorsque qu'une approche attributionnelle ou conséquentielle est utilisée.

CHAPITRE 6 DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Discussion des résultats de la combinaison de l'ACV avec un modèle économique

La discussion des résultats de la combinaison de l'ACV avec un modèle économique est divisée en quatre parties, la première revient sur les différents objectifs ayant été fixés à la section 2.2 pour évaluer comment ceux-ci ont été remplis, la deuxième partie indique les contributions scientifiques, la troisième partie identifie les différentes possibilités d'utilisation des résultats et de la méthodologie et finalement la quatrième partie donne des recommandations pour améliorer ce type d'approche.

6.1.1 Retour sur les objectifs de la recherche

L'objectif 1 est de modéliser, à l'aide d'un modèle économique, la consommation d'énergie de la phase d'utilisation d'un groupe de serveurs générant un nuage informatique implanté au Canada, de 2015 à 2030. Pour atteindre cet objectif, le modèle énergétique et économique E3MC, modélisant le comportement du secteur énergétique nord-américain, a été utilisé en série avec la méthodologie ACV. Les résultats obtenus à partir du modèle ont permis l'identification des technologies marginales alimentant les centres de données implantés au Canada et remplissant ainsi les objectifs 1, 1.a et 1.b. Cependant, les modèles économiques, tels que décrits dans la revue de littérature, prennent en considération un très grand nombre de paramètres technologiques, économiques, sociaux… mais ne sont pas une science exacte, car ils essayent de décrire des phénomènes très complexes liés au comportement humain et reposent sur de nombreuses hypothèses et approximations apportant des incertitudes importantes sur leur résultats [75, 99]. Par ailleurs, les modèles économiques sont basés sur un système d'optimisation, signifiant qu'ils n'essayent pas de prédire le futur, mais essayent de trouver la meilleure solution en fonction d'un grand nombre de critères. Or la système économique de notre société est loin d'être optimisé et il est peu probable que la solution optimale soit celle mise en place. Dès lors, il est nécessaire de se poser la question : est-ce que l'incorporation de nombreux paramètres permettant une meilleure description du système, mais apportant de grandes incertitudes permet d'améliorer la modélisation du secteur énergétique en ACV, en comparaison aux méthodes simplifiées déjà développées en ACV ? Une approche permettant de comparer la qualité des méthodes simplifiées, à celles

incorporant l'utilisation de modèles économiques, serait de les utiliser rétrospectivement. Ainsi l'évolution d'un système énergétique existant à une période antérieure serait évaluée, permettant, de comparer quelle méthode est plus représentative de la réalité. Une telle évaluation demanderait de nombreuses ressources et est en dehors du cadre de ce projet. Le modèle E3MC possède de nombreuses caractéristiques intéressantes, telles que le nombre important de paramètres pris en compte, la grande précision dans la description de la demande, l'utilisation de la théorie des choix qualitatifs… Il a donc été considéré que ces caractéristiques font de lui un choix pertinent, donnant des résultats suffisamment fiables. Par ailleurs, l'utilisation de ce modèle par le gouvernement canadien pour modéliser ses GES tend à renforcer ce postulat.

La modélisation de différents scénarios dans le modèle E3MC a permis de remplir l'objectif 1.c et 1.d en identifiant les effets sur les technologies marginales de la quantité de centres de données implantés.

Finalement, les résultats de l'approche attributionnelle prospective développée dans la section 3.2.4 ont été comparés aux résultats de l'approche conséquentielle prospective permettant de remplir l'objectif 1.e.

6.1.2 Contributions scientifiques

La combinaison de l'ACV et du modèle E3MC dans ce projet permet une identification des technologies marginales de production d'énergie pour ensuite modéliser leurs impacts environnementaux grâce à l'ACV.

6.1.2.1 Les apports du modèle E3MC à l'ACV

Il peut être problématique de déterminer le territoire sur lequel est produite l'électricité alimentant le procédé étudié, car un grid mix local, régional, national, continental ou mondial peut être choisi [109]. La justification de ce choix est parfois compliquée et souvent arbitraire, car les réseaux électriques nationaux sont souvent très étendus et interconnectés entre eux. L'approche conséquentielle et l'utilisation du modèle Énergie 2020 permettent de résoudre cette problématique. En effet, le modèle Énergie et un modèle multirégional prenant en compte à la fois le secteur énergétique canadien et des États-Unis. Pour considérer l'entièreté du réseau, il serait nécessaire d'inclure le Mexique. Cependant, la capacité de transfert entre les États-Unis et le Mexique est très réduite (inférieur à 1 GW, [140]) et peu utilisée (1200 MWh importés depuis le

Mexique et 700 MWh exportés vers le Mexique [141]). L'influence d'une perturbation au Canada sur la production mexicaine est donc probablement négligeable, voire inexistante. Dès lors, on peut considérer que le système énergétique du modèle Énergie 2020 ne souffre pas d'une délimitation arbitraire de ses frontières géographiques. L'importance de la production marginale compensatoire des États-Unis dans les résultats indique clairement l'utilité de considérer les interconnexions entre les réseaux électriques de différentes régions.

Soimakallio et al. [95] indiquent que pour pouvoir déterminer la technologie marginale lors de la réalisation d'une ACV-C, touchant à un changement de la consommation dans un système énergétique, de nombreux paramètres économiques, techniques, énergétiques, politiques… étaient importants. L'utilisation du modèle Énergie 2020 en combinaison avec l'ACV a permis de déterminer un grid mix marginal prospectif sur 16 ans en tenant compte d'un grand nombre de paramètres, répondant ainsi à la problématique soulevée par Soimakallio et al. [95].

6.1.2.2 Les apports possibles de l'ACV au modèle E3MC

Le modèle E3MC modélise les émissions de GES pour l'ensemble des secteurs économiques canadiens considérés comme de gros producteurs de GES [123]. Ainsi le modèle E3MC possède déjà un module pour calculer les émissions dues à la production d'électricité. Cependant, le modèle E3MC utilise des facteurs d'émissions uniquement liés à la phase d'utilisation des technologies de production, et plus particulièrement uniquement pour les sources d'énergie fossiles, car les sources d'énergie renouvelables et le nucléaire sont considérés comme des sources d'énergie sans émission. Par ailleurs, seules les émissions de gaz à effet de serre sont considérées par le modèle E3MC. Ces facteurs d'émissions de la phase d'utilisation sont utilisés, car l'objectif du modèle est de quantifier uniquement les émissions ayant lieu au Canada. Ainsi il n'est pas nécessaire d'inclure les émissions dues à l'entièreté du cycle de vie, car les autres phases ayant lieu au Canada seront prises en compte dans d'autres secteurs. Par exemple une partie des émissions dues aux infrastructures des centrales de production d'électricité seront considérées dans le secteur de la construction et du transport de marchandises. Mais l'utilisation de facteurs basés sur la pensée cycle de vie permettrait de quantifier les émissions dues à la consommation canadienne et pas uniquement celles ayant lieu sur son territoire. D'autre part, il serait possible de considérer un nombre plus important de catégories d'impacts environnementaux, touchant plus

d'aires de protection. L'ACV peut ainsi apporter une vision plus globale, complète et juste du problème.

6.1.3 Perspective d'utilisation des résultats

L'étude réalisée dans ce mémoire a pour objet l'analyse de l'impact de l'implantation de centres de données au Canada sur le système énergétique nord-américain. Néanmoins, une telle analyse pourrait s'avérer pertinente pour bien d'autres industries consommatrices d'électricité. Pour réaliser cette analyse, il a été nécessaire de préciser dans le modèle quel secteur augmentait sa demande. Il suffirait ainsi de réitérer cette procédure pour appliquer cette méthodologie pour n'importe quel consommateur permettant ainsi d'analyser l'impact de la croissance de la demande énergétique de n'importe quel secteur qu'il soit lié au TIC, à l'industrie ou à un consommateur quelconque du système. Par ailleurs, pour des perturbations plus importantes, il serait pertinent d'utiliser le modèle TIM pour analyser les répercussions sur l'ensemble de l'économie.

La section 4.5 indique clairement que les résultats d'une approche conséquentielle ou attributionnelle peuvent être très différents. Une telle observation avait déjà été faite par de nombreuses études [68, 142, 143], mais elle est particulièrement vraie dans le domaine énergétique où la différence d'impact entre les technologies productrices d'électricité peut varier d'un facteur mille [44]. Contrairement à la méthode simplifiée développée par Weidema et al. [60] qui semble apporter des résultats variables en fonction de l'utilisateur [105], les modèles économiques sont basés sur des équations et permettent ainsi d'obtenir une bonne reproductibilité lorsque les paramètres utilisés pour les calibrer sont bien définis. Cependant, outre les incertitudes importantes sur les résultats d'ACV apportées par l'incorporation de ces modèles en ACV, l'accessibilité et la complexité de ceux-ci pourraient rendre problématique leur utilisation. En effet, la création et l'utilisation de ces modèles sont des processus longs et complexes, demandant souvent la participation d'experts dans le domaine. Dès lors, il est tout à fait impensable, à l'heure actuelle, d'imaginer une approche conséquentielle utilisant un modèle économique pour l'ensemble des procédés modélisés et particulièrement pour ceux en arrière-plan, car ceux-ci sont beaucoup trop nombreux et touchent souvent un nombre de secteurs économiques très variés. Par ailleurs, il n'existe pas de modèles économiques pour tous les secteurs économiques et pour toutes les régions dans le monde suffisamment désagrégés pour accomplir une telle tâche. Ainsi, l'incorporation des modèles économiques pourrait s'avérer très pertinente en ACV, mais sa systématisation reste

utopique. Néanmoins, il serait possible d'utiliser les modèles économiques pour quantifier les flux conséquentiels ayant le plus d'impacts environnementaux. Ainsi les bénéfices que peuvent apporter les modèles économiques pourraient rapidement être incorporés en ACV conséquentielle.

6.1.4 Recommandations pour la combinaison de l'ACV avec un modèle économique

Différentes recommandations peuvent être tirées de ce mémoire concernant la combinaison de l'ACV et des modèles économiques :

- Dans le cadre de ce travail, la perturbation est marginale (car les autres secteurs économiques n'ont pas été perturbé), mais il serait intéressant d'observer les impacts économiques et environnementaux provoqués par une perturbation non marginale.
- Les incertitudes sur les résultats, bien que n'étant pas quantifiées dans cette étude, risquent d'être importantes. Effectivement, des incertitudes proviennent à la fois du modèle économique, tel que décrit dans la section 1.3.2.4, mais aussi des impacts calculés à partir de la méthode ACV, développées dans la section 1.2.3. Il serait ainsi nécessaire de réaliser des analyses d'incertitude ou de sensibilité sur les résultats de l'ACV et plus particulièrement sur les paramètres utilisés par le modèle économique pour vérifier la robustesse des conclusions.
- L'aspect prospectif présent dans cette étude est lui-même porteur d'incertitudes importantes, car il induit l'utilisation de paramètres touchant au futur, qui sont de par leur nature, incertains. Par ailleurs, l'étude s'étend sur 16 ans, pourtant aucune évolution technologique n'a été considérée. Les technologies pour produire de l'énergie en 2030 sont donc identiques à celles utilisées en 2015. Il serait intéressant pour les études prospectives à long terme d'essayer de considérer une évolution technologique.
- La section 1.5.1 soulevait un problème temporel lié au choix de la période de temps sur laquelle le grid mix est modélisé. Cette problématique est également présente lorsqu'un modèle économique et/ou énergétique est utilisé, car l'échelle temporelle est définie par le modèle utilisé. Il existe des modèles spécialisés dans les prévisions à moyen ou long terme (tel que le modèle Énergie 2020) qui donnent en général des résultats annuels [123], ou des modèles spécialisés dans les prédictions en temps réel, permettant ainsi d'avoir des grids

mix plus précis souvent horaires, mais pouvant être utilisés en général uniquement pour le court terme. Il est également possible de créer des modèles pour le plus long terme avec un grid mix horaire, mais le nombre de données nécessaires et les incertitudes seront très grandes [81]. Les résultats obtenus dans la section 5.5 comparent les impacts environnementaux d'un service de vidéoconférences calculés avec un grid mix horaire et annuel et indiquent une différence non-négligeable en fonction du grid mix utilisé. Ainsi, pour les futurs ACV voulant utiliser un modèle économique et énergétique, il serait pertinent de définir l'échelle temporelle pour laquelle le grid mix doit être modélisé (grid mix mensuel, annuel, horaire…), car c'est un paramètre important à considérer lors du choix du modèle.

- L'utilisation du modèle économique dans cette étude a été réalisée grâce à la coopération d'expert d'EC, cependant, le modèle et les données utilisées pour le calibrer n'ont pas pu être obtenus pour des raisons de confidentialité. D'autre part, les modèles économiques sont souvent très complexes, car ils considèrent un grand nombre de paramètres, diminuant de manière importante la transparence de l'utilisation des modèles et de cette ACV. Il serait ainsi nécessaire, pour résoudre cette problématique, d'augmenter la coopération entre les experts en ACV et les experts en économie, voire si possible d'incorporer des économistes dans les équipes d'ACV travaillant avec l'approche conséquentielle, ou utilisant des modèles économiques.

6.2 Discussion des résultats de l'évaluation environnementale de la virtualisation

La discussion des résultats de l'évaluation environnementale de la virtualisation est divisée en 3 parties, la première revient sur les différents objectifs ayant été fixés dans la section 2.2 pour évaluer comment ceux-ci ont été remplis, la deuxième partie revient sur les différentes incertitudes présentes dans l'ACV préliminaire du service de vidéoconférences et propose des recommandations pour diminuer celles-ci, finalement, la troisième partie identifie les différentes possibilités d'utilisation des résultats et les compare à des études ayant étudié des sujets proches.

6.2.1 Retour sur les objectifs de la recherche

Les résultats présentés dans la section 5.1 ont permis de remplir l'objectif 2, en déterminant que l'utilisation de la virtualisation permettait de réduire de manière très importante les impacts environnementaux du système de serveurs. Cependant, l'importance de ces bénéfices est mitigée par les résultats présentés dans la section 5.2, ceux-ci indiquent que le système de serveurs participe de manière très faible aux impacts totaux du service de vidéoconférences. Ainsi, la réduction des impacts environnementaux induite par la virtualisation reste très limitée du point de vue du cycle de vie du service de vidéoconférences. Néanmoins, la consommation des centres de données, telle que présentée dans la section 1.1, est importante (1,3% de la consommation mondiale) et une utilisation à plus grande échelle et pour d'autres applications, où une plus grande puissance de calcul serait nécessaire, pourrait sans doute apporter des bénéfices plus importants et non négligeables. Par ailleurs, la virtualisation permet d'augmenter l'utilisation des serveurs lames existants, évitant ainsi la construction de nouveaux centres de données. Cependant, bien que ces résultats soient positifs vis-à-vis de la virtualisation et de la consolidation, ils sont touchés par des incertitudes importantes (l'incertitude entourant ceux-ci est développée dans la prochaine section).

Les analyses présentées dans la section 5.5 et 5.6 permettent d'observer l'influence du grid mix sur les impacts totaux du service de vidéoconférences et répondent à l'objectif 2.b et 2.c. D'une part, les impacts environnementaux obtenus à partir du grid mix horaire sont supérieurs pour trois catégories d'impact à ceux obtenus avec le grid mix annuel. En conséquence, bien que la différence reste faible, la précision temporelle représente une caractéristique importante du grid mix qui doit être prise en compte dès que possible. D'autre part, la section 5.6 indique que les impacts environnementaux obtenus à partir de l'approche attributionnelle sont inférieurs à ceux obtenus avec l'approche conséquentielle. Cette différence démontre à nouveau la nécessité de définir précisément les objectifs de l'étude pour pouvoir déterminer quelle approche devra être utilisée.

6.2.2 Sources d'incertitudes et perspectives d'amélioration

Des incertitudes sont présentes dans chaque processus du cycle de vie du service de vidéoconférences.

La phase de production de l'ordinateur est incertaine due aux producteurs ne fournissant pas leurs données pour des raisons de confidentialité ou d'accessibilité, aux très nombreux petits

équipements composant ceux-ci et au nombre important de marque et modèles existants. Cette dernière remarque est particulièrement vraie pour les ordinateurs portables, pour lesquels il existe des modèles pesant moins de 1 kg (GIGABYTE X11, [144]) et d'autres dépassant les 4 kg (LDLC, [145]). D'autre part, le processus utilisé dans cette étude pour modéliser l'ordinateur est un proxy provenant de la base de données ecoinvent et représentant un ordinateur typique des années 2002-2005, il est donc évident que les composants de l'ordinateur, ainsi que les méthodes de production auront évolué au cours des 10 dernières années. Pour améliorer cette partie de la modélisation, il serait nécessaire de coopérer avec les fabricants pour obtenir des données primaires et ensuite de définir la marque et le modèle d'ordinateur envisagé dans l'étude ou d'utiliser des données statistiques sur les quantités d'ordinateurs des différentes marques et modèles utilisés.

La phase d'utilisation de l'ordinateur est aussi une source d'incertitude, car elle dépend énormément de l'utilisateur et de la manière dont ce dernier emploie son ordinateur. Premièrement, il existe différentes fonctionnalités d'économie d'énergie incorporées dans les ordinateurs, permettant de choisir la performance de l'ordinateur et la consommation d'électricité liée à cette performance. Ainsi, il est possible que pour réaliser une même tâche deux ordinateurs ne consomment pas la même quantité d'énergie. Deuxièmement, l'ordinateur est par essence multifonctionnel. Il est ainsi possible de simultanément prendre note (word, bloc-notes), d'aller chercher des informations sur internet, de faire des calculs en arrière-fond... pendant la vidéoconférence. Cependant, dans cette étude, l'ordinateur a été considéré entièrement consacré à la vidéoconférence, cette hypothèse n'est pas problématique dans le cadre de ce travail, car le service de vidéoconférences n'est pas comparé à un autre service. Néanmoins, si une comparaison devait être faite entre différents moyens de faire une réunion (en personne, par vidéoconférence, par téléphone…), il serait nécessaire, pour faire une comparaison équitable, de considérer l'ordinateur comme un processus multifonctionnel et de calculer des facteurs d'allocation ou d'augmenter les frontières du système.

Le transfert de données représente le deuxième impact le plus important du service de vidéoconférences, pourtant l'incertitude sur celui-ci est importante. Un paquet de données lorsqu'il voyage utilise différentes technologies de transfert de données (câbles, lignes optiques, WiFi, satellites…) et passe par différents équipements réseau (routeur ou passerelle). Chacune de ces technologies de transfert de données consomme une quantité d'énergie très différente, Koomey et al. [146] indiquent ainsi que la consommation pour transférer 1 GB peut aller de 0,17 kWh pour

les lignes d'accès numérique (DSL) à 3,56 kWh pour les lignes filaires traditionnelles. Il est souvent difficile de déterminer quels sont les différents appareils par lesquels passe un paquet de données pour aller d'un point A à un point B. Dès lors, déterminer la quantité d'énergie exacte que consomme ce paquet de données devient impossible sans ces données, il est ainsi souvent nécessaire d'approximer le coût de transfert en utilisant des approches « top-down », c'est-à-dire en considérant la consommation totale du réseau internet et la quantité totale de données transférées sur ce réseau pour ainsi calculer l'énergie consommée par GB [147]. Différentes études ont déjà été faites pour quantifier l'énergie nécessaire à la transmission des données via Internet, mais les résultats de ces études varient énormément (entre 0,006 kWh/GB et plus de 136 kWh/GB) [148]. Coroama et al. [148] identifient deux critères ayant une forte influence sur le calcul de l'énergie nécessaire au transfert de données : les frontières du système et l'année de référence. Effectivement, les frontières du système sont un paramètre déterminant, car certaines études considèrent la consommation des appareils traitant l'information (appareils en fin de chaine, « end devices », c'est-à-dire principalement les ordinateurs et centres de données) dans les frontières de leur étude, ayant pour résultats une surévaluation de la consommation nécessaire pour le transfert des données. L'année de référence des données utilisées est également importante, car l'énergie nécessaire pour transférer des données diminue chaque année [146], il est donc important d'utiliser les données les plus récentes possibles. Dans cette étude, la consommation par GB transféré provient de l'étude de Coroama et al. [128]. L'approche « bottom-up » utilisée par ceux-ci permet d'avoir des données précises pour leur cas d'étude, c'est-à-dire un transfert de données pour une vidéoconférence entre le Japon et la Suisse, signifiant que l'application est similaire à la nôtre, mais les localisations sont très différentes. Ce choix a été fait, car l'étude de Coroama et al. [128] est récente (2009) et la méthode de calcul transparente. Par ailleurs, la consommation pour transférer ne dépend pas de l'endroit où se situent les deux utilisateurs, mais du chemin parcouru par les données (équipements réseau et technologies de transfert de données utilisés) [128], ce qui a été pris en compte en adaptant les résultats de l'étude de Coroama et al. [128]. Pour augmenter la précision du processus de transfert de données, une approche « bottom-up », similaire à celle présentée par Coroama et al. [128], devrait être réalisée pour étudier le voyage d'un paquet de données entre deux utilisateurs situés en Ontario avec le centre de données, traitant leur demande, également située en Ontario.

Outre l'incertitude présente sur la consommation par GB lors du transfert, il existe également une incertitude sur la quantité de données transférées. Effectivement, la quantité de

données transférées dépend de la qualité de la vidéoconférence (résolution de l'image et qualité du son), ainsi que du programme utilisé (algorithme de compression). La section 5.4.4 analyse la sensibilité des résultats à la qualité de la vidéoconférence et indique que certaines catégories d'impacts sont bien plus sensibles que d'autres. Ainsi, il serait pertinent pour les études futures voulant évaluer les impacts d'une vidéoconférence de faire ce type d'analyse de sensibilité, excepté si le cadre de l'étude définit sans ambiguïté la quantité de données transférées (si par exemple, le service étudié ne permet pas de faire varier la qualité de la vidéoconférence). Finalement, les vidéoconférences peuvent également être utilisées pour des réunions incluant plus de deux personnes, il serait ainsi intéressant d'évaluer l'influence du nombre de personnes sur les impacts de la vidéoconférence, car la quantité de données transférées serait très différente et les transferts de chaque utilisateur ne seraient plus symétriques (la quantité de données reçue serait plus importante que celle envoyée).

L'évaluation des impacts liés au système de serveurs hébergeant le service de vidéoconférences est également sujette à différentes sources d'incertitudes. Premièrement, la phase de production a été approximée avec des proxys représentant des ordinateurs de bureau, des routeurs et des équipements d'accès à internet. Ceux-ci contiennent des composants similaires à ceux présents dans le système de serveurs, mais une telle modélisation reste très approximative. La phase de production représentant entre 12 et 65% des impacts environnementaux, une analyse plus poussée, avec des données précises à la fois de la composition du système de serveurs et des procédés de fabrication de ces composants, serait nécessaire.

La phase d'utilisation du serveur lame de cette ACV est également très spécifique, car des choix ont dû être faits pour la définir : la charge de travail moyenne, la distribution journalière et la quantité de vidéoconférences. Pour tester la robustesse des conclusions, et l'importance de ces choix, des analyses de sensibilité ont été réalisées. Les résultats de ces analyses indiquent que la distribution journalière a peu d'influence sur les résultats, mais les bénéfices de la virtualisation sont annulés lorsque la charge de travail moyenne est inférieure à 10%. Cependant, une charge de travail inférieur à 10% est un cas extrême très peu probable. D'autre part, l'hypothèse selon laquelle la consommation du serveur lame est linéaire par rapport à la charge de travail (l'équation (9)) est critiquable, car c'est actuellement rarement le cas [23]. Finalement, il est aussi possible de critiquer la méthode d'allocation, en effet, la norme ISO [41] préconise d'utiliser, si possible, l'extension des frontières et non pas l'imputation, telle que présentée dans cette étude. La méthode d'extension

des frontières n'a pas été utilisée, car l'ensemble des fonctions que devra remplir le système de serveurs n'est pas connu et il n'est donc pas possible d'étendre les frontières pour les inclure. Si l'étude devait se prolonger et que les futures fonctions du système de serveurs se définissaient avec plus de précision, il serait intéressant de reproduire cette ACV avec l'extension des frontières [41].

La phase de fin de vie du système de serveurs est celle qui a été modélisée avec les données les plus approximatives, en choisissant arbitrairement un ratio de démantèlement manuel ou mécanique d'ordinateurs de bureau pour la représenter. Cependant, la participation très réduite de cette phase dans les impacts du système de serveurs (moins de 1%) indique que l'amélioration de sa modélisation n'est pas une priorité, bien que le recyclage puisse réduire les impacts de la production de manière non négligeable.

6.2.3 Perspective d'utilisation des résultats

Plusieurs études ACV ont déjà été réalisées pour étudier les impacts d'une vidéoconférence. Souvent l'objectif de ces ACV est une comparaison entre un service IT (vidéoconférence) et un service physique (transport de personnes). Borggren et al. [149] ont ainsi évalué les impacts environnementaux (GES) de différents types de vidéoconférences, avec une variation dans le nombre de participants, dans les équipements utilisés, dans le nombre d'heures de réunion… et les ont comparé aux impacts que produirait cette rencontre si la réunion avait lieu en personne. L'étude indique clairement que la vidéoconférence cause moins d'impacts environnementaux, surtout lorsque les équipements utilisés exclusivement pour la vidéoconférence ne sont pas trop nombreux. D'autre part, l'étude indique la participation de chaque équipement aux impacts totaux. Dans la situation où la réunion se déroule avec deux participants et un équipement standard composé d'un ordinateur portable et d'un écran LCD supplémentaire, la répartition des dommages, en ignorant l'écran LCD, est similaire à celle trouvée dans notre étude. Effectivement, pour les émissions de GES on retrouve la production de l'ordinateur en tête, suivie par la consommation en électricité nécessaire pour le transfert de données et finalement par la consommation de l'ordinateur.

L'étude d'Ong et al. [147] compare les impacts environnementaux de plusieurs scénarios de vidéoconférences avec différents types d'équipement aux impacts d'un scénario avec une réunion en personne. La distance à parcourir pour la réunion et la durée de la réunion sont des paramètres dynamiques, variant respectivement entre 0 et 1000 km et 0 et 150 heures, permettant ainsi de calculer la distance à partir de laquelle la vidéoconférence est une meilleure option et la

durée à partir de laquelle la réunion en personne cause moins d'impacts environnementaux. Les résultats indiquent généralement une meilleure performance environnementale des vidéoconférences, car même pour l'option utilisant le matériel le plus performant, pour les réunions ne dépassant pas 80h et lorsque les conférenciers sont distants de 400km ou plus la vidéoconférence est moins impactante que la rencontre en personne. Par ailleurs, ces auteurs mettent en évidence que le type d'équipement exclusivement utilisé pour la vidéoconférence, ainsi que la qualité de la vidéoconférence sont des paramètres sensibles. En effet, les impacts environnementaux du scénario utilisant les équipements les moins performants avec la qualité la plus faible sont 50 fois plus faibles que ceux du scénario utilisant les équipements les plus performants avec la plus grande qualité. Ceci confirme la conclusion, obtenue à partir de la revue de littérature et de l'analyse de sensibilité de la qualité des vidéoconférences, indiquant que les études environnementales touchant à des services basés sur l'utilisation de TIC sont souvent très spécifiques à la situation étudiée. Des analyses de sensibilité sont ainsi recommandées lorsque le système utilisé n'est pas défini par l'objectif de l'étude.

Bien que les deux études précédemment citées concluent favorablement envers les vidéoconférences, il est nécessaire de citer un phénomène pouvant mitiger ces résultats et souvent rencontré lorsque des options basées sur les TIC sont envisagées : l'effet rebond. Un effet rebond peut être défini comme : « l'augmentation de consommation liée à la réduction des limites à l'utilisation d'une technologie, ces limites pouvant être monétaires, temporelles, sociales, physiques, liées à l'effort, au danger, à l'organisation…» [150]. Dans le cadre d'une vidéoconférence, il est possible d'imaginer deux types d'effet rebond. Premièrement, un effet rebond direct, c'est-à-dire une augmentation du nombre de rencontres virtuelles par rapport au nombre de rencontres en personne. Cette croissance serait induite par la facilitée et la gratuité de l'utilisation du service de vidéoconférences. Cet effet rebond, lié à l'augmentation du nombre de rencontres virtuelles, a déjà été partiellement étudié par Borggren et al. [149] qui évaluent les impacts d'un scénario avec un nombre de rencontres augmenté. Coroama et al. [18] ont réalisé une conférence utilisant un système de vidéoconférences, permettant de participer à la conférence depuis deux sites différents. Ils ont ensuite pu quantifier l'effet rebond induit par cette accessibilité plus facile à la conférence. Deuxièmement, il existe un effet rebond indirect causé par une augmentation de temps libre dû à la diminution du temps nécessaire pour la tenue d'une réunion puisque le temps de transport ne serait plus nécessaire. Ce temps libre pourrait être consacré à de

nouvelles activités occasionnant des impacts environnementaux. Un autre effet rebond similaire est lié aux économies financières réalisées par le vidéoconférencier, puisqu'il ne lui est pas nécessaire de payer son transport (billet, essence…). Le deuxième type d'effet rebond, lié à l'augmentation de temps et/ou d'argent disponible est évalué par Takahashi et al. [151], grâce à un questionnaire évaluant les activités et les achats supplémentaires des vidéoconférenciers. Les études évoquées ci-dessus indiquent toutes que les bénéfices de la vidéoconférence sont réduits par les effets rebonds, mais que la vidéoconférence reste bien moins impactante que les rencontres en personne. Cependant, les résultats sont parfois, fortement influencés par ces effets. Bien que l'amélioration des données soit une étape prioritaire, il serait intéressant, lorsque celle-ci serait complétée, d'inclure dans la suite de notre étude ces effets rebonds pour ainsi augmenter sa pertinence. Néanmoins, l'ACV étant basée sur l'unité fonctionnelle, l'incorporation des effets rebonds pourrait s'avérer difficile, car ceux-ci influencent la fonction et pourrait changer les bénéfices apportés par le service étudié, rendant la définition de l'unité fonctionnelle très complexe.

Il existe déjà un certain nombre d'ACV de centres de données ou de serveurs, Grimm et al. [24] et Arushanyan et al. [152] ont ainsi fait une liste des différentes ACV qu'ils pouvaient trouver, en indiquant les impacts et les phases du cycle de vie étudiés par celles-ci. Il ressort de ces études que les ACV complètes et multicritères sont peu nombreuses ([153-156]). Excepté pour l'ACV de Wang [155] les conclusions de ces ACV indiquent que plus de 70% des impacts environnementaux des centres de données sont causés pendant la phase d'utilisation, ce qui est assez éloigné des conclusions tirées dans notre étude, qui indiquent que les impacts de la phase d'utilisation et de production sont pratiquement équivalents. L'étude Wang [155] obtient des résultats indiquant également que la phase de production ne peut pas être négligée sous certaines conditions, mais le centre de données étudié est particulièrement efficace expliquant probablement en partie ces résultats. La différence entre notre étude et les études de Shah et al. [153], de Bitencourt [154] et de Whiteheadet al. [156] peut s'expliquer de trois manières. Premièrement, le grid mix utilisé pendant la phase d'utilisation dans notre étude est composé en moyenne de 82% d'énergie renouvelable ou nucléaire expliquant les faibles impacts environnementaux de la phase d'utilisation. Deuxièmement la modélisation de la phase de production est très approximative ce qui rend la contribution de cette phase très incertaine. Troisièmement, la consommation de l'UPS et du refroidissement n'a pas été considérée dans notre étude. Ainsi, il serait nécessaire d'obtenir

des données supplémentaires pour pouvoir affirmer que l'importance de la phase de production est réellement équivalente à celle de la phase d'utilisation.

Finalement, l'évaluation environnementale des bénéfices de la virtualisation, bien qu'étant sujette à des incertitudes importantes, semble indiquer des gains environnementaux non négligeables. De nombreuses études étudient déjà différentes stratégies permettant une amélioration des performances environnementales des centres de données [8, 9]. Néanmoins, ces études restent souvent centrées sur la consommation énergétique des centres de données. Notre étude a démontré que la considération de l'entièreté du cycle de vie et de plusieurs critères environnementaux était importante, il serait donc pertinent d'inclure des ACV dans les futures méthodes d'évaluation des performances environnementales de stratégie d'optimisation de centres de données, de serveurs ou de service IT.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Les centres de données consomment de grandes quantités d'électricité. Pour résoudre cette problématique deux solutions ont été envisagées dans ce mémoire : l'installation des centres de données au Canada et l'utilisation de la virtualisation. Ainsi, pour évaluer la première solution une approche d'ACV-conséquentielle, combinant la méthodologie ACV avec le modèle E3MC (modèle économique d'équilibre partiel du secteur énergétique nord-américain), a été utilisée pour modéliser les impacts environnementaux qu'induirait l'implantation d'une grande quantité de centres de données au Canada. Ensuite, une ACV préliminaire d'un service de vidéoconférences hébergé par un serveur lame utilisant la virtualisation a été réalisée pour évaluer la deuxième solution.

La combinaison de l'ACV et du modèle E3MC a permis de modéliser la consommation d'énergie de la phase d'utilisation d'un groupe de serveurs générant un nuage informatique implanté au Canada et de comparer l'approche attributionnelle et conséquentielle dans un contexte prospectif. Effectivement, l'utilisation d'un modèle économique décrivant le système énergétique permet la modélisation du secteur énergétique, avec de nombreux paramètres techniques, économiques, géographiques, démographiques pris en compte par le modèle, permettant de considérer un grand nombre de relations de causalité. Les résultats du modèle ont ainsi permis de prédire la production marginale induite par l'implantation de nouveaux centres de données au Canada. Une approche ACV a ensuite pu être appliquée pour déterminer les impacts environnementaux associés à la production marginale d'électricité. Les résultats obtenus indiquent que les principales sources d'électricité marginales sont le gaz naturel et le charbon avec une légère participation de l'hydroélectricité. De plus, la demande électrique des nouveaux centres de données induit une diminution marginale importante des exportations du Canada vers les États-Unis. Cette diminution marginale des exportations provoque une production marginale compensatoire aux États-Unis. Enfin, une augmentation de la demande électrique des nouveaux centres de données provoque une croissance de la proportion de la production marginale canadienne (par rapport à la production marginale totale), résultant en une augmentation de la production marginale d'hydroélectricité et une diminution de l'utilisation de charbon.

Cependant, bien que l'utilisation d'un modèle économique permette d'augmenter le nombre de critères considérés, les résultats sont touchés par des incertitudes et par une diminution de la

transparence. En effet, le modèle E3MC est très complexe et son utilisation a nécessité la participation d'experts de chez Environnement Canada. Par ailleurs, le modèle et les données utilisées pour le calibrer n'ont pas pu être obtenus pour des raisons de confidentialité. Ainsi, les recommandations de cette partie du travail sont de continuer à développer l'utilisation de modèles économiques en ACV, car ceux-ci permettent de prendre en considération de nombreux phénomènes souvent négligés par les méthodes traditionnelles. Ce développement nécessite un travail multidisciplinaire incluant à la fois la science de l'ACV et de l'économie et sera possible uniquement si des experts des deux domaines travaillent ensemble.

L'ACV préliminaire du service de vidéoconférences a permis d'évaluer les bénéfices environnementaux potentiels de la virtualisation et les impacts environnementaux potentiels d'un service de vidéoconférences. Les résultats obtenus indiquent clairement une diminution importante des impacts environnementaux du système de serveurs lorsque la virtualisation est utilisée, mais l'importance de celle-ci est mitigée par la faible contribution du système de serveurs aux impacts totaux d'une vidéoconférence. Effectivement, les impacts d'une vidéoconférence semblent être majoritairement provoqués par la production de l'ordinateur portable, par la consommation d'électricité du transfert de données et par celle de l'ordinateur portable. Néanmoins, l'application d'une stratégie de virtualisation et de consolidation à plus grande échelle, pour des applications nécessitant une plus grande capacité de calcul, pourrait apporter des gains environnementaux globaux non négligeables. Par ailleurs, la virtualisation permet d'augmenter l'utilisation des serveurs existants, évitant ainsi la construction de nouveaux centres de données.

L'ACV réalisée dans ce mémoire reste préliminaire, signifiant que de nombreuses approximations ont été nécessaires, car peu de données étaient disponibles. Le manque de données cause une grande incertitude sur les données d'inventaire, cette incertitude pourrait être réduite en coopérant avec l'industrie. Une autre source d'incertitudes sur les résultats provient des paramètres de l'étude : la qualité audiovisuelle, le nombre de participants, la performance de l'ordinateur, la marque et le modèle de l'ordinateur, etc. Ce type d'incertitudes peut être traité en utilisant des scénarios et des analyses de sensibilité, permettant d'évaluer la robustesse des conclusions et l'influence de chaque hypothèse.

Finalement, l’ACV préliminaire a permis d’apporter une vision plus globale à ce type d’évaluation environnementale, en considérant à la fois l’entièreté du cycle de vie et un grand nombre de critères environnementaux.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, "Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat," Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A., Genève, Suisse 2007.

[2] United Nations Framework Convention on Climate Change, "Le Protocole de Kyoto, un résumé," 2014. Disponible: https://unfccc.int/portal_francophone/essential_background/feeling_the_heat/items/3294.php

[3] EUROPEAN COMMISSION. (2014). *Climate Action - Policies - The 2020 climate and energy package*. [En ligne]. Disponible: http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm

[4] EUROPEAN COMMISSION Directorate-General for Energy Directorate-General for Climate Action and Directorate-General for Mobility and Transport, "EU Energy, transport and GHG emission trends to 2050 : reference scenario 2013," 2013. Disponible: http://ec.europa.eu/energy/observatory/trends_2030/doc/trends_to_2050_update_2013.pdf

[5] U.S. Energy Information Administration. (2014). *ANNUAL ENERGY OUTLOOK 2014 : Market Trends: Electricity demand*. [En ligne]. Disponible: http://www.eia.gov/forecasts/aeo/MT_electric.cfm

[6] EPA. (2013, mars 01 2014). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2011*. [En ligne]. Disponible: http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/usinventoryreport.html

[7] M. Pickavet, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, B. Vermeulen, C. Develder, D. Colle, B. Dhoedt et P. Demeester, "Worldwide energy needs for ICT: The rise of power-aware networking," communication présentée à Advanced Networks and Telecommunication Systems, 2008. ANTS '08. 2nd International Symposium on, 2008, p. 1-3.

[8] S.-Y. Jing, S. Ali, K. She et Y. Zhong, "State-of-the-art research study for green cloud computing," *The Journal of Supercomputing*, vol. 65, n°. 1, p. 445-468, 2011.

[9] M. Pedram, "Energy-efficient datacenters," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 31, n°. 10, p. 1465-84, 10/ 2012.

[10] D. DROMARD et D. SERET. (2014). *Internet - Histoire*. [En ligne]. Disponible: http://www.universalis.fr/encyclopedie/internet-histoire/

[11] Internet World Stats. (2014). *INTERNET GROWTH STATISTICS*. [En ligne]. Disponible: http://www.internetworldstats.com/emarketing.htm

[12] A. Régis. (2006). La consommation des ménages en TIC depuis 45 ans : Un renouvellement permanent. [En ligne]. *1101*. Disponible: http://medias.lemonde.fr/mmpub/edt/doc/20060908/810892_ip1101.pdf

[13] Independent Evaluation Group, "Capturing Technology for Development: An Evaluation of World Bank Group Activities in Information and Communication Technologies," The World Bank Group, Washington, DC: Independent Evaluation Group, 2011.

[14] D. Excoffier. (2011). *Le Green IT - Les technologies de l'information passent au vert* [En ligne]. Disponible: http://books.google.ca/books?id=l4EqFR3qN-IC

[15] C. R. Kounatze, "Towards Green ICT Strategies: Assessing Policies and Programmes on ICT and the Environment," Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2009. Disponible: http://www.oecd.org/internet/ieconomy/42825130.pdf

[16] The Climate Group, "SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age," The Global eSustainability Initiative (GeSI), 2008. Disponible: http://www.smart2020.org/_assets/files/02_Smart2020Report.pdf

[17] Z. S. Andreopoulou, "Green Informatics: ICT for Green and Sustainability," *Journal of Agricultural Informatics*, vol. 3, nº. 2, p. 1-8, 2012.

[18] V. C. Coroama, L. M. Hilty et M. Birtel, "Effects of Internet-based multiple-site conferences on greenhouse gas emissions," *Telematics and Informatics*, vol. 29, nº. 4, p. 362-374, 2012.

[19] K. I. Takahashi, H. Tatemichi, T. Tanaka, S. Nishi et T. Kunioka. Environmental impact of information and communication technologies including rebound effects, Scottsdale, AZ, United states [En ligne]. Disponible: http://dx.doi.org/10.1109/ISEE.2004.1299680

[20] R. Miller. (2008). *Microsoft's 198 Megawatts of Motivation*. [En ligne]. Disponible: http://www.datacenterknowledge.com/archives/2008/04/04/microsofts-198-megawatts-of-motivation/

[21] J. Koomey, "Growth in data center electricity use 2005 to 2010," *Oakland, CA: Analytics Press. August*, vol. 1, p. 2010, 2011.

[22] J. G. Koomey, "Worldwide electricity used in data centers," *Environmental Research Letters*, vol. 3, nº. 3, 2008.

[23] L. A. Barroso et U. Holzle, "The Case for Energy-Proportional Computing," *Computer*, vol. 40, nº. 12, p. 33-37, 2007.

[24] D. Grimm, D. Weiss, K. Erek et R. Zarnekow. Product Carbon Footprint and Life Cycle Assessment of ICT -- Literature Review and State of the Art, communication présentée à System Sciences (HICSS), 2014 47th Hawaii International Conference on, [En ligne]. Disponible: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6758712

[25] Google. (2014). *Centres de données : Efficacité : nos bonnes pratiques*. [En ligne]. Disponible: https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/internal/

[26] S. K. Garg, C. S. Yeo, A. Anandasivam et R. Buyya, "Environment-conscious scheduling of HPC applications on distributed Cloud-oriented data centers," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 71, nº. 6, p. 732-749, 2011.

[27] J. Sun, Z. Li, X. Zhang, H. Wang et Q. He. Review in power consumption of disk based storage systems, communication présentée à Computer Science & Education (ICCSE), 8th International Conference on, [En ligne]. Disponible: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6553881

[28] P. Barham, B. Dragovic, K. Fraser, S. Hand, T. Harris, A. Ho, R. Neugebauer, I. Pratt et A. Warfield, "Xen and the art of virtualization," communication présentée à Bolton Landing, NY, USA, 2003, p. 164-177.

[29] Y. Jin, Y. Wen, Q. Chen et Z. Zhu, "An Empirical Investigation of the Impact of Server Virtualization on Energy Efficiency for Green Data Center," *The Computer Journal*, vol. 56, n°. 8, p. 977-990, 2013.

[30] K. Thirupathi Rao, P.Sai Kiran et L. S. S. Reddy, "Energy Efficiency in Datacenters through Virtualization: A Case Study," *Global Journal of Computer Science and Technology*, vol. 10, n°. 3, 2010.

[31] X. Meng, V. Pappas et L. Zhang, "Improving the scalability of data center networks with traffic-aware virtual machine placement," communication présentée à San Diego, California, USA, 2010, p. 1154-1162.

[32] N. Kim-Khoa, M. Cheriet, M. Lemay, M. Savoie et B. Ho, "Powering a Data Center Network via Renewable Energy: A Green Testbed," *Internet Computing, IEEE*, vol. 17, n°. 1, p. 40-49, 2013.

[33] K. Le, R. Bianchini, M. Martonosi et T. Nguyen, "Cost-and energy-aware load distribution across data centers," *Proceedings of HotPower*, p. 1-5, 2009.

[34] E. N. Elnozahy, M. Kistler et R. Rajamony, "Energy-efficient server clusters," communication présentée à Cambridge, MA, USA, 2003, p. 179-197.

[35] L. Mingfu, L. Wei, B. Jingping et L. Zhongcheng. Unveiling the resource consumption overhead of virtual machine consolidation in data centers, communication présentée à Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE, [En ligne]. Disponible: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6503617

[36] M. Pawlish, A. S. Varde, S. A. Robila et A. Ranganathan, "A call for energy efficiency in data centers," *SIGMOD Rec.*, vol. 43, n°. 1, p. 45-51, 2014.

[37] Hewlett-Packard Development Company, "Reducing the power consumption of HP ProLiant servers in the data center," Technical white paper, Édit., éd, 2010.

[38] M. R. Ahmadi et D. Maleki. Performance evaluation of server virtualization in data center applications, communication présentée à Telecommunications (IST), 2010 5th International Symposium on, [En ligne]. Disponible: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5734102

[39] G. Slade. (2007). iWaste. [En ligne]. Disponible: http://www.motherjones.com/environment/2007/03/iwaste

[40] M. Corniou. (2012). LA RUÉE VERS LES TERRES RARES. [En ligne]. p. 17-22. Disponible: http://www.quebecscience.qc.ca/magazines/articles/bfb521b24d34d1ecde0f2d10d92ab3b8.pdf

[41] *ISO 14040 : Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre*, 2006.

[42] *ISO 14044 : Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices*, 2006.

[43] O. Jolliet, M. Saadé, P. Crettaz et S. Shaked, *Analyse du cycle de vie :Comprendre et réaliser un écobilan,*. Suisse: Presses Polytechniques et Université Romandes, 2005.

[44] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer et M. Spielmann. (2007). Overview and Methodology. ecoinvent report. V2.0. [En ligne]. Disponible: http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/02_CodeOfPractice_v2.1.pdf

[45] O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer et R. Rosenbaum, "IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 8, nº. 6, p. 324-330, 2003.

[46] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). *Management environnemental et éco-produits - Analyse de cycle de vie - Evaluations multicritères*. [En ligne]. Disponible: http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?catid=13201

[47] J. Reap, F. Roman, S. Duncan et B. Bras, "A survey of unresolved problems in life cycle assessment: Part 2: impact assessment and interpretation," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, nº. 5, p. 374-388, 2008.

[48] J. Reap, F. Roman, S. Duncan et B. Bras, "A survey of unresolved problems in life cycle assessment: Part 1: goal and scope and inventory analys," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, nº. 4, p. 290-300, 2008.

[49] J. Cooper, "Specifying functional units and reference flows for comparable alternatives," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 8, nº. 6, p. 337-349, 2003.

[50] L. Dreyer, A. Niemann et M. Hauschild, "Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 8, nº. 4, p. 191-200, 2003.

[51] S. Suh, "Functions, commodities and environmental impacts in an ecological–economic model," *Ecological Economics,* vol. 48, nº. 4, p. 451-467, 2004.

[52] A. Björklund, "Survey of approaches to improve reliability in lca," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 7, nº. 2, p. 64-72, 2002.

[53] Chemical Abstracts Service (CAS). *CAS Fact Sheet*. [En ligne]. Disponible: http://www.cas.org/about-cas/cas-fact-sheets

[54] R. Rosenbaum, T. Bachmann, L. Gold, M. J. Huijbregts, O. Jolliet, R. Juraske, A. Koehler, H. Larsen, M. MacLeod, M. Margni, T. McKone, J. Payet, M. Schuhmacher, D. van de Meent et M. Hauschild, "USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, nº. 7, p. 532-546, 2008.

[55] Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG). (2013). *IMPACT World+*. [En ligne]. Disponible: http://www.impactworldplus.org/en/presentation.php

[56] B. P. Weidema et M. S. Wesnæs, "Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators," *Journal of Cleaner Production,* vol. 4, nº. 3–4, p. 167-174, 1996.

[57] M. J. Huijbregts, "Application of uncertainty and variability in LCA," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 3, n°. 5, p. 273-280, 1998.

[58] G. Finnveden, "On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 5, n°. 4, p. 229-238, 2000.

[59] B. Weidema, "Market information in life cycle assessment," Danish Envionmental Protection Agency 2003.

[60] B. P. Weidema, N. Frees et A.-M. Nielsen, "Marginal Production Technologies for Life Cycle Inventories," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 4, n°. 1, p. 48-56, 1999.

[61] T. Ekvall et B. P. Weidema, "System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 9, n°. 3, p. 161-171, 2004.

[62] T. Ekvall, A.-M. Tillman et S. Molander, "Normative ethics and methodology for life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production,* vol. 13, n°. 13-14, p. 1225-1234, 2005.

[63] J. M. Earles et A. Halog, "Consequential life cycle assessment: a review," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 16, n°. 5, p. 445-453, 2011.

[64] A. Marvuglia, E. Benetto, S. Rege et C. Jury, "Modelling approaches for consequential life-cycle assessment (C-LCA) of bioenergy: Critical review and proposed framework for biogas production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 25, p. 768-781, 2013.

[65] M. A. Curran, M. Mann et G. Norris, "The international workshop on electricity data for life cycle inventories," *Journal of Cleaner Production,* vol. 13, n°. 8, p. 853-862, 2005.

[66] T. Ekvall et A. Andrae, "Attributional and Consequential Environmental Assessment of the Shift to Lead-Free Solders (10 pp)," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 11, n°. 5, p. 344-353, 2005.

[67] J. Schmidt, "System delimitation in agricultural consequential LCA," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, n°. 4, p. 350-364, 2008.

[68] M. A. Thomassen, R. Dalgaard, R. Heijungs et I. Boer, "Attributional and consequential LCA of milk production," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, n°. 4, p. 339-349, 2008.

[69] R. K. Mandal. (2007). *Microeconomic Theory* [En ligne]. Disponible: http://books.google.fr/books?id=y27gIkFJEQQC

[70] R. P. McAfee. (2009). *Introduction to Economic Analysis* [En ligne]. Disponible: http://books.google.fr/books?id=puzRRAAACAAJ

[71] J. H. Schmidt et B. P. Weidema, "Shift in the Marginal Supply of Vegetable Oil," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, n°. 3, p. 235-239, 2008.

[72] P. Lesage, T. Ekvall, L. Deschênes et R. Samson, "Environmental Assessment of Brownfield Rehabilitation Using Two Different Life Cycle Inventory Models, Part 1 : Methodological Appeoach," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 12, n°. 6, p. 391-398, 2006.

[73] P. S. Vieir et A. Horvath, "Assessing the end-of-life impacts of buildings," *Environmental Science and Technology*, vol. 42, n°. 13, p. 4663-4669, 2008.

[74] J. Reinhard et R. Zah, "Global environmental consequences of increased biodiesel consumption in Switzerland: consequential life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, p. S46-S56, 2009.

[75] T. Ekvall, "Cleaner production tools: LCA and beyond," *Journal of Cleaner Production*, vol. 10, n°. 1, p. 403-406, 2002.

[76] A. d. Autume. (2014). *MICROÉCONOMIE : Théorie de l'équilibre général*. [En ligne]. Disponible: http://www.universalis.fr/encyclopedie/microeconomie-theorie-de-l-equilibre-general/

[77] A. SMITH. (1776). *RECHERCHES SUR LA NATURE ET LES CAUSES DE LA RICHESSE DES NATIONS*, [En ligne]. Disponible: http://classiques.uqac.ca/classiques/Smith_adam/richesse_des_nations/livre_1/richesse_des_nations_1.pdf

[78] L. Walras. (1874). *Élément d'économie pure ou Théorie de la richesse sociale* [En ligne]. Disponible: https://archive.org/stream/lmentsdconomiep00walrgoog#page/n5/mode/2up

[79] K. J. Arrow et G. Debreu. (1954). Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy. [En ligne]. *vol. 22*, p. 265-290. Disponible: http://www.jstor.org/discover/10.2307/1907353?uid=3739464&uid=2&uid=3737720&uid=4&sid=21104673665763

[80] T. V. Ramachandra, "RIEP: Regional integrated energy plan," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n°. 2, p. 285-317, 2009.

[81] R. Loulou, U. Remne, A. Kanudia, A. Lehtila et G. Goldstein, "Documentation for the TIMES Model : PART I," 2005.

[82] G. Bernard. (2014). *ÉQUILIBRE ÉCONOMIQUE : 6. Équilibre partiel et équilibre général*. [En ligne]. Disponible: http://www.universalis.fr/encyclopedie/equilibre-economique/6-equilibre-partiel-et-equilibre-general/

[83] L. Bergman, "Chapter 24 CGE Modeling of Environmental Policy and Resource Management," dans *Handbook of Environmental Economics*, vol. Volume 3, M. Karl-Göran et R. V. Jeffrey, Édit.: Elsevier, 2005, p. 1273-1306.

[84] T. Dandres, C. Gaudreault, P. Tirado-Seco et R. Samson, "Assessing non-marginal variations with consequential LCA: Application to European energy sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n°. 6, p. 3121-3132, 2011.

[85] D. H. Lee, D. J. Lee et A. Veziroglu, "Econometric models for biohydrogen development," *Bioresource technology*, vol. 102, n°. 18, p. 8475-83, Sep 2011.

[86] ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET PLANIFICATION ENERGETIQUE EUROPEENNE (EPEE), "RAPPORT POUR L'INSTITUT FRANÇAIS DE L'ENERGIE / CONSEIL FRANÇAIS DE L'ENERGIE," 2005. Disponible: http://www.wec-france.org/DocumentsPDF/RECHERCHE/30_Synthese.pdf

[87] N. Mattsson, "Effects of perturbations in a dynamic system – The case of Nordic power production," A paraitre.

[88] R. Dalgaard, J. Schmidt, N. Halberg, P. Christensen, M. Thrane et W. A. Pengue, "LCA of soybean meal," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, nº. 3, p. 240-254, 2007.

[89] J. M. Earles, A. Halog, P. Ince et K. Skog, "Integrated Economic Equilibrium and Life Cycle Assessment Modeling for Policy-based Consequential LCA," *Journal of Industrial Ecology,* vol. 17, nº. 3, p. 375-384, 2013.

[90] J.-K. Choi, P. Friley et T. Alfstad, "Implications of energy policy on a product system's dynamic life-cycle environmental impact: Survey and model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 16, nº. 7, p. 4744-4752, 2012.

[91] H. Lund, B. V. Mathiesen, P. Christensen et J. H. Schmidt, "Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 15, nº. 3, p. 260-271, 2010.

[92] F. Pietrapertosa, C. Cosmi, M. Macchiato, M. Salvia et V. Cuomo, "Life Cycle Assessment, ExternE and Comprehensive Analysis for an integrated evaluation of the environmental impact of anthropogenic activities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 13, nº. 5, p. 1039-1048, 2009.

[93] O. Eriksson, G. Finnveden, T. Ekvall et A. Björklund, "Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion," *Energy Policy,* vol. 35, nº. 2, p. 1346-1362, 2007.

[94] M. Pehnt, M. Oeser et D. J. Swider, "Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany," *Energy,* vol. 33, nº. 5, p. 747-759, 2008.

[95] S. Soimakallio, J. Kiviluoma et L. Saikku, "The complexity and challenges of determining GHG (greenhouse gas) emissions from grid electricity consumption and conservation in LCA (life cycle assessment) – A methodological review," *Energy,* vol. 36, nº. 12, p. 6705-6713, 2011.

[96] J. Kløverpris, H. Wenzel et P. H. Nielsen, "Life cycle inventory modelling of land use induced by crop consumption," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, nº. 1, p. 13-21, 2007.

[97] Environnement Canada. (2011). *Tendances en matière d'émissions au Canada - Annexe 3: Méthodologie d'élaboration des scénarios d'émissions*. [En ligne]. Disponible: http://www.ec.gc.ca/doc/publications/cc/COM1374/ec-com1374-fr-annx3.htm

[98] J.-P. FLORENS. (2014). *ÉCONOMÉTRIE*. [En ligne]. Disponible: http://www.universalis.fr/encyclopedie/econometrie/

[99] A. Zamagni, J. Guinée, R. Heijungs, P. Masoni et A. Raggi, "Lights and shadows in consequential LCA," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 17, nº. 7, p. 904-918, 2012.

[100] H.-L. Pesonen, T. Ekvall, G. Fleischer, G. Huppes, C. Jahn, Z. Klos, G. Rebitzer, G. Sonnemann, A. Tintinelli, B. Weidema et H. Wenzel, "Framework for scenario development in LCA," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 5, nº. 1, p. 21-30, 2000.

[101] M. Pehnt, "Assessing future energy and transport systems: the case of fuel cells," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 8, nº. 5, p. 283-289, 2003.

[102] Y. Fukushima et M. Hirao, "A structured framework and language for scenario-based Life Cycle assessment," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 7, nº. 6, p. 317-329, 2002.

[103] R. Frischknecht, S. Büsser et W. Krewitt, "Environmental assessment of future technologies: how to trim LCA to fit this goal?," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 14, nº. 6, p. 584-588, 2009.

[104] B. Rasmussen, M. Borup, K. Borch, P. D. Andersen, B. Rasmussen, M. Borup, K. Borch et P. D. Andersen, "Prospective technology studies with a life cycle perspective," *Int. J. Technol. Policy Manag.,* vol. 5, p. 227-239, 2005.

[105] B. V. Mathiesen, M. Münster et T. Fruergaard, "Uncertainties related to the identification of the marginal energy technology in consequential life cycle assessments," *Journal of Cleaner Production,* vol. 17, nº. 15, p. 1331-1338, 2009.

[106] J. Weinzettel, M. Reenaas, C. Solli et E. G. Hertwich, "Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine," *Renewable Energy,* vol. 34, nº. 3, p. 742-747, 2009.

[107] M. R. Kabir, B. Rooke, G. D. M. Dassanayake et B. A. Fleck, "Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation," *Renewable Energy,* vol. 37, nº. 1, p. 133-141, 2012.

[108] Varun, I. K. Bhat et R. Prakash, "LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 13, nº. 5, p. 1067-1073, 2009.

[109] C. L. Weber, P. Jiaramillo, J. Marriott et C. Samaras, "Life cycle assessment and grid electricity: what do we know and what can we know?," *Environmental science & technology,* vol. 44, nº. 6, p. 1895-901, Mar 15 2010.

[110] C. Matthew. (2008). Understanding Base Load Power - What it is and Why it Matters. [En ligne]. Disponible: http://www.area-alliance.org/documents/base%20load%20power.pdf

[111] G. Finnveden, "A world with CO2 caps," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 13, nº. 5, p. 365-367, 2008.

[112] R. Frischknecht et M. Stucki, "Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 15, nº. 8, p. 806-816, 2010.

[113] M. A. Yao, T. G. Higgs, M. J. Cullen, S. Stewart et T. A. Brady, "Comparative Assessment of Life Cycle Assessment Methods Used for Personal Computers," *Environmental science & technology,* vol. 44, nº. 19, p. 7335-7346, 2010.

[114] F. Guldbrandsson et P. Bergmark. Opportunities and limitations of using life cycle assessment methodology in the ICT sector, communication présentée à Electronics Goes Green 2012+ (EGG), 2012, [En ligne]. Disponible: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6360441

[115] C. L. Goldey, E. U. Kuester, R. Mummert, T. A. Okrasinski, D. Olson et W. J. Schaeffer. Lifecycle assessment of the environmental benefits of remanufactured telecommunications

product within a "green" supply chain, communication présentée à Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium on, [En ligne]. Disponible: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5507761

[116] N. Mirabella, L. Rigamonti et S. Scalbi, "Life cycle assessment of Information and Communication Technology application: a case study of dematerialization in the Italian Public Administration," *Journal of Cleaner Production*, vol. 44, n°. 0, p. 115-122, 2013.

[117] S. Yadav et A. K. Srivastava. Integrated Life Cycle Assessment of end of life of computers, communication présentée à Electronics Goes Green 2012+ (EGG), 2012, [En ligne]. Disponible: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6360443

[118] C. L. Weber, "Uncertainty and Variability in Product Carbon Footprinting," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, n°. 2, p. 203-211, 2012.

[119] Systematic Solutions Inc. (2006). ENERGY 2020 Documentation - Overview. [En ligne]. *vol. 1*. Disponible: http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/economics-sp/models/models.htm

[120] Jeff Amlin et George Backus. A History of Making Energy Policy. [En ligne]. Disponible: http://www.energy2020.com/resources.html

[121] Glen Wood et Jeff Amlin. (2008). *AB32 ECONOMIC ANALYSIS TECHNICAL STAKEHOLDER GROUP - ENERGY 2020*. [En ligne]. Disponible: http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/economics-sp/meetings/012808/arb_ea_st_mtg_icf_ssi_012808.pdf

[122] Systematic Solutions Inc. (2014). ENERGY 2020 - Electricity Supply Module Documentation. [En ligne]. Disponible: http://www.energy2020.com/resources.html

[123] Environnement Canada, "Tendances en matière d'émissions au Canada," 2013. Disponible: http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/985F05FB-4744-4269-8C1A-D443F8A86814/1001-Canada's%20Emissions%20Trends%202013_f.pdf

[124] Ministère des Finances. (2013). *Enquête du ministère des Finances auprès du secteur privé*. [En ligne]. Disponible: http://www.fin.gc.ca/pub/psf-psp/2013/2013-06-fra.asp

[125] Ministère des Finances. (2012). Conséquence économique et financière du vieillissement de la population. [En ligne]. Disponible: http://www.fin.gc.ca/pub/eficap-rebvpc/eficap-rebvpc-fra.pdf

[126] Office national de l'énergie. (2011). *Électricité - Mécanismes des marchés canadiens*. [En ligne]. Disponible: https://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmtn/prcng/lctrct/cndnmrkt-fra.html

[127] Microsoft. (2014, 5 mars 2014). *How much bandwidth does Skype need?* [En ligne]. Disponible: https://support.skype.com/en/faq/fa1417/how-much-bandwidth-does-skype-need

[128] V. C. Coroama, L. M. Hilty, E. Heiri et F. M. Horn, "The Direct Energy Demand of Internet Data Flows," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, n°. 5, p. 680-688, 2013.

[129] E. Maurice, T. Dandres, R. F. Moghaddam, K. K. Nguyen, Y. Lemieux, M. Cheriet et R. Samson. Modelling of Electricity Mix in Temporal Differentiated Life-Cycle-Assessment to Minimize Carbon Footprint of a Cloud Computing Service, Sweden [En ligne].

Disponible: http://www.atlantis-press.com/php/pub.php?publication=ict4s-14&frame=http%3A//www.atlantis-press.com/php/paper-details.php%3Fid%3D13453

[130] Ieso. (2014, 3 mars 2014). *Power to Ontario. On Demand. Genertor Output and Capability*. [En ligne]. Disponible: http://reports.ieso.ca/public/GenOutputCapability/

[131] A. Vajda et P. Stenström, "Multi-core processors," éd: Google Patents, 2014.

[132] F. F. Moghaddam, R. F. Moghaddam et M. Cheriet. Carbon Metering and Effective Tax Cost Modeling for Virtual Machines, communication présentée à Cloud Computing (CLOUD), 2012 IEEE 5th International Conference on, [En ligne]. Disponible: http://www.synchromedia.ca/system/files/Fereydoun_VMCMCTCM3.pdf

[133] Statistique Canada. (2014). *Tableau 127-0003 : Production de l'énergie électrique, réceptions, livraisons et disponibilité d'électricité mensuel (megawatt heure)*. [En ligne]. Disponible: http://www5.statcan.gc.ca/cansim/pick-choisir

[134] Ministère de l'Énergie en Ontario. (2014). *Vers un bilan équilibré - Le Plan énergétique à long terme de l'Ontario*. [En ligne]. Disponible: http://www.energy.gov.on.ca/docs/LTEP_2013_French_WEB.pdf

[135] M. Goedkoop, M. Margni et A. de Schryver, "The Ecoindicator 99 - A damage oriented method for life Cycle Assessment : methodology report," 2000. Disponible: http://teclim.ufba.br/jsf/indicadores/holan%20ecoindicator%2099.pdf

[136] USGS. (2012). *Mineral Commodity Summary*. [En ligne]. Disponible: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcs2011.pdf

[137] V. De Bruille, C. Bulle, O. Jolliet, T. Dandres, C. Gaudreault et R. Samson, "Introducing a competition index to evaluate impacts of metallic resources consumption for electric vehicles batteries based on functionality and substitutability," *Resources Conservation and Recycling*, Submitted in October 2014.

[138] Alberta Electric System Operator. (2014). *The power of possibility*. [En ligne]. Disponible: http://ets.aeso.ca/

[139] Ministère de l'Énergie et Ressources Naturelles du Québec. (2013). *Gros plan sur l'énergie : Production d'électricité*. [En ligne]. Disponible: http://www.mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-production-electricite.jsp

[140] M. Ángel Ávila Rosales et H. Gerardo. (2011). *TransAmerica Interconnections : Mexico strengthens and expands ties with the United States and Central America.* [En ligne]. Disponible: http://tdworld.com/overhead-transmission/transamerica-interconnections

[141] U.S. Energy Information Administration. (2014). *Electric Power Industry - U.S. Electricity Imports from and Electricity Exports to Canadaand Mexico, 2002-2012*. [En ligne]. Disponible: http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=mx

[142] T. Rehl, J. Lansche et J. Müller, "Life cycle assessment of energy generation from biogas—Attributional vs. consequential approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n°. 6, p. 3766-3775, 2012.

[143] P. Lesage, T. Ekvall, L. Deschênes et R. Samson, "Environmental Assessment of Brownfield Rehabilitation Using Two Different Life Cycle Inventory Models, Part 2 : Case Study," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12, n°. 7, p. 497-513, 2006.

[144] GIGABYTE. (2014). *X11 : Key features*. [En ligne]. Disponible: http://www.gigabyte.com/products/product-page.aspx?pid=4247#kf

[145] LDLC. (2014). *LDLC Bellone XM3-I7-16-H15S2*. [En ligne]. Disponible: http://www.ldlc.com/fiche/PB00165788.html

[146] C. Taylor et J. Koomey, "Estimating Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Internet Advertising," Working Paper Prepared for IMC2, 2008. Disponible: http://www.imc2.com/documents/carbonemissions.pdf

[147] D. Ong, T. Moors et V. Sivaraman, "Comparison of the energy, carbon and time costs of videoconferencing and in-person meetings," *Computer Communications*, vol. vol. 50, p. 86-94, 2014.

[148] V. C. Coroama et L. M. Hilty, "Assessing Internet energy intensity: A review of methods and results," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 45, p. 63-68, 2014.

[149] C. Borggren, A. Moberg, M. Rasanen et G. Finnveden, "Business meetings at a distance - decreasing greenhouse gas emissions and cumulative energy demand?," *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, p. 126-39, 2013.

[150] F. Schneider, F. Hinterberger, R. Mesicek et F. Luks, "ECO-INFO-SOCIETY: Strategies for an Ecological Information Society," *Sustainability in the Information Society*, 2001.

[151] K. Ichino Takahashi, M. Tsuda, J. Nakamura et S. Nishi. Estimation of Videoconference Performance: Approach for Fairer Comparative Environmental Evaluation of ICT Services, communication présentée à Electronics and the Environment, 2006. Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on, [En ligne]. Disponible: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1650078

[152] Y. Arushanyan, E. Ekener-Petersen et G. Finnveden, "Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services," *Computers in Industry*, vol. 65, n°. 2, p. 211-234, 2014.

[153] A. J. Shah, C. Yuan et C. E. Bash. Sources of variability in data center lifecycle assessment, communication présentée à Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2012 IEEE International Symposium on, [En ligne].

[154] F. Bitencourt de Oliveira, "Life cycle assessment of a high-density datacenter cooling system: TeliaSonera's Green Room Concept," KTH, Stockholm, 2012.

[155] S. Wang, "Further study of Life Cycle Assessment of a high density data center cooling system – Teliasonera's Green Room concept: identification of improvement possibilities using Life Cycle Assessment (LCA) and discussion about the effect of the choice of Life Cycle Impact Assessment (LCIA) methods on the results," KTH, Stockholm, 2013.

[156] B. Whitehead, R. Tozer, A. Shah, B. Kosik, G. Maidment, D. Andrews et A. Dun, "The Environmental Burden of Data Centres – A Screening LCA Methodology," communication présentée à, 2012.

ANNEXE A - MESURES FÉDÉRALES, PROVINCIALES ET TERRITORIALES PRISES EN CONSIDÉRATION DANS LA MODÉLISATION

Les différentes mesures fédérales, provinciales et territoriales prises en considération dans la modélisation sont disponibles dans le Tableau 7-1 directement tiré du rapport « Tendance en matière d'émission au Canada » [123].

Tableau 7-1 : mesures fédérales, provinciales et territoriales prises en considération dans la modélisation [123]

Mesures provinciales et territoriales	Mesures fédérales
Alberta - Règlement sur les émetteurs de gaz désignés (SGER) Colombie-Britannique - Taxe sur les émissions carboniques de la Colombie-Britannique - Exonérations fiscales sur les carburants renouvelables pour une teneur minimale en éthanol et en biodiesel - Règlement de la Colombie-Britannique sur la compensation des émissions - Règlement sur la gestion des gaz d'enfouissement Manitoba - Exonérations fiscales ou crédit d'impôt de la province sur les carburants renouvelables pour une teneur minimale en éthanol et en biodiesel Nouvelle-Écosse - Normes pour le portefeuille d'énergie renouvelable de la Nouvelle-Écosse pour la production d'électricité	- Norme de rendement pour la production d'électricité à partir du charbon - Modifications au Code du bâtiment pour les immeubles d'habitation afin d'accroître le rendement énergétique (ÉnerGuide-80 ou niveau R-2000) – ces modifications s'appliquent à toutes les provinces - Règlement sur le contenu en carburants renouvelables - Adoption du Code national du bâtiment du Canada de 2011, ou son équivalent, par toutes les provinces et tous les territoires, à l'exception des Territoires du Nord-Ouest, d'ici 2016 - Amélioration de l'efficacité des appareils commerciaux (sauf l'éclairage) - Amélioration de l'efficacité des appareils électroménagers (y compris les réfrigérateurs, les congélateurs, les cuisinières et les sécheuses) - Extension pour l'industrie du Programme d'économies d'énergie dans l'industrie canadienne (PEEIC), y compris des programmes de certification ISO et CSA

Tableau 7-1 : mesures fédérales, provinciales et territoriales prises en considération dans la modélisation [123] (suite)

Mesures provinciales et territoriales	Mesures fédérales
- Politiques de gestion axée sur la demande d'électricité pour la Nouvelle-Écosse - Stratégie de gestion des déchets solides et des ressources Ontario - Économies sur l'électricité résidentielle en période de pointe en Ontario (tarification au compteur horaire) - Programme de tarifs de rachat garantis de l'Ontario - Modifications au Code du bâtiment provincial pour les immeubles commerciaux aux fins d'amélioration de l'efficacité des processus - Règlement sur les gaz d'enfouissement (Règlement de l'Ontario 216/08 et 217/08) - Plan d'élimination du charbon en Ontario Québec - Remboursement ou crédit d'impôt sur les carburants renouvelables - Système de plafonnement et d'échange de la Californie, de la Western Climate Initiative et du Québec - Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre du Québec - Règlement sur les gaz d'enfouissement (Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles) Saskatchewan	- Première phase de normes d'émissions de gaz à effet de serre pour les véhicules légers (années de modèle 2011 à 2016) - Deuxième phase plus stricte de normes d'émissions de gaz à effet de serre pour les véhicules légers (années de modèle 2017 à 2025) - Règlement concernant les véhicules lourds afin de renforcer les normes sur les émissions de gaz à effet de serre provenant des véhicules lourds (années de modèle 2014 à 2018) - Le Programme d'écologisation des pâtes et papiers pour améliorer la performance environnementale des usines de traitement, y compris les réductions des émissions de gaz à effet de serre. Le programme a pris fin en 2012, mais il a donné lieu à une réduction continue des émissions. - Programme de retrait progressif de l'éclairage à incandescence

Tableau 7-1 : mesures fédérales, provinciales et territoriales prises en considération dans la modélisation [123] (suite)

Mesures provinciales et territoriales	Mesures fédérales
- Crédit d'impôt aux distributeurs de la province pour l'éthanol produit et consommé dans la province	

ANNEXE B - VALEURS DE LA DEMANDE DES SCÉNARIOS IMPLÉMENTÉS DANS LE MODÈLE E3MC

Les valeurs de la demande des scénarios implémentées dans le modèle E3MC sont présentées dans le Tableau 7-2.

Tableau 7-2 : valeurs de la demande électrique des scénarios implémentées dans le modèle E3MC

Année	Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3		Scénario 4		Scénario 5	
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
2015	25	219,15	25	219,15	25	219,15	25	219,15	50	438,3
2016	25	219,15	25	219,15	25	219,15	25	219,15	80	701,28
2017	25	219,15	25	219,15	25	219,15	50	438,3	110	964,26
2018	25	219,15	25	219,15	25	219,15	50	438,3	140	1227,24
2019	25	219,15	25	219,15	50	438,3	75	657,45	170	1490,22
2020	25	219,15	25	219,15	50	438,3	75	657,45	200	1753,2
2021	25	219,15	25	219,15	50	438,3	100	876,6	230	2016,18
2022	25	219,15	25	219,15	50	438,3	100	876,6	260	2279,16
2023	25	219,15	50	438,3	75	657,45	125	1095,75	290	2542,14
2024	25	219,15	50	438,3	75	657,45	125	1095,75	320	2805,12
2025	25	219,15	50	438,3	75	657,45	150	1314,9	350	3068,1
2026	25	219,15	50	438,3	75	657,45	150	1314,9	380	3331,08
2027	25	219,15	50	438,3	100	876,6	175	1534,05	410	3594,06
2028	25	219,15	50	438,3	100	876,6	175	1534,05	440	3857,04
2029	25	219,15	50	438,3	100	876,6	200	1753,2	470	4120,02
2030	25	219,15	50	438,3	100	876,6	200	1753,2	500	4383

ANNEXE C - RÉACTION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE DE L'ALBERTA, DU QUÉBEC ET DE L'ONTARIO À L'IMPLANTATION DE CENTRES DE DONNÉES

Les réactions du système électrique du Québec à l'implantation de centres de données pour le scénario 1,2 et 3, sont présentées respectivement dans les Figure 7-1, Figure 7-2 et Figure 7-3.

Figure 7-1 Réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour le scénario 1

Figure 7-2 Réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour le scénario 2

Figure 7-3 Réaction du Québec à l'implantation de centres de données pour le scénario 3

Les réactions du système électrique de l'Alberta à l'implantation de centres de données pour le scénario 2 et 4 sont présentées respectivement dans les Figure 7-4 et Figure 7-5.

Figure 7-4 Réaction de l'Alberta à l'implantation de centres de données pour le scénario 2

Figure 7-5 Réaction de l'Alberta à l'implantation de centres de données pour le scénario 4

Les réactions du système électrique de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 1, 2, 3 et 4 sont présentées respectivement dans les.

Figure 7-6 Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 1

Figure 7-7 Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 2

Figure 7-8 Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 3

Figure 7-9 Réaction de l'Ontario à l'implantation de centres de données pour le scénario 4

ANNEXE D - GÉNÉRALISATION DU CALCUL DES FAL

Les calculs du facteur d'allocation des serveurs lames pour la phase d'utilisation lorsque plus de 200% de capacité de CPU est utilisée est présenté dans le Tableau 7-3.

Tableau 7-3 : Calcul du facteur d'allocation des serveurs lames pour la phase d'utilisation lorsque plus de 200% de capacité de CPU est utilisée

	Scénario 1	**Scénario 2**	**Scénario 3**
Situation 6	la capacité nécessaire pour traiter les vidéoconférences est entre $n \times 100\%$ et $n \times 100\% + 70$ avec n **paire**		
c_T	$c_{T_i} = c_{VC_i}$ $avec\ i = 1, \dots, n$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-1$ $c_{T_n} = 0.7 \times 12 = 8.4$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-2$ $c_{T_{n-1/n}} = 0.7 \times 12 = 8.4$
Explication	Identique à la situation 1	Les n-1 premiers serveurs lames sont utilisées complètement et la virtualisation permet de partager uniquement la capacité du n^{ème} serveur lame.	Les n-2 premiers serveurs lames sont utilisées complètement, mais les la charge de travail des deux derniers serveurs lames est réparti équitablement entre celles-ci.
FAL	$FAL = n + 1$	$FAL = n + \frac{c_{VC_n}}{8.4}$	$FAL = n + \frac{c_{VC_{n-1}}}{8.4} + \frac{c_{VC_n}}{8.4}$
Situation 7	la capacité nécessaire pour traiter les vidéoconférences est entre $n \times 100\% + 70\%$ et $(n+1) \times 100$ avec n **paire**		
c_T	$c_{T_i} = c_{VC_i}$ $avec\ i = 1, \dots, n$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-1$ $c_{T_n} = c_{VC_n}$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-2$ $c_{T_{n-1/n}} = 0.7 \times 12 = 8.4$
Explication	Identique à la situation 6	Identique à la situation 2	Identique à la situation 2
FAL	$FAL = n + 1$	$FAL = n + 1$	$FAL = n + \frac{c_{VC_{n-1}}}{8.4} + \frac{c_{VC_n}}{8.4}$
Situation 8	la capacité nécessaire pour traiter les vidéoconférences est entre $(n+1) \times 100\%$ et $(n+1) \times 100 + 40\%$ avec n **paire**		
c_T	$c_{T_i} = c_{VC_i}$ $avec\ i = 1, \dots, n$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-1$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-2$

Tableau 7-3 : Calcul du facteur d'allocation des serveurs lames pour la phase d'utilisation lorsque plus de 200% de capacité de CPU est utilisée (suite)

	Scénario 1	**Scénario 2**	**Scénario 3**
		$c_{T_n} = 8.4$	$c_{T_{n-1/n}} = 0.7 \times 12 = 8.4$
Explication	Identique à la situation 6	Identique à la situation 3	Identique à la situation 3
FAL	$FAL = +2$	$FAL = n + 1 + \frac{c_{VC_2}}{8.4}$	$FAL = n + \frac{c_{VC_1}}{8.4} + \frac{c_{VC_2}}{8.4}$
Situation 9	la capacité nécessaire pour traiter les vidéoconférences est entre $(n+1) \times 100\% + 40\%$ et $(n+1) \times 100 + 70\%$ avec n **paire**		
nbc_T	$c_{T_i} = c_{VC_i}$ $avec\ i = 1, \dots, n$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-1$ $c_{T_n} = 8.4$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-2$ $c_{T_{n-1/n}} = c_{VC_{n-1/n}}$
Explication	Identique à la situation 6	Identique à la situation 4	Identique à la situation 4
FAL	$FAL = n + 2$	$FAL = n + 1 + \frac{c_{VC_2}}{8.4}$	$FAL = n + 2$
Situation 10	la capacité nécessaire pour traiter les vidéoconférences est entre $(n+1) \times 100\% + 70\%$ et $(n+2) \times 100$ avec n **paire**		
c_T	$c_{T_i} = c_{VC_i}$ $avec\ i = 1, \dots, n$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-1$ $c_{T_n} = c_{VC_n}$	$c_{T_i} = c_{VC_i} = 12$ $avec\ i = 1, \dots, n-2$ $c_{T_{n-1/n}} = c_{VC_{n-1/n}}$
Explication	Identique à la situation 4.	Identique à la situation 5.	Identique à la situation 5.
FAL	$FAL = n + 2$		

ANNEXE E - ÉMISSIONS ET MATIÈRES PREMIÈRES DU SERVICE DE VIDÉOCONFÉRENCES PAR CATÉGORIE D'IMPACT

Le Tableau 7-4 présente les substances responsables de la majorité des impacts des quatre catégories d'IMPACT2002+ pour le service de vidéoconférences.

Tableau 7-4 : Émissions et matières premières du service de vidéoconférences par catégorie d'impact

Changements climatique (kg CO2 eq)				**Santé humaine (DALY)**		
Substance	**Compartiment**	**Quantité**		**Substance**	**Compartiment**	**Quantité**
Total	/	3,18E+08		Total	/	3,05E+02
Reste	/	1,59E+06		Reste	/	4,15E+01
Dioxyde de carbone, fossil	Air	2,39E+08		Hydrocarbons, aromatic	Air	8,64E+01
Sulfur hexafluoride	Air	6,83E+07		Sulfur dioxide	Air	8,52E+01
Methane, fossil	Air	6,56E+06		Oxyde d'azote	Air	4,61E+01
Dinitrogen monoxide	Air	1,21E+06		Particulates, < 2,5 um	Air	3,29E+01
HFC-116	Air	9,74E+05		Arsenic	Water	1,25E+01
Qualité des écosystèmes (PDF*m2*année)				**Ressources (MJ primaire)**		
Substance	**Compartiment**	**Quantité**		**Substance**	**Compartiment**	**Quantité**
Total	/	9,36E+07		Total	/	7,57E+16
Reste	/	2,29E+07		Reste	/	1,21E+07
Aluminium	Air	4,83E+07		Uranium	Raw	4,19E+16
Cuivre	Air	8,93E+06		Gaz naturel/m3	Raw	1,72E+16
Cuivre	Soil	5,37E+06		Coal	Raw	1,13E+09
Phosphate	Water	4,52E+06		Pétrole brut	Raw	4,98E+15
Zinc	Air	3,53E+06		Tin	Raw	1,07E+07

ANNEXE F - RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DE L'INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION JOURNALIÈRE DES VIDÉOCONFÉRENCES

Les Figure 7-10, Figure 7-11 et Figure 7-12 présentent l'influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur respectivement l'impact sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources du système de serveurs.

Figure 7-10 : Influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur l'impact sur la santé humaine du système de serveurs

Figure 7-11 : Influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur l'impact sur la qualité des écosystèmes du système de serveurs

Figure 7-12 : Influence de la distribution journalière des vidéoconférences sur l'impact sur les ressources du système de serveurs

ANNEXE G - RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DE L'INFLUENCE DU NOMBRE DE VIDÉOCONFÉRENCES

Les Figure 7-13, Figure 7-14 et Figure 7-15 présentent l'influence du nombre de vidéoconférences sur respectivement l'impact sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources du système de serveurs.

Figure 7-13 : Influence du nombre de vidéoconférences sur l'impact santé humaine du système de serveurs

Figure 7-14 : Influence du nombre de vidéoconférences sur l'impact qualité des écosystèmes du système de serveurs

Figure 7-15 : Influence du nombre de vidéoconférences sur l'impact ressources du système de serveurs

ANNEXE H - RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DE L'INFLUENCE DE LA CHARGE DE TRAVAIL MOYENNE DES SERVEURS LAMES

Les Figure 7-16, Figure 7-17 et Figure 7-18 présentent l'influence de la charge moyenne des serveurs lames sur respectivement l'impact sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources du système de serveurs.

Figure 7-16 : Influence de la charge de travail moyenne des serveurs lames sur l'impact sur la santé humaine du système de serveurs

Figure 7-17 : Influence de la charge moyenne de travail des serveurs lames sur l'impact sur la qualité des écosystèmes du système de serveurs

Figure 7-18 : Influence de la charge de travail moyenne des serveurs lames sur l'impact sur les ressources du système de serveurs

ANNEXE I - RÉPARTITIONS GÉOGRAPHIQUES DES CENTRES DE DONNÉES OBTENUES DANS LE MODÈLE E3MC

Les répartitions géographiques obtenues avec le modèle E3MC pour chaque scénario et pour chaque année sont présentées dans le Tableau 7-5.

Tableau 7-5 : répartitions géographiques des centres de données obtenus dans le modèle E3MC

Demande énergétique des centres de données		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Scénario 1	Alberta	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%
	Québec	19%	19%	19%	19%	19%	19%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	Ontario	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	61%	61%	61%	61%
Scénario 2	Alberta	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	26%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
	Québec	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	23%
	Ontario	56%	56%	56%	56%	56%	56%	56%	56%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	53%	53%
Scénario 3	Alberta	26%	26%	26%	26%	25%	25%	25%	25%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	23%	23%
	Québec	23%	23%	22%	23%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	25%	25%	25%	25%
	Ontario	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%
Scénario 4	Alberta	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	24%	24%	24%	24%	23%	23%	23%	23%
	Québec	22%	22%	23%	23%	23%	24%	24%	24%	25%	25%	26%	26%	26%	26%	27%	27%
	Ontario	53%	53%	52%	52%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	50%	51%
Scénario 5	Alberta	25%	24%	23%	23%	23%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	21%	21%
	Québec	24%	24%	25%	25%	25%	26%	26%	26%	26%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	Ontario	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	51%	51%	51%	52%	52%	52%	52%

ANNEXE J - RÉSULTATS OBTENUS À PARTIR DU MODÈLE E3MC

Les résultats obtenus à partir du modèle E3MC sont présentés dans les deux tableaux ci-dessous. Le Tableau 7-6 présente directement les productions, par source énergétique, obtenues à partir du modèle et le Tableau 7-7 présente la différence entre la production de chaque scénario et du scénario de référence.

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC

Biomasse	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Alberta																
Scénario réf	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02
Scénario 1	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02
Scénario 2	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02
Scénario 3	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02
Scénario 4	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02
Scénario 5	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,6E+02	2,5E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,6E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02	2,7E+02
British Columbia																
Scénario réf	4,5E+01	4,5E+01	4,6E+01	4,7E+01	4,9E+01	5,6E+01	5,9E+01	5,4E+01	7,3E+01	7,8E+01	8,2E+01	8,8E+01	9,3E+01	9,8E+01	1,0E+02	1,1E+02
Scénario 1	4,5E+01	4,5E+01	4,6E+01	4,7E+01	4,9E+01	5,6E+01	5,9E+01	5,4E+01	7,3E+01	7,8E+01	8,2E+01	8,8E+01	9,3E+01	9,8E+01	1,0E+02	1,1E+02
Scénario 2	4,5E+01	4,5E+01	4,6E+01	4,7E+01	4,9E+01	5,6E+01	5,9E+01	5,4E+01	7,3E+01	7,8E+01	8,2E+01	8,8E+01	9,3E+01	9,8E+01	1,0E+02	1,1E+02
Scénario 3	4,5E+01	4,5E+01	4,6E+01	4,7E+01	4,9E+01	5,6E+01	5,9E+01	5,4E+01	7,3E+01	7,8E+01	8,2E+01	8,8E+01	9,3E+01	9,8E+01	1,0E+02	1,1E+02
Scénario 4	4,5E+01	4,5E+01	4,6E+01	4,7E+01	4,9E+01	5,6E+01	5,9E+01	5,4E+01	7,3E+01	7,8E+01	8,2E+01	8,8E+01	9,3E+01	9,8E+01	1,0E+02	1,1E+02
Scénario 5	4,5E+01	4,5E+01	4,6E+01	4,7E+01	4,9E+01	5,6E+01	5,9E+01	5,4E+01	7,3E+01	7,8E+01	8,2E+01	8,8E+01	9,3E+01	9,8E+01	1,0E+02	1,1E+02
Manitoba																
Scénario réf	2,1E-01	3,9E-01	5,6E-01	1,8E+00	2,4E+00	3,0E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,0E+00	3,5E+00	4,1E+00	4,8E+00	9,5E+00	1,1E+01
Scénario 1	2,1E-01	3,9E-01	5,6E-01	1,8E+00	2,4E+00	3,0E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,0E+00	3,5E+00	4,1E+00	4,8E+00	9,5E+00	1,1E+01
Scénario 2	2,1E-01	3,9E-01	5,6E-01	1,8E+00	2,4E+00	3,0E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,0E+00	3,5E+00	4,1E+00	4,8E+00	9,5E+00	1,1E+01
Scénario 3	2,1E-01	3,9E-01	5,6E-01	1,8E+00	2,4E+00	3,0E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,0E+00	3,5E+00	4,1E+00	4,8E+00	9,5E+00	1,1E+01
Scénario 4	2,1E-01	3,9E-01	5,6E-01	1,8E+00	2,4E+00	3,0E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,0E+00	3,5E+00	4,1E+00	4,8E+00	9,5E+00	1,1E+01
Scénario 5	2,1E-01	3,9E-01	5,6E-01	1,8E+00	2,4E+00	3,0E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,7E+00	4,5E+00	3,0E+00	3,5E+00	4,1E+00	8,3E+00	9,5E+00	1,1E+01

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

Ontario																
Scénario réf	6,9E+02	7,7E+02	1,1E+03	1,3E+03	1,3E+03	9,9E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,6E+03	1,6E+03
Scénario 1	6,9E+02	7,7E+02	1,2E+03	1,3E+03	1,3E+03	9,9E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,6E+03	1,6E+03
Scénario 2	6,9E+02	7,7E+02	1,2E+03	1,3E+03	1,3E+03	9,9E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,6E+03	1,6E+03
Scénario 3	6,9E+02	7,7E+02	1,2E+03	1,3E+03	1,3E+03	9,9E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,6E+03	1,6E+03
Scénario 4	6,9E+02	7,7E+02	1,2E+03	1,3E+03	1,3E+03	9,9E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,6E+03	1,6E+03
Scénario 5	6,9E+02	7,7E+02	1,3E+03	1,4E+03	1,4E+03	9,9E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,4E+03	1,6E+03	1,6E+03
Quebec																
Scénario réf	5,9E+01	6,4E+01	6,0E+01	6,3E+01	6,6E+01	9,3E+01	1,0E+02	1,2E+02	1,3E+02	1,5E+02	1,7E+02	1,9E+02	2,2E+02	2,5E+02	2,8E+02	3,2E+02
Scénario 1	5,9E+01	6,4E+01	6,0E+01	6,3E+01	6,6E+01	9,3E+01	1,0E+02	1,2E+02	1,3E+02	1,5E+02	1,7E+02	1,9E+02	2,2E+02	2,5E+02	2,8E+02	3,2E+02
Scénario 2	5,9E+01	6,4E+01	6,0E+01	6,3E+01	6,6E+01	9,3E+01	1,0E+02	1,2E+02	1,3E+02	1,5E+02	1,7E+02	1,9E+02	2,2E+02	2,5E+02	2,8E+02	3,2E+02
Scénario 3	5,9E+01	6,4E+01	6,0E+01	6,3E+01	6,6E+01	9,3E+01	1,0E+02	1,2E+02	1,3E+02	1,5E+02	1,7E+02	1,9E+02	2,2E+02	2,5E+02	2,8E+02	3,2E+02
Scénario 4	5,9E+01	6,4E+01	6,0E+01	6,3E+01	6,6E+01	9,3E+01	1,0E+02	1,2E+02	1,3E+02	1,5E+02	1,7E+02	1,9E+02	2,2E+02	2,5E+02	2,8E+02	3,2E+02
Scénario 5	5,9E+01	6,4E+01	6,0E+01	6,3E+01	6,6E+01	9,3E+01	1,0E+02	1,6E+02	1,3E+02	1,5E+02	1,7E+02	1,9E+02	2,2E+02	2,5E+02	2,8E+02	3,2E+02
US																
Scénario réf	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,2E+03	7,0E+03	7,6E+03	8,1E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,4E+03	8,7E+03
Scénario 1	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,2E+03	7,0E+03	7,6E+03	8,1E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,4E+03	8,7E+03
Scénario 2	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,2E+03	7,0E+03	7,6E+03	8,1E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,4E+03	8,7E+03
Scénario 3	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,2E+03	7,0E+03	7,6E+03	8,1E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,4E+03	8,7E+03
Scénario 4	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,2E+03	7,0E+03	7,6E+03	8,1E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,4E+03	8,7E+03
Scénario 5	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,2E+03	7,0E+03	7,6E+03	8,1E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,4E+03	8,7E+03
Charbon	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
US																
Scénario réf	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06
Scénario 1	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06
Scénario 2	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06
Scénario 3	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06
Scénario 4	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06
Scénario 5	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

Diesel	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Alberta																
Scénario réf	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,3E+01	2,2E+01	2,2E+01	2,1E+01	1,6E+01
Scénario 1	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,3E+01	2,2E+01	2,2E+01	2,1E+01	1,6E+01
Scénario 2	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,3E+01	2,2E+01	2,2E+01	2,1E+01	1,6E+01
Scénario 3	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,3E+01	2,2E+01	2,2E+01	2,1E+01	1,6E+01
Scénario 4	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,3E+01	2,2E+01	2,2E+01	2,1E+01	1,6E+01
Scénario 5	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,4E+01	2,3E+01	2,2E+01	2,2E+01	2,1E+01	1,6E+01
British Columbia																
Scénario réf	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01
Scénario 1	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01
Scénario 2	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01
Scénario 3	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01
Scénario 4	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01
Scénario 5	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01	6,8E+01
Manitoba																
Scénario réf	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	4,8E+01
Scénario 1	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	4,8E+01
Scénario 2	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	4,8E+01
Scénario 3	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	4,8E+01
Scénario 4	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	4,8E+01
Scénario 5	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	6,7E+01	4,8E+01
Ontario																
Scénario réf	1,4E+00	1,5E+00	1,5E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00
Scénario 1	1,4E+00	1,5E+00	1,5E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00
Scénario 2	1,4E+00	1,5E+00	1,5E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00
Scénario 3	1,4E+00	1,5E+00	1,5E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00
Scénario 4	1,4E+00	1,5E+00	1,5E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00
Scénario 5	1,4E+00	1,5E+00	1,5E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00	1,4E+00

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

Quebec																
Scénario réf	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 1	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 2	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 3	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 4	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 5	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Pétrole	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario réf	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 3	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 4	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 5	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
British Columbia																
Scénario réf	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 3	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 4	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 5	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Manitoba																
Scénario réf	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 3	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 4	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Scénario 5	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

Ontario																
Scénario réf	7,3E-02	3,5E+01	1,9E+01	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02
Scénario 1	7,3E-02	3,5E+01	2,0E+01	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02
Scénario 2	7,3E-02	3,5E+01	2,0E+01	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02
Scénario 3	7,3E-02	3,5E+01	2,0E+01	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02
Scénario 4	7,3E-02	3,5E+01	2,0E+01	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02
Scénario 5	7,3E-02	3,5E+01	2,3E+01	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02	7,3E-02
Quebec																
Scénario réf	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02
Scénario 1	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02
Scénario 2	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02
Scénario 3	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02
Scénario 4	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02
Scénario 5	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02	1,4E+02
US																
Scénario réf	2,8E+02	4,5E+02	6,2E+01	1,5E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,6E+01	1,3E+01	9,8E+00	1,3E+01	5,2E+01	5,2E+01	5,0E+01	5,0E+01	2,0E+01
Scénario 1	2,8E+02	4,5E+02	6,5E+01	1,5E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,6E+01	1,3E+01	9,8E+00	1,3E+01	5,2E+01	5,2E+01	5,0E+01	5,0E+01	2,0E+01
Scénario 2	2,8E+02	4,5E+02	6,5E+01	1,5E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,6E+01	1,3E+01	9,8E+00	1,3E+01	5,2E+01	5,2E+01	5,0E+01	5,0E+01	2,0E+01
Scénario 3	2,8E+02	4,5E+02	6,5E+01	1,5E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,6E+01	1,3E+01	9,8E+00	1,3E+01	5,2E+01	5,2E+01	5,0E+01	5,0E+01	2,0E+01
Scénario 4	2,8E+02	4,5E+02	6,7E+01	1,5E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,6E+01	1,3E+01	9,8E+00	1,3E+01	5,2E+01	5,2E+01	5,0E+01	5,0E+01	2,0E+01
Scénario 5	2,9E+02	4,7E+02	7,5E+01	1,5E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,3E+01	9,8E+00	1,3E+01	5,2E+01	5,2E+01	5,0E+01	5,0E+01	2,0E+01
Hydro	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario réf	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03
Scénario 1	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03
Scénario 2	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03
Scénario 3	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03
Scénario 4	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03
Scénario 5	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03	2,0E+03

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

British Columbia																
Scénario réf	5,8E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04
Scénario 1	5,8E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04
Scénario 2	5,8E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04
Scénario 3	5,8E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04
Scénario 4	5,8E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04
Scénario 5	5,8E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,0E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04	6,5E+04
Manitoba																
Scénario réf	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,8E+04	4,0E+04	4,1E+04	4,1E+04	4,8E+04	5,2E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04
Scénario 1	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,8E+04	4,0E+04	4,1E+04	4,1E+04	4,8E+04	5,2E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04
Scénario 2	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,8E+04	4,0E+04	4,1E+04	4,1E+04	4,8E+04	5,2E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04
Scénario 3	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,8E+04	4,0E+04	4,1E+04	4,1E+04	4,8E+04	5,2E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04
Scénario 4	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,8E+04	4,0E+04	4,1E+04	4,1E+04	4,8E+04	5,2E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04
Scénario 5	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,6E+04	3,8E+04	4,0E+04	4,1E+04	4,1E+04	4,8E+04	5,2E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04	5,3E+04
Ontario																
Scénario réf	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04
Scénario 1	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04
Scénario 2	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04
Scénario 3	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04
Scénario 4	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04
Scénario 5	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,8E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04	3,9E+04
Quebec																
Scénario réf	1,7E+05	1,7E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05
Scénario 1	1,7E+05	1,7E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05
Scénario 2	1,7E+05	1,7E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05
Scénario 3	1,7E+05	1,7E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05
Scénario 4	1,7E+05	1,7E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05
Scénario 5	1,7E+05	1,7E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05
US																

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

Scénario réf	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05
Scénario 1	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05
Scénario 2	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05
Scénario 3	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05
Scénario 4	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05
Scénario 5	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,5E+05
Gaz naturel	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario réf	7,0E+03	7,2E+03	8,3E+03	8,1E+03	9,1E+03	8,6E+03	9,5E+03	9,1E+03	9,2E+03	7,7E+03	8,0E+03	1,1E+04	1,5E+04	1,6E+04	2,0E+04	3,4E+04
Scénario 1	7,0E+03	7,2E+03	8,3E+03	8,1E+03	9,1E+03	8,6E+03	9,5E+03	9,1E+03	9,2E+03	7,7E+03	8,0E+03	1,1E+04	1,5E+04	1,6E+04	2,0E+04	3,4E+04
Scénario 2	7,0E+03	7,2E+03	8,3E+03	8,1E+03	9,1E+03	8,6E+03	9,5E+03	9,1E+03	9,3E+03	7,8E+03	8,0E+03	1,1E+04	1,5E+04	1,6E+04	2,0E+04	3,4E+04
Scénario 3	7,0E+03	7,2E+03	8,3E+03	8,1E+03	9,2E+03	8,7E+03	9,5E+03	9,1E+03	9,3E+03	7,8E+03	8,0E+03	1,1E+04	1,5E+04	1,6E+04	2,0E+04	3,4E+04
Scénario 4	7,0E+03	7,2E+03	8,3E+03	8,1E+03	9,2E+03	8,7E+03	9,5E+03	9,2E+03	9,3E+03	7,8E+03	8,1E+03	1,1E+04	1,5E+04	1,6E+04	2,0E+04	3,4E+04
Scénario 5	7,1E+03	7,3E+03	8,4E+03	8,2E+03	9,3E+03	8,8E+03	9,7E+03	9,3E+03	9,5E+03	8,0E+03	8,3E+03	1,2E+04	1,6E+04	1,7E+04	2,1E+04	3,4E+04
British Columbia																
Scénario réf	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03
Scénario 1	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03
Scénario 2	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03
Scénario 3	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03
Scénario 4	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03
Scénario 5	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03	1,1E+03
Manitoba																
Scénario réf	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	1,1E+02
Scénario 1	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	1,1E+02
Scénario 2	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	1,1E+02
Scénario 3	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	1,1E+02
Scénario 4	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	1,1E+02
Scénario 5	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	4,1E+01	1,1E+02

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

Ontario																
Scénario réf	2,3E+04	2,6E+04	2,7E+04	3,2E+04	3,1E+04	2,9E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,7E+04	2,7E+04	2,7E+04	2,8E+04	3,0E+04	3,2E+04	3,2E+04	3,3E+04
Scénario 1	2,3E+04	2,6E+04	2,7E+04	3,2E+04	3,1E+04	2,9E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,7E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,8E+04	3,0E+04	3,2E+04	3,2E+04	3,3E+04
Scénario 2	2,3E+04	2,6E+04	2,7E+04	3,2E+04	3,1E+04	2,9E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,7E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,9E+04	3,0E+04	3,2E+04	3,2E+04	3,3E+04
Scénario 3	2,3E+04	2,6E+04	2,7E+04	3,2E+04	3,1E+04	2,9E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,7E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,9E+04	3,0E+04	3,2E+04	3,2E+04	3,3E+04
Scénario 4	2,3E+04	2,6E+04	2,7E+04	3,2E+04	3,1E+04	2,9E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,7E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,9E+04	3,0E+04	3,2E+04	3,2E+04	3,3E+04
Scénario 5	2,3E+04	2,6E+04	2,7E+04	3,2E+04	3,1E+04	2,9E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,7E+04	2,7E+04	2,8E+04	2,9E+04	3,1E+04	3,3E+04	3,2E+04	3,4E+04
Québec																
Scénario réf	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 1	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 2	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 3	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 4	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
Scénario 5	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02	2,0E+02
US																
Scénario réf	7,5E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	9,6E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06
Scénario 1	7,5E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	9,6E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06
Scénario 2	7,5E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	9,6E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06
Scénario 3	7,5E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	9,6E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06
Scénario 4	7,5E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	9,6E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06
Scénario 5	7,5E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	9,6E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06
Autre	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario réf	3,5E+03	3,5E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,0E+03	4,0E+03	4,1E+03	4,1E+03
Scénario 1	3,5E+03	3,5E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,0E+03	4,0E+03	4,1E+03	4,1E+03
Scénario 2	3,5E+03	3,5E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,0E+03	4,0E+03	4,1E+03	4,1E+03
Scénario 3	3,5E+03	3,5E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,0E+03	4,0E+03	4,1E+03	4,1E+03
Scénario 4	3,5E+03	3,5E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,9E+03	3,9E+03	4,0E+03	4,0E+03	4,1E+03	4,1E+03
Scénario 5	3,5E+03	3,5E+03	3,6E+03	3,6E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,8E+03	3,9E+03	4,0E+03	4,0E+03	4,0E+03	4,1E+03	4,1E+03

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

British Columbia																
Scénario réf	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03
Scénario 1	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03
Scénario 2	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03
Scénario 3	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03
Scénario 4	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03
Scénario 5	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,6E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03	1,7E+03
Manitoba																
Scénario réf	8,5E+02	8,6E+02	8,6E+02	8,7E+02	8,8E+02	8,8E+02	8,9E+02	9,0E+02	9,1E+02	9,2E+02	9,3E+02	9,5E+02	9,6E+02	9,8E+02	1,0E+03	1,0E+03
Scénario 1	8,5E+02	8,6E+02	8,6E+02	8,7E+02	8,8E+02	8,8E+02	8,9E+02	9,0E+02	9,1E+02	9,2E+02	9,3E+02	9,5E+02	9,6E+02	9,8E+02	1,0E+03	1,0E+03
Scénario 2	8,5E+02	8,6E+02	8,6E+02	8,7E+02	8,8E+02	8,8E+02	8,9E+02	9,0E+02	9,1E+02	9,2E+02	9,3E+02	9,5E+02	9,6E+02	9,8E+02	1,0E+03	1,0E+03
Scénario 3	8,5E+02	8,6E+02	8,6E+02	8,7E+02	8,8E+02	8,8E+02	8,9E+02	9,0E+02	9,1E+02	9,2E+02	9,3E+02	9,5E+02	9,6E+02	9,8E+02	1,0E+03	1,0E+03
Scénario 4	8,5E+02	8,6E+02	8,6E+02	8,7E+02	8,8E+02	8,8E+02	8,9E+02	9,0E+02	9,1E+02	9,2E+02	9,3E+02	9,5E+02	9,6E+02	9,8E+02	1,0E+03	1,0E+03
Scénario 5	8,5E+02	8,6E+02	8,6E+02	8,7E+02	8,8E+02	8,8E+02	8,9E+02	9,0E+02	9,1E+02	9,2E+02	9,3E+02	9,5E+02	9,6E+02	9,8E+02	1,0E+03	1,0E+03
Ontario																
Scénario réf	6,8E+03	7,4E+03	8,0E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,3E+03	8,4E+03	8,5E+03	8,6E+03	8,7E+03	8,7E+03	8,8E+03	8,9E+03	9,0E+03	9,1E+03	9,2E+03
Scénario 1	6,8E+03	7,4E+03	8,0E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,3E+03	8,4E+03	8,5E+03	8,6E+03	8,7E+03	8,7E+03	8,8E+03	8,9E+03	9,0E+03	9,1E+03	9,2E+03
Scénario 2	6,8E+03	7,4E+03	8,0E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,3E+03	8,4E+03	8,5E+03	8,6E+03	8,7E+03	8,7E+03	8,8E+03	8,9E+03	9,0E+03	9,1E+03	9,2E+03
Scénario 3	6,8E+03	7,4E+03	8,0E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,3E+03	8,4E+03	8,5E+03	8,6E+03	8,7E+03	8,7E+03	8,8E+03	8,9E+03	9,0E+03	9,1E+03	9,2E+03
Scénario 4	6,8E+03	7,4E+03	8,0E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,3E+03	8,4E+03	8,5E+03	8,6E+03	8,7E+03	8,7E+03	8,8E+03	8,9E+03	9,0E+03	9,1E+03	9,2E+03
Scénario 5	6,8E+03	7,4E+03	8,0E+03	8,1E+03	8,2E+03	8,3E+03	8,4E+03	8,5E+03	8,6E+03	8,7E+03	8,7E+03	8,8E+03	8,9E+03	9,0E+03	9,1E+03	9,2E+03
Québec																
Scénario réf	6,2E+03	6,3E+03	6,4E+03	6,6E+03	6,8E+03	7,1E+03	7,4E+03	7,7E+03	8,1E+03	8,5E+03	9,0E+03	9,5E+03	1,0E+04	1,1E+04	1,1E+04	1,2E+04
Scénario 1	6,2E+03	6,3E+03	6,4E+03	6,6E+03	6,8E+03	7,1E+03	7,4E+03	7,7E+03	8,1E+03	8,5E+03	9,0E+03	9,5E+03	1,0E+04	1,1E+04	1,1E+04	1,2E+04
Scénario 2	6,2E+03	6,3E+03	6,4E+03	6,6E+03	6,8E+03	7,1E+03	7,4E+03	7,7E+03	8,1E+03	8,5E+03	9,0E+03	9,5E+03	1,0E+04	1,1E+04	1,1E+04	1,2E+04
Scénario 3	6,2E+03	6,3E+03	6,4E+03	6,6E+03	6,8E+03	7,1E+03	7,4E+03	7,7E+03	8,1E+03	8,5E+03	9,0E+03	9,5E+03	1,0E+04	1,1E+04	1,1E+04	1,2E+04
Scénario 4	6,2E+03	6,3E+03	6,4E+03	6,6E+03	6,8E+03	7,1E+03	7,4E+03	7,7E+03	8,1E+03	8,5E+03	9,0E+03	9,5E+03	1,0E+04	1,1E+04	1,1E+04	1,2E+04
Scénario 5	6,2E+03	6,3E+03	6,4E+03	6,6E+03	6,8E+03	7,1E+03	7,4E+03	7,7E+03	8,1E+03	8,5E+03	9,0E+03	9,5E+03	1,0E+04	1,1E+04	1,1E+04	1,2E+04
US																

Tableau 7-6 : Résultats du modèle E3MC (suite)

Scénario réf	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,7E+05
Scénario 1	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,7E+05
Scénario 2	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,7E+05
Scénario 3	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,7E+05
Scénario 4	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,7E+05
Scénario 5	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,7E+05

Tableau 7-7 : Différence entre les scénarios 1 à 5 et le scénario de référence

Biomasse	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
Ontario																
Scénario 1	0,0	0,0	36,4	39,1	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	36,3	36,3	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	30,3	30,3	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	57,4	57,4	30,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	130,0	163,6	145,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	299,5	0,0	0,0
Québec																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 7-7 : Différence entre les scénarios 1 à 5 et le scénario de référence (suite)

Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
US																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,4	0,3
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	0,4	0,5	0,8	0,8	0,8
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	1,2	0,7	1,1	1,9	1,8	1,8
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	2,4	1,5	1,9	3,5	3,9	1,4
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	5,3	4,3	2,7	3,1	6,6	9,6	7,6
Total																
Scénario 1	0,0	0,0	36,4	39,1	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,4	0,3
Scénario 2	0,0	0,0	36,3	36,3	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	0,4	0,5	0,8	0,8	0,8
Scénario 3	0,0	0,0	30,3	30,3	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	1,2	0,7	1,1	1,9	1,8	1,8
Scénario 4	0,0	0,0	57,5	57,4	30,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	2,4	1,5	1,9	3,5	3,9	1,5
Scénario 5	0,0	0,0	130,0	163,6	145,6	0,2	0,1	38,5	0,2	5,4	4,4	2,9	3,3	306,4	9,8	7,9
Charbon	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
US																
Scénario 1	38,4	91,1	35,4	52,2	78,1	88,8	96,7	96,2	98,7	99,1	84,6	81,8	81,7	79,3	87,4	86,6
Scénario 2	36,9	90,9	35,6	57,6	80,6	93,9	91,7	98,6	160,8	159,1	136,2	130,5	130,4	127,9	134,9	129,8
Scénario 3	35,3	78,8	29,8	51,9	132,2	163,8	164,0	172,5	246,9	251,6	203,9	200,3	272,2	267,4	268,8	266,1
Scénario 4	36,1	82,0	56,4	98,2	168,5	231,4	313,2	321,6	402,0	402,3	399,3	389,5	461,9	462,0	532,2	447,5
Scénario 5	65,8	241,7	130,5	315,9	348,0	693,1	798,3	891,6	840,8	1143,4	916,6	993,5	1088,8	872,8	1329,6	1149,1
Diesel	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ontario																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 7-7 : Différence entre les scénarios 1 à 5 et le scénario de référence (suite)

Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Québec																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2
Total																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2
Pétrole	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Québec																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
US																
Scénario 1	1,5	7,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	1,7	7,2	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	1,7	6,3	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	1,7	6,8	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 5	3,4	19,6	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 7-7 : Différence entre les scénarios 1 à 5 et le scénario de référence (suite)

Total																
Scénario 1	1,5	7,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	1,7	7,2	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	1,7	6,3	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	1,7	6,8	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Scénario 5	3,4	19,6	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Hydro	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
Ontario																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Québec																
Scénario 1	0,0	0,1	12,2	0,0	-0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,2	0,1	12,1	12,5	12,5
Scénario 2	0,0	0,1	12,2	-0,3	-0,3	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2	0,0	0,2	-0,2	24,5	24,8	27,1
Scénario 3	0,0	0,0	14,8	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,2	-0,1	56,8	57,1	59,4
Scénario 4	0,0	0,0	27,3	0,1	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,1	104,2	124,2	324,0
Scénario 5	-0,1	0,1	66,8	-0,2	-0,1	0,1	0,0	-0,1	280,9	0,0	281,0	281,1	281,0	484,0	303,5	522,9
US																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 7-7 : Différence entre les scénarios 1 à 5 et le scénario de référence (suite)

Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Total																
Scénario 1	0,0	0,1	12,2	0,0	-0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,2	0,1	12,1	12,6	12,5
Scénario 2	0,0	0,1	12,2	-0,4	-0,3	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	0,0	0,4	-0,2	24,5	24,8	27,1
Scénario 3	0,0	0,0	14,8	-0,1	0,1	0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,5	-0,1	56,8	57,1	59,4
Scénario 4	0,0	0,0	27,3	0,1	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	104,2	124,3	324,0
Scénario 5	-0,1	0,1	66,8	-0,3	-0,1	0,1	0,5	0,4	281,3	0,4	281,4	281,5	281,3	484,3	303,9	523,3
Gaz naturel	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario 1	30,2	-27,9	-25,0	-18,7	-14,2	-12,9	-8,3	-4,0	-2,8	-1,5	0,1	4,9	8,6	11,6	12,8	15,1
Scénario 2	35,2	-22,3	-18,7	-12,4	-8,2	-6,4	-4,3	-0,6	36,7	35,2	36,9	55,6	60,4	60,4	63,6	66,0
Scénario 3	35,2	-22,3	-18,7	-12,4	24,3	26,4	28,6	31,8	69,6	65,5	66,9	98,3	147,3	147,4	150,1	152,4
Scénario 4	35,6	-22,3	14,8	23,6	32,3	37,7	74,5	79,4	117,7	110,0	145,3	208,9	264,1	261,5	311,4	313,7
Scénario 5	63,0	34,7	83,4	133,6	146,0	194,0	245,5	234,3	283,1	304,0	359,8	549,9	619,1	675,6	734,2	788,6
Ontario																
Scénario 1	39,0	0,0	0,9	64,8	65,1	57,5	47,8	55,3	45,2	45,2	45,1	45,6	54,4	38,9	46,1	46,1
Scénario 2	38,1	0,0	0,9	63,9	62,7	55,5	47,8	52,6	68,8	68,3	68,7	67,7	79,3	57,9	69,3	68,3
Scénario 3	31,3	0,0	0,8	54,1	100,0	88,8	75,0	86,2	102,7	103,2	103,6	102,5	160,4	113,8	137,1	137,5
Scénario 4	35,3	0,0	1,1	100,3	143,8	123,1	138,9	161,8	163,8	163,8	198,7	196,6	271,0	190,1	266,0	265,3
Scénario 5	59,9	0,0	3,0	288,2	344,6	327,2	345,4	466,9	414,8	458,0	501,2	544,1	692,0	514,6	672,9	951,8
Québec																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2
US																

Tableau 7-7 : Différence entre les scénarios 1 à 5 et le scénario de référence (suite)

Scénario 1	130,1	78,0	80,2	3,5	16,3	15,4	27,2	23,4	31,9	35,9	37,2	39,8	29,7	42,7	39,1	36,9
Scénario 2	131,2	80,6	87,8	9,0	23,2	20,7	32,7	28,8	76,5	80,7	82,4	68,4	54,5	77,3	66,8	66,9
Scénario 3	123,5	73,7	78,4	9,0	69,4	56,2	74,9	67,8	124,7	133,4	134,0	106,8	118,2	165,2	139,7	142,1
Scénario 4	127,7	81,0	161,7	34,6	97,5	82,9	149,1	126,1	206,9	217,0	269,9	209,2	205,7	291,1	281,6	174,3
Scénario 5	236,3	288,7	399,0	154,1	290,4	321,5	374,8	358,2	396,7	612,1	549,2	465,2	398,4	671,0	709,2	602,2
Total																
Scénario 1	199,4	50,1	56,1	49,6	67,1	60,0	66,7	74,7	74,3	79,5	82,5	90,2	92,7	93,2	98,1	98,1
Scénario 2	204,5	58,3	70,0	60,5	77,8	69,8	76,2	80,8	182,0	184,3	188,1	191,7	194,2	195,6	199,7	201,2
Scénario 3	190,0	51,4	60,5	50,7	193,6	171,3	178,6	185,8	297,0	302,1	304,5	307,7	425,9	426,5	426,9	431,9
Scénario 4	198,6	58,7	177,6	158,5	273,7	243,7	362,4	367,2	488,4	490,7	613,8	614,6	740,8	742,8	859,0	753,4
Scénario 5	359,2	323,4	485,5	575,9	781,1	842,8	965,7	1059,4	1094,6	1374,1	1410,3	1559,2	1709,5	1861,3	2116,5	2342,7
Autre	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Alberta																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,3
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	4,2	34,4	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,6	4,8	5,0	5,3
Ontario																
Scénario 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Scénario 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1
Québec																
Scénario 1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,4
Scénario 2	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,9	1,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,2	2,3
Scénario 4	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	4,7	1,8

Tableau 7-7 : Différence entre les scénarios 1 à 5 et le scénario de référence (suite)

Scénario 5	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	8,4	13,1	11,9
US																
Scénario 1	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,2	0,1	0,1	0,1	-0,1	0,0	0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
Scénario 2	0,0	0,0	0,2	0,0	-0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	-0,1	0,1	0,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,1	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	-0,1	0,0	0,2	0,0
Scénario 4	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1
Scénario 5	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2
Total																
Scénario 1	0,0	0,0	0,3	0,0	-0,2	0,1	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,2	-0,1	0,0	0,5	0,5	0,4
Scénario 2	0,0	0,0	0,5	0,0	-0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,9	1,0	1,0
Scénario 3	0,0	0,0	0,4	0,0	-0,1	0,1	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	2,2	2,5	2,5
Scénario 4	0,0	-0,1	0,7	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	4,1	5,0	2,2
Scénario 5	-0,1	-0,1	1,7	0,0	4,1	4,2	34,4	4,3	4,1	4,2	4,4	4,8	5,0	13,3	18,3	21,5
Total	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Scénario 1	239,3	148,4	143,8	140,8	147,1	149,0	163,5	170,9	172,9	178,8	167,6	172,3	174,7	185,5	199,0	197,8
Scénario 2	243,1	156,4	158,0	154,1	160,1	163,8	167,8	179,3	342,6	343,9	325,1	323,0	325,0	349,7	361,1	359,9
Scénario 3	227,1	136,5	139,0	132,9	331,7	335,4	342,4	358,3	543,8	554,9	509,8	509,3	699,1	754,8	757,2	761,8
Scénario 4	236,3	147,3	325,1	314,2	472,2	475,3	675,6	688,7	890,4	895,0	1015,8	1006,1	1204,8	1316,6	1524,6	1528,6
Scénario 5	428,2	584,7	827,6	1055,2	1278,6	1540,4	1799,0	1995,6	2220,9	2527,5	2617,0	2841,9	3088,0	3538,4	3778,5	4044,8