

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DU CARBONE ÉCOSYSTÉMIQUE DANS
LE CADRE DU SYSTÈME DE COMPTABILITÉ ÉCONOMIQUE ET
ENVIRONNEMENTALE POUR LE QUÉBEC MÉRIDIONAL

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE SUR MESURE EN DÉVELOPPEMENT

DURABLE ET CONSERVATION DES RESSOURCES

NATURELLES ET RENOUVELABLES

PAR

JEOFFREY AUCLAIR

DÉCEMBRE 2018

REMERCIEMENTS

La réalisation de mon mémoire de maîtrise a été rendue possible grâce à la collaboration de plusieurs acteurs. J'aimerais d'abord remercier mon directeur, M. Jérôme Dupras qui m'a grandement épaulé en me donnant des conseils éclairés tout au long de mon projet de recherche et qui m'a offert l'opportunité de travailler sur plusieurs contrats qui m'ont permis de me développer une expertise considérable dans le domaine de l'évaluation économique des services écosystémiques. J'aimerais également remercier MM. Didier Babin et Jean-Louis Weber qui m'ont offert, entre autres, l'opportunité de participer à une école d'été sur la comptabilité écosystémique du capital naturel qui a grandement étoffé mes connaissances et ma compréhension des outils qui ont été nécessaires à la réalisation de ce projet. J'aimerais de plus remercier Mme Stéphanie Uhde et M. Maxime Keith de l'Institut de la statistique du Québec qui m'ont partagé leur jeu de données sur les Comptes des terres du Québec méridional et qui m'a servi de base pour la production de mes résultats. Je tiens finalement à remercier chacun des nombreux experts des différents organismes que j'ai contactés tout au long de ce projet de recherche. Sans leur soutien et leurs recommandations, il m'aurait été impossible de colliger un jeu de données aussi complet et précis que celui qui a permis de réaliser ce projet de recherche

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	vii
RÉSUMÉ	viii
CHAPITRE I	1
INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 État des connaissances	5
1.2.1 Les services écosystémiques	6
1.2.2 Cycle du carbone et principales sources d'émissions	11
1.2.3 Cadre central du Système de comptabilité économique et environnementale	12
1.2.4 Trousse de démarrage rapide des Comptes Écosystémiques du Capital Naturel et autres cadres de comptabilité du carbone	15
1.2.5 Recherches effectuées dans le domaine au Canada et au Québec	16
1.3 Objectifs et questions de recherche	18
CHAPITRE II	21
ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DU CARBONE ÉCOSYSTÉMIQUE DANS LE CADRE DU SYSTÈME DE COMPTABILITÉ ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE POUR LE QUÉBEC MÉRIDIONAL	21
Résumé	22
2.1 Introduction	23

2.2 Méthodologie	26
2.2.1 Zone à l'étude et période d'analyse	26
2.2.2 Cadre de travail	28
2.2.3 Sources et traitements de données	31
2.3 Résultats	37
2.3.1 Comptes sur les milieux forestiers	38
2.3.2 Comptes sur les milieux humides	41
2.3.3 Comptes sur les milieux agricoles	43
2.3.4 Autres comptes	45
2.4 Discussion	46
2.5 Conclusion	51
CHAPITRE III	53
DISCUSSION ET CONCLUSION	53
ANNEXES	59
BIBLIOGRAPHIE	69

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
2.1	Localisation de la zone étudiée.....	27
2.2	Modèle permettant la compilation des données des comptes proposées par la TDR-CECN.....	30
2.3	Répartition des stocks de carbone total des milieux forestiers par MRC et par km ² pour la période 2000-2010.....	40
2.4	Répartition annuelle moyenne du carbone extrait des récoltes de bois par MRC et par km ² pour la période 2000-2010.....	40
2.5	Répartition des stocks de carbone total des milieux humides par MRC et par km ² pour la période 2000-2010.....	42
2.6	Répartition du carbone extrait des cultures agricoles par MRC pour la période 2000-2010.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	Superficie des différents types d'utilisation du sol des Comptes des terres pour la période d'ouverture.....	28
2.2	Stocks et flux de carbone entre 2000 et 2010 dans les milieux forestiers du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN.....	39
2.3	Stocks et flux de carbone entre 2000 et 2010 dans les milieux humides du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN.....	42
2.4	Stocks et flux de carbone entre 2000 et 2010 dans les milieux agricoles du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN.....	44
2.5	Stocks et flux de carbone entre 2000 et 2010 dans les milieux humides du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN.....	45

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CECN	Comptabilisation écosystémique du capital naturel
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
ISQ	Institut de la statistique du Québec
MEA	Millennium ecosystem assessment
MRC	Municipalité régionale de comté
PIB	Produit intérieur brut
PPB	Production primaire brute
PPN	Production primaire nette
SCEE	Système de comptabilité environnementale et économique
SE	Service écosystémique
SCN	Système de comptabilité nationale
TDR-CECN	Trousse de démarrage rapide des Comptes Écosystémiques du Capital Naturel

RÉSUMÉ

Les écosystèmes fournissent de nombreux bénéfices matériels et immatériels qui participent à la régulation des systèmes naturels, à la culture et aux systèmes économiques. Ces bénéfices, définis comme étant des services écosystémiques (SE), ne sont pas représentés dans les systèmes de comptabilité nationale traditionnels (e.g PIB) et ne sont souvent pas considérés par les décideurs. Pourtant, l'analyse des SE peut donner des informations pertinentes pouvant aider à la prise de décisions en aménagement du territoire. De surcroît, le recours au concept de SE est d'actualité en ce qui a trait aux politiques publiques environnementales. Suivant cette tendance, le Gouvernement du Québec a développé un jeu de données servant de base à l'évaluation des SE selon le Système de comptabilité environnementale et économique (SCEE). Toutefois, des recherches sont requises afin de permettre l'application des comptes expérimentaux du SCEE au Québec. Allant en ce sens, l'objectif de ce projet consiste à dresser un premier portrait de comptes expérimentaux du carbone du Québec méridional. La méthodologie utilisée repose principalement sur la trousse de démarrage rapide des Comptes Écosystémiques du Capital Naturel du Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique. Plus précisément, ce guide définit une procédure relativement précise permettant l'implémentation des comptes expérimentaux du SCEE. Les résultats obtenus par le présent projet de recherche permettent de caractériser plusieurs des comptes du carbone du Québec méridional pour la période 2000-2010. Notamment, il a été estimé que les milieux forestiers du Québec méridional stockent 5 124 Mt de carbone, tandis que ceux des milieux humides en stockent 6 598 Mt. D'autres estimations ont démontré que les coupes forestières ont retiré 13,7 Mt de carbone annuellement des milieux forestiers et que les récoltes provenant des cultures agricoles possédaient en moyenne 2,7 Mt de carbone annuellement. Il a finalement été démontré que ces résultats peuvent être répartis spatialement en municipalité régionale de comté. Ces résultats pourront contribuer à l'orientation de politiques de gestion des ressources naturelles et de lutte contre les changements climatiques. Toutefois, beaucoup de travail reste à accomplir. Effectivement, cette recherche prend également son importance du fait qu'elle met la table à de futurs projets de recherche en identifiant les données manquantes et des limites dans les données utilisées.

MOTS-CLÉS : Carbone; comptabilité écosystémique; économie écologique; Québec méridional; services écosystémiques; système de comptabilité environnementale et économique (SCEE).

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Problématique

Les services écosystémiques (SE) représentent l'ensemble des bénéfices que les êtres humains retirent des écosystèmes (MEA, 2005). Ces services peuvent autant s'exercer d'un point de vue de soutien aux activités économiques en fournissant, par exemple, des ressources naturelles et énergétiques, que par un soutien du bien-être de la population en offrant des services tels la régulation du climat et l'approvisionnement en eau (Daily, 1997; MEA, 2005; TEEB, 2010). La capacité de la nature à fournir des SE de façon pérenne est toutefois limitée. En effet, les dernières décennies ont été marquées par un accroissement des préoccupations quant à la stabilité de notre système économique étant donné la rareté grandissante des ressources naturelles et l'érosion qualitative et quantitative des SE (MEA, 2005; Rockström et al., 2009). Ce sont les activités humaines qui sont les grandes responsables de cette tendance puisqu'elles engendrent une pression environnementale qui mène à la dégradation des écosystèmes et à l'épuisement des ressources naturelles (Obst et Vardon, 2014). De façon plus spécifique, ces activités génèrent des problèmes préoccupants tels les changements climatiques, la dégradation de la qualité des eaux et l'extinction des espèces (MEA, 2005). Si aucune mesure concrète n'est adoptée, autant aux échelles locales que globales, les pressions faites par l'être humain sur les écosystèmes pourraient créer un état d'instabilité environnementale tel que le bien-être et le développement de nos sociétés en seraient menacés (Steffen et al., 2004; Rockström et al., 2009; Obst et Vardon, 2014). Étant

donné l'ampleur des enjeux, l'importance de la protection des écosystèmes afin d'assurer la qualité de vie de nos sociétés est de plus en plus reconnue internationalement (MEA, 2005; TEEB, 2010; SEEA-CF, 2012).

Bien sûr, cette problématique est complexe et plusieurs facteurs tels la croissance de la population, l'accroissement des capacités de production et les habitudes de consommation peuvent être mis en cause (Obst, 2015). Parmi ceux-ci, le manque d'information entourant la gestion du capital naturel est celui sur lequel repose le présent projet de recherche. En effet, la valeur et l'importance des processus naturels sont très peu représentées dans les systèmes économiques (MEA, 2005; TEEB, 2010; SEEA-CF, 2012). À une échelle nationale, cela vient notamment du fait que le Système de comptabilité nationale (SCN), un cadre comptable largement utilisé à l'échelle mondiale, ne prend pas en compte ce type d'information (Obst, 2015). Le SCN existe depuis plus d'un demi-siècle et sert de standard afin de mesurer les activités économiques d'un pays (SEEA-CF, 2012). Les indicateurs qu'il permet de produire, dont le produit intérieur brut (PIB), sont communément utilisés dans les processus de prise de décision et l'élaboration de politiques (Stoneham 2012, Obst 2014, Robinson 2014). Bien que le SCN insiste sur le fait que les indicateurs qu'il produit reflètent des indices de marchés et non des indices de bien-être social (SCN, 2008), ces indices sont souvent utilisés comme des mesures de bien-être (Obst et Vardon, 2014).

D'un point de vue environnemental, la dégradation de l'environnement et l'épuisement du capital naturel, par exemple, ne sont pas pris en compte par le SCN, même s'ils peuvent avoir une influence sur le bien-être de la société (Harris et Fraser, 2002). Ainsi l'élaboration de stratégies nationales et de politiques publiques est basée sur des sources d'information incomplètes. Les décideurs et autres parties prenantes doivent alors supposer, ou simplement ignorer, la valeur des SE afin de prendre leurs décisions (Costanza et al., 2014), ce qui les mène nécessairement à prendre des

orientations sous-optimales, autant pour la société que l'environnement. Pourtant, il serait possible de prendre de meilleures décisions en aménagement du territoire et en gestion des ressources naturelles si les décideurs pouvaient compter sur de l'information transparente concernant la valeur des écosystèmes (MEA, 2005; Costanza et al., 2014).

Plusieurs indicateurs de progrès social utilisant des facteurs de nature non économique, tels l'indice de développement humain et l'indicateur de progrès véritable, ont été développés depuis plusieurs années afin de tenter d'apporter de nouvelles sources d'information aux décideurs (Kubiszewski et al., 2013). Toutefois, aucun de ces indicateurs n'a réussi à remplacer le PIB comme indicateur principal pour le développement de politiques publiques (Obst, 2015). Cela s'explique en partie par le fait que les indicateurs proposés jusqu'à maintenant ne possédaient pas les mécanismes de vérifications et de balancement que permettent d'avoir les indicateurs produits dans le cadre du SCN (Obst, 2015). Afin de pallier à ces lacunes, le Système de comptabilité économique et environnementale (SCEE) a été mis sur pied. Plus spécifiquement, ce cadre comptable a pour objectif de produire de l'information concernant le suivi et la gestion du capital naturel (SEEA-CF, 2012). De plus, il propose une structure s'apparentant à celle utilisée par le SCN dans le but de pouvoir éventuellement s'y intégrer (SEEA-CF, 2012). Cela s'inscrit dans une lignée où il y a de plus en plus d'intérêt envers les approches de comptabilités environnementales (Obst et Vardon, 2014; SEEA-CF, 2012). De plus, ce type de comptabilité est considéré comme un moyen prometteur pour permettre l'intégration des SE dans les comptes nationaux (Edens et Graveland, 2013), à un tel point que certains estiment qu'il pourrait éventuellement remplacer les indicateurs traditionnels comme le PIB (Costanza et al., 2014).

Le SCEE propose plus spécifiquement, dans son cadre central, les lignes directrices d'une démarche standardisée portant sur la comptabilisation écosystémique du capital

naturel (CECN). Cette comptabilisation est réalisée à l'aide de plusieurs comptes qui décrivent les stocks et les flux des différents actifs naturels que possède une région donnée, ainsi que l'utilisation des ressources et les activités de protections environnementales qui y sont réalisées par l'humanité (SEEA-CF, 2012). Comme le SCEE est relativement récent, son cadre central ne décrit que de façon sommaire les éléments qui doivent être comptabilisés et ne donne pas beaucoup de détails sur les moyens à utiliser pour implémenter la comptabilité qu'il propose de façon pratique. Ainsi, il délègue à d'autres ouvrages le soin de proposer des démarches plus précises afin de permettre son implémentation pratique (SEEA-CF, 2012; SEEA-EEA, 2012). La trousse de démarrage rapide des Comptes Écosystémiques du Capital Naturel (TDR-CECN) du Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique est l'un d'eux (Weber, 2014a).

Plus précisément, les comptes abordés dans la TDR-CECN regroupent le carbone écosystémique (dorénavant : carbone), les ressources écosystémiques en eau (dorénavant : eau), ainsi que les services fonctionnels des infrastructures écosystémiques qui visent à décrire l'état de la biodiversité (dorénavant : biodiversité) (Weber, 2014a). Les comptes de carbone et d'eau prennent en considération l'ensemble des stocks et des flux de ces différents éléments, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. De leur côté, les comptes liés à la biodiversité prennent en considération plus globale puisque les flux physiques des SE qu'ils fournissent sont incorporelles et ne peuvent être mesurés directement (Weber, 2014a). Finalement, comme la démarche proposée par la TDR-CECN est constituée de recommandations plutôt que de solutions définitives, les comptes qui y sont décrits sont désignés comme étant des comptes expérimentaux, comme définis par le SCEE (SEEA-EEA, 2012; Weber, 2014a). Notons plus spécifiquement l'importance des comptes liés au carbone dans un contexte de changements climatiques et d'épuisement des ressources naturelles (SEEA-CC, 2012; Weber, 2014a). En effet, l'implémentation des comptes du carbone définis par la TDR-CECN générerait de l'information qui permettrait de

faire des suivis temporels et des comparaisons régionales entre les différents stocks et flux de carbone. Ainsi, l'information liée aux émissions et au stockage de carbone pourrait contribuer à orienter et évaluer des politiques portant sur les changements climatiques, tandis que l'information portant sur les stocks et les récoltes de carbone (e.g. biomasse se trouvant dans la récolte de bois et dans les récoltes agricoles) pourrait servir à orienter et évaluer des politiques sur la gestion durable des ressources naturelles (Weber, 2014a).

Suivant la tendance internationale qui s'exerce en comptabilisation environnementale, et reconnaissant la pertinence du SCEE, l'Institut de la statistique du Québec (ISQ) a mis en place les premières assises permettant de produire les comptes environnementaux de la province de Québec (Uhde et Keith, 2017). Au stade actuel, l'ISQ a produit les comptes des terres, soit les comptes de base du cadre central du SCEE qui décrivent les changements d'utilisation du sol sur un territoire donné (SEEA-CF, 2012; Uhde et Keith, 2017). À ce stade de développement, des recherches sur l'application des comptes expérimentaux doivent être réalisées afin de développer le cadre du SCEE au Québec (Uhde et Keith, 2017).

1.2 État des connaissances

Les prochaines sections visent à décrire de façon plus détaillée le concept de SE, l'historique de la CECN, le cadre comptable du SCEE, la TDR-CECN et différentes avancées qui ont été réalisées dans le domaine au Canada et au Québec. Cela permettra d'apporter une vision plus approfondie des éléments principaux autour duquel ce projet de recherche se construit.

1.2.1 Les services écosystémiques

Il est essentiel de bien définir le concept de SE puisqu'il est en quelque sorte l'unité de base du présent projet de recherche. Les prochaines sections ont pour but de définir le concept, d'expliquer son historique et de survoler les principales critiques auquel il fait face.

1.2.1.1 Définition du concept de SE

Les écosystèmes et la biodiversité fournissent plusieurs biens et services d'importance à l'être humain. Ces services peuvent prendre la forme de biens tels que la matière ligneuse, les ressources énergétiques, la nourriture ou les produits pharmaceutiques. D'autres permettent d'améliorer la qualité de vie de l'être humain en régulant le milieu qui l'entoure. Par exemple, certains services peuvent purifier l'air, atténuer les impacts des sécheresses ou inondations, réguler le climat, décomposer et recycler les polluants, tout en offrant des caractéristiques esthétiques et culturelles intangibles, mais importantes à l'être humain. Finalement, certains autres sont utiles à l'être humain de façon indirecte en permettant un maintien de la biodiversité, ce qui permet une pérennité des services qu'ils lui sont directement importants (Daily, 1997; MEA, 2005; TEEB, 2010). Ces services fournis par la nature se nomment plus spécifiquement services écosystémiques (SE) (Daily, 1997; MEA, 2005).

1.2.1.2 Historique du concept de services écosystémiques

Le concept de SE se développe depuis déjà plusieurs années. Trois grandes périodes historiques décrivent l'évolution du concept (Méral, 2012). D'abord, la période d'émergence (1970-1997) représente l'époque où la prise de conscience concernant la surexploitation des ressources naturelles prend forme (Gomez-Baggethun et al., 2010; Méral, 2012). Un nouveau courant de pensée économique voit le jour au début de

cette période : l'économie de l'environnement (Gomez-Baggethun et al., 2010). Ce courant met de l'avant le concept de SE, tout comme plusieurs idées ayant pour but de permettre une meilleure gestion de l'environnement et des ressources naturelles (Gomez-Baggethun et al., 2010).

Ensuite, la période de médiatisation (1997-2005) débute par la parution de l'article de Costanza et al. (1997) qui est la première à proposer une évaluation de SE à l'échelle du globe. Cet article fait l'objet d'un fort battage médiatique et lance des débats d'éthique, de méthodologie et d'applicabilité concernant les SE (Gomez-Baggethun et al., 2010; Méral, 2012). Pendant que ces débats prennent forme, des institutions internationales préparèrent le rapport du Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) qui vise à évaluer les écosystèmes globaux. Ce rapport ajoute à la médiatisation des SE et met de l'avant les pressions que subissent les écosystèmes fournissant ces services (Gomez-Baggethun et al., 2010; Méral, 2012). Également, l'idée de paiements pour services environnementaux, qui consiste à établir des politiques comprenant des transferts d'argent permettant de valoriser les SE, émerge durant cette période (Gomez-Baggethun et al., 2010; Méral, 2012).

Finalement vient la période d'appropriation politique des SE (2005 à aujourd'hui). Elle représente la période où des initiatives sont mises de l'avant pour que les SE soient pris en compte entre autres dans la prise de décision, les pratiques agricoles et la mise sur pied de politiques environnementales (Gomez-Baggethun et al., 2010; Méral, 2012). Plus spécifiquement, c'est dans cette période que se sont développées des initiatives telles les programmes de paiement pour services environnementaux (Méral, 2012) et surtout, dans le cas du présent projet, des initiatives d'évaluation et de comptabilisation du capital naturel, dont le SCEE (MEA, 2005; TEEB, 2010; SEEA-CF, 2012). L'appropriation politique observée durant cette période fait donc en sorte que le concept de SE est un sujet d'actualité en ce qui a trait aux politiques publiques environnementales (Gomez-Baggethun et al., 2010; Méral, 2012;

Constanza et al., 2014). Ce développement des SE s'est observé dans les dernières années au Québec avec un travail sur la caractérisation et la valeur économique des SE fournis par les milieux humides (He et al., 2015, 2017), aquatiques (Poder et al., 2016), agricoles (Dupras et al., 2017) et forestiers (L'Ecuyer-Sauvageau et al., sous presse; Dupras et al., 2015a), de même que par une recherche sur l'application pratique de ce concept dans des programmes et politiques publiques en aménagement du territoire (Dupras et Alam, 2015; Dupras et al., 2015b, 2016; Lavallée et Dupras, 2016).

1.2.1.3 Critiques envers le concept de services écosystémiques

Bien que le concept de SE a pris beaucoup d'ampleur au cours des dernières années (Méral, 2012) et que son importance est reconnue internationalement afin d'apporter des solutions face aux enjeux de dégradation des écosystèmes, d'épuisement des ressources naturelles et de changements climatiques dont l'humanité fait face (MEA, 2005; TEEB, 2010; Obst, 2014), certains chercheurs émettent des critiques quant à son utilisation. Les prochaines sections visent à décrire ces principales critiques tout en amenant les contre-argumentaires proposés dans la littérature, afin d'exposer leurs propres limites. Cet exercice a pour but de mieux comprendre les effets indésirables que l'utilisation du concept de SE peut engendrer, afin d'être mieux outillé pour les restreindre.

D'abord, McCauley (2006), l'un des principaux critiques du concept de SE, évoque le fait que le concept de SE se base sur l'hypothèse que chaque situation en est une gagnante-gagnante entre l'être humain et la nature. Or, cette hypothèse serait trop forte selon McCauley. Il y a en effet plusieurs situations où la nature présente une nuisance pour l'être humain (i.e. le concept de « disservice écosystémique », ou « mauvais service »). Dans ces conditions, il ne serait pas possible d'attribuer une valeur positive à ces services et il n'y aurait alors pas d'intérêt à conserver les

écosystèmes qui les produisent. La conservation ne se ferait alors pas de façon à préserver la biodiversité. Cette préoccupation est cependant partagée et considérée par le SCEE. En effet, des comptes spécifiques à la biodiversité y sont proposés de façon à pouvoir intégrer la valeur des écosystèmes dans leur ensemble (SEEA-CF, 2012).

Ensuite, McCauley (2006) explique le fait que les flux de marché et les avancées technologiques peuvent faire en sorte que la protection de l'environnement ne sera pas durable pour certains écosystèmes. Par exemple, un évènement inattendu pourrait mener à une chute drastique de la valeur d'un SE qui avait une valeur importante. Dans le même ordre d'idée, une avancée technologique pourrait faire baisser la valeur de certains SE en offrant des alternatives peu coûteuses. Ces évènements mèneraient à une moins grande protection des écosystèmes qui produisent ces SE. Toutefois, l'utilisant d'un cadre d'évaluation des SE comprenant plusieurs comptes distincts permettraient de grandement limiter cet effet puisque l'évaluation ne se ferait pas uniquement sur l'aspect marchand des SE (SEEA-CF, 2012).

Finalement, McCauley (2006) aborde le caractère anthropocentrique du concept de SE en stipulant que la valeur intrinsèque de la nature devrait faire en sorte que sa valeur soit infinie. Elle devrait ainsi être protégée, peu importe comment elle est profitable à l'être humain. Pourtant, comme l'explique Jax et al. (2013), l'éthique de l'environnement met de l'avant des valeurs anthropocentriques également. Le concept de SE ne fait donc pas exception. De plus, dans un contexte où l'être humain gère plusieurs écosystèmes, le recours au concept de SE permet d'élargir le débat en offrant de l'information qui rejoint les facteurs anthropiques qui sont considérés dans la gestion de ces écosystèmes (Reid et al., 2006; Skroch et Lopez-Hoffman, 2010).

Bien entendu, d'autres auteurs ont émis des critiques faces au concept de SE. En ce sens, Schröter et al. (2014) propose un article qui recense différentes critiques. Les

prochains paragraphes décrivent celles qui n'ont pas été soulevées par McCauley (2006).

D'abord, certains auteurs s'inquiètent que l'idée de SE puisse promouvoir une exploitation accrue de la nature (Fairhead et al., 2012; Raymond et al., 2013). Tandis que d'autres craignent que l'implantation des SE éloigne encore plus les consommateurs de la nature (Robertson, 2012). Toutefois, certains croient au contraire que le concept de SE pourrait offrir une nouvelle perspective aux consommateurs, qui sont déjà relativement déconnectés de la nature, en leur permettant de mieux comprendre les enjeux, et ainsi les rapprocher des écosystèmes (Borgström Hansson et Wackernagel, 1999; Folke et al., 2011; Raymond et al., 2013).

Une autre critique vient du manque de précision qui entoure le concept de SE. Cela vient du fait que les définitions proposées par le MEA (2005), la référence de base en CECN, ne sont pas aussi précises que celles proposées par d'autres auteurs (Nahlik et al., 2012). Ces définitions différentes font en sorte que le concept de SE tend à devenir une idée populaire qui peut être parfois utilisée hors contexte. Le MEA (2005) a toutefois volontairement écrit ses définitions de SE de façon à ce qu'elles soient vagues de façon à stimuler la créativité et ainsi permettre le raffinement et l'émergence de nouvelles idées (Carpenter et al., 2009), en plus de favoriser la collaboration interdisciplinaire (Strunz, 2012).

Finalement, Schröter et al. (2014) évoquent que les produits provenant de l'agriculture intensive ne devraient pas être considérés comme des SE, comme cela est souvent fait, puisqu'ils ne sont pas issus de processus naturels. Toutefois, les écosystèmes agricoles contribuent à la production de plusieurs SE, tels les réserves de carbone, l'approvisionnement en ressources, la régulation des sols et de l'eau, le support à la biodiversité et la préservation de la culture. Ils ont donc une certaine

importance (MEA, 2005). Néanmoins, l'agriculture fournit également des externalités négatives tels la perte d'habitat, le drainage de nutriments, l'érosion des cours d'eau, et l'intoxication par pesticides. Une meilleure gestion de l'agriculture serait susceptible de réduire considérablement les impacts de ces externalités, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires pour y arriver (Zhang et al., 2007).

Cette section démontre qu'il existe plusieurs critiques liées aux concepts de SE. Il est aussi démontré que ces critiques possèdent leurs limites. En effet, elles sont autant que possible prises en compte dans les ouvrages de référence et elles sont parfois elles-mêmes critiquables. Finalement, bien qu'il est important de garder ces critiques en tête de façon à limiter le plus possible les effets indésirables que pourraient engendrer les travaux utilisant le concept de SE, il est aussi important de ne pas oublier que son utilisation est reconnue internationalement, et à diverses échelles, autant dans des politiques transnationales qu'au niveau local (MEA, 2005; TEEB, 2010).

1.2.2 Cycle du carbone et principales sources d'émissions

Au niveau global, il est possible de décomposer le cycle du carbone selon quatre réservoirs principaux. Ces réservoirs sont prennent en compte le carbone terrestre (i.e. principalement la végétation et les sols), le carbone se trouvant dans les océans, le carbone se trouvant dans l'atmosphère et le carbone se retrouvant dans la lithosphère (i.e. énergies fossiles et carbonates) (IPCC, 2001). Plusieurs flux existent entre ces différents réservoirs de carbone. D'abord, les réservoirs terrestres absorbent du carbone atmosphérique grâce à la photosynthèse. Ce carbone est ensuite en bonne partie retourné vers l'atmosphère par les processus de respiration et de décomposition. Également, une partie plus négligeable du carbone des réservoirs terrestres peut être acheminé vers les océans par des processus d'érosion et de ruissèlement. Les océans font pour leur part des échanges importants de carbone avec

l'atmosphère par des processus de dissolutions et de dégazage. Cela s'explique par la forte capacité de l'eau à stocker du carbone. Pour sa part, la lithosphère stock du carbone provenant dans océans et des milieux terrestres par des processus de fossilisation. Cette fossilisation se fait lentement sur de très longues périodes temporelles. Finalement, par les activités volcaniques, la lithosphère retourne une partie du carbone qu'elle emmagasine vers l'atmosphère (IPCC, 2001). Bien sûr d'autres flux plus marginaux existent, notamment au sein d'un même réservoir de carbone (IPCC, 2001).

L'équilibre du cycle du carbone est toutefois perturbé par les activités anthropiques. En effet, au cours du 20^e siècle, la concentration de CO₂ se retrouvant dans l'atmosphère a augmenté à un rythme effréné pour en arriver à un sommet qui n'a pas été atteint depuis les 420 000 dernières années (IPCC, 2001). Ce sont les activités anthropiques qui ont eu lieu au cours de cette période qui sont les principaux responsables de cette augmentation rapide de CO₂ dans l'atmosphère. Plus précisément, la combustion d'énergie fossile est la plus grande responsable en expliquant, à elle seule, près des trois quarts des augmentations de CO₂ dans l'atmosphère, tandis que les changements d'utilisation du sol, de par la déforestation, expliquent le reste de ces augmentations (IPCC, 2001). L'augmentation de CO₂ qui est présentement observée mène un réchauffement global des températures de la planète, qui peut à son tour générer plusieurs autres effets sur le climat et les écosystèmes (IPCC, 2001).

1.2.3 Cadre central du Système de comptabilité économique et environnementale

Les Nations Unies, en collaboration avec la Commission européenne, le Fonds monétaire international, l'Organisation de coopération et de développement économique et la Banque mondiale, ont développé un cadre, le SCEE, qui a pour but d'intégrer le capital naturel et les SE dans le SCN. Cette intégration dans le SCN

prend son importance du fait que ce cadre comptable est reconnu internationalement pour sa capacité à mesurer les activités économiques. Plus spécifiquement, le SCEE est le premier cadre comptable international qui propose une comptabilisation standardisée en économie environnementale. Ce cadre se veut général : il est en effet conçu de sorte qu'il puisse être applicable par n'importe quel pays, peu importe son stade de développement économique et la composition de son environnement. Le SCEE vise à encadrer la compilation d'indicateurs et de données statistiques de façon à ce qu'ils soient comparables et cohérents. L'information recueillie peut servir à mieux décrire les stocks environnementaux et leur fluctuation dans le temps, tout en permettant une meilleure compréhension des interactions entre l'économie et l'environnement. Enfin, le SCEE a pour objectif de permettre à ses utilisateurs d'effectuer des analyses, études et prises de décisions plus efficaces d'un point de vue de développement durable (SEEA-CF, 2012).

Le SCEE utilise des principes de comptabilité pour compiler l'information environnementale. Plus spécifiquement, il utilise la même structure et les mêmes concepts de comptabilité que le SCN. L'utilisation de cette structure permet au SCEE de comptabiliser l'information environnementale sur une base monétaire de façon à faciliter les comparaisons avec les données économiques. Finalement, le cadre central du SCEE utilise différents types de comptes qui interagissent ensemble de façon à générer un maximum d'information (SEEA-CF, 2012).

La première grande famille de comptes proposée par le cadre central du SCEE regroupe les comptes des flux physiques. Ces comptes regroupent tout ce qui touche aux intrants de production provenant de l'environnement ainsi que les produits et résidus qui découlent de leur utilisation. Chacune des ressources naturelles utilisées dans un processus de transformation est comptabilisée de façon distincte. Ainsi, les ressources énergétiques sont compilées de façon différente aux ressources matérielles et à la quantité d'eau utilisée. Les comptes des flux physiques permettent donc, par

exemple, d'évaluer la plus-value obtenue, ou les rejets engendrés, à la suite de la transformation de ressources naturelles (SEEA-CF, 2012).

La seconde famille de comptes proposés par le cadre central SCEE rassemble les comptes liés aux activités économiques. Ces comptes compilent toute l'information qui a trait à la protection et la gestion de l'environnement. La comptabilisation se fait selon l'activité effectuée (i.e. protection ou gestion de la ressource) et le type de ressource naturelle considérée. Les comptes liés aux activités économiques permettent notamment de déterminer quelles sont les dépenses d'une entité économique en protection de l'environnement, ou bien l'ampleur des biens et services environnementaux produits dans une région donnée (SEEA-CF, 2012).

Les comptes d'actifs environnementaux forment la dernière famille de comptes du cadre central du SCEE. Ces comptes servent à compiler l'information concernant les stocks de tous les éléments, vivants ou non, qui constituent l'environnement biophysique et qui sont susceptibles d'être utilisés à des fins d'activités économiques. En d'autres termes, ces comptes permettent d'intégrer la valeur des SE qui ont une valeur marchande. Ces comptes peuvent entre autres servir à produire des analyses temporelles afin d'observer l'accroissement ou l'épuisement d'une ressource. Il est à noter que les éléments considérés dans les comptes d'actifs sont observés de façon individuelle sans prendre en compte leurs interactions avec les écosystèmes. (SEEA-CF, 2012).

Le cadre central du SCEE se concentre toutefois à mettre de l'avant les grandes lignes d'une démarche standardisée de la CECN. Ainsi, il offre très peu d'information sur l'implémentation pratique des différents comptes. Également, pour plusieurs comptes, il n'y a tout simplement pas encore de consensus sur les façons de comptabiliser l'information. Pour ces raisons, le cadre central du SCEE confie à des ouvrages annexes le soin de proposer des structures permettant une implantation

pratique de la CECN (SEEA-CF, 2012). C'est la raison pour laquelle la trousse TDR-CECN a été produite (Weber, 2014a).

1.2.4 Trousse de démarrage rapide des Comptes Écosystémiques du Capital Naturel et autres cadres de comptabilité du carbone

La TDR-CECN est l'un des ouvrages annexes qui proposent une structure permettant l'implémentation pratique de certains comptes proposés par le cadre central du SCEE. L'approche qu'elle propose est applicable pour tous les types d'écosystèmes et vise à évaluer la capacité présente et future qu'ont les écosystèmes à fournir des services à la population. Elle se concentre sur trois grandes familles de comptes en particulier, soit l'eau, le carbone et la biodiversité. Cela vient du fait que la TDR-CECN vise une implémentation rapide et que ces trois grandes familles de comptes sont perçues comme étant celles qui permettent de dresser le meilleur portrait de l'état des écosystèmes. De plus, les comptes qui y sont proposés portent sur les trois grands types de comptes mis de l'avant par le SCEE, soit deux de flux : les comptes des activités économiques et des flux physiques, et un de stock : les comptes des actifs naturels (SEEA-CF, 2012; Weber, 2014a).

En plus de la TDR-CECN, d'autres cadres comptables ou statistiques s'attardent à la comptabilité du carbone. La TDR-CECN cite deux principaux organismes qui exercent ce genre d'activités. Dans un premier temps, l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) produit de nombreuses statistiques sur le stockage et les utilisations de la biomasse au niveau international, mais offre peu d'information pour une application à l'échelle locale. Ensuite, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), et sa contrepartie REDD+, offrent des recommandations détaillées et comparables à celles de la TDR-CECN en ce qui concerne la comptabilité des émissions de gaz à effet de serre et leur absorption par les écosystèmes, mais offrent peu d'information

sur la capacité des écosystèmes à offrir d'autres types de SE. Par rapport à ces deux initiatives comptables, l'approche de la TDR-CECN, basée sur le SCEE, a pour objectif de mettre en place une comptabilité qui peut s'appliquer à l'échelle régionale. De plus, dans sa structure, elle met une emphase importante à produire de l'information sur la capacité des écosystèmes à fournir des SE, en plus de prendre en considération les émissions et le stockage du carbone. Finalement, notons que plusieurs données provenant de ces cadres comptables peuvent être incorporées dans celle de la TDR-CECN (Weber, 2014a).

1.2.5 Recherches effectuées dans le domaine au Canada et au Québec

1.2.4.1 Recherches au Canada

À l'échelle du Canada il y a relativement beaucoup de travail de fait en matière de CECN. Plus spécifiquement, Environnement et Changement climatique Canada utilise le cadre comptable mis de l'avant par le GIEC, tandis que Statistique Canada a produit plusieurs jeux de données, ainsi que des rapports, en lien avec le SCEE.

Les comptes réalisés selon les recommandations du GIEC sont produits par l'Inventaire canadien des gaz à effet de serre (Environnement et Changement climatique Canada, 2018). Cet inventaire porte spécifiquement sur les émissions de gaz à effet de serre et publie des données à l'échelle provinciale. L'information qu'elle permet de générer est toutefois très détaillée. En effet, les comptes d'émissions portent sur les différents types de gaz à effet de serre et peuvent être décomposés selon le secteur d'activité (Environnement et Changement climatique Canada, 2018). La comptabilité proposée par la TDR-CECN prend donc beaucoup plus large dans le sens qu'elle veut prendre en considération l'ensemble des stocks et des flux de carbone qui ont lieu sur un territoire donné (Weber, 2014a)

En ce qui concerne le SCEE, les données sont souvent produites à une échelle relativement large (e.g. province). Cela limite donc la portée pratique que peuvent fournir ces sources d'information. Voici un résumé en lien avec le présent projet, mais non exhaustif, de ce que Statistique Canada produit en matière de CECN.

D'abord, Statistique Canada produit des données par région de drainage pour les comptes d'eau. Plus précisément, ces données sont autant produites pour les apports et sorties naturels d'eau que pour la qualité de l'eau et l'utilisation humaine de la ressource (Statistique Canada, 2016). Ensuite, des données ont été produites spécifiquement pour les milieux agricoles. Ces données sont principalement produites par province ou par région de drainage. Les données portent en outre sur les produits agricoles, les exportations et importations, les émissions de gaz à effets de serre, le brouillage du bétail et l'utilisation d'engrais, pesticide et herbicide (Statistique Canada, 2014). Également, Statistique Canada a publié de l'information sur la gestion des déchets et les émissions de gaz à effet de serre. Ces données sont principalement produites par province ou à l'échelle du pays (Statistique Canada, 2012). De plus, des données ont été produites par province sur la production et l'extraction de biomasses dans les milieux agricoles, naturels et aquatiques (Statistique Canada, 2013). Finalement, des données sur l'utilisation du sol ont été produites pour les années 1971, 1991, 2001 et 2011. Ces données ont été produites par région métropolitaine de recensement et ont été produites pour principalement trois types d'utilisation du sol différents : (a) surface artificielle (b) terres arables et (c) surfaces naturelles et semi-naturelles. Les surfaces naturelles et semi-naturelles sont cependant plus détaillées pour l'année 2011 (Statistique Canada, 2015).

1.2.4.2 Recherches au Québec

Au niveau québécois, les avancées sont beaucoup plus embryonnaires. En effet, un seul projet directement en lien avec le SCEE a été réalisé jusqu'à maintenant, soit les

Comptes des terres du Québec méridional (Uhde et Keith, 2017). Ce travail, qui a été réalisé par l'ISQ, met de l'avant un jeu de données qui fournit de l'information sur l'utilisation du sol et les changements d'utilisation du sol qu'il y a eu entre le 3e et le 4e inventaire écoforestier du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec. Le jeu de données est réparti sur le territoire selon une grille aux 50 mètres et propose en tout neuf classes d'utilisation du sol. De plus, un travail important a été réalisé afin de diminuer le plus possible les erreurs liées aux prises de mesures et aux défauts de comparabilité entre les deux inventaires écoforestiers. Ainsi, la méthodologie qui a été utilisée permet d'obtenir des statistiques relativement fiables et précises sur les tendances liées aux changements d'utilisation du sol pour la période considérée (Uhde et Keith, 2017). Les données des Comptes des terres sont plus précises en tous points par rapport aux données d'utilisation du sol produites par Statistique Canada. C'est d'ailleurs les données des Comptes des terres de l'ISQ qui ont été utilisées comme données d'utilisation du sol dans le présent projet.

1.3 Objectifs et questions de recherche

De façon à développer le travail amorcé par l'ISQ, l'objectif principal de ce projet de recherche vise à dresser un premier portrait des comptes expérimentaux du Québec méridional. Étant donné l'ampleur du travail à effectuer pour produire la totalité des comptes proposés par la TDR-CECN, cette étude se concentre spécifiquement sur les comptes de carbone. De surcroît, l'implémentation d'une comptabilité du carbone comme défini par la TDR-CECN prend son importance du fait qu'elle peut permettre à terme d'offrir des données temporelles et comparables entre régions, qui pourraient contribuer à cibler et évaluer des politiques en matière de lutte contre les changements climatiques et de gestion durable des ressources naturelles. Plus précisément, le projet s'articule autour de trois objectifs spécifiques :

- Le premier objectif spécifique vise à définir une procédure, adaptée au contexte québécois, permettant de produire les comptes expérimentaux du carbone selon le SCEE. En effet, comme ce projet établit les premières bases de la comptabilité du carbone au Québec, il est important de produire une documentation précise qui permettra de soutenir et d'encourager de futures recherches à améliorer la qualité des résultats et à répéter l'exercice pour des périodes temporelles différentes.
- Le second objectif spécifique vise à faire une analyse critique de la disponibilité et de la qualité des données. Cela permettra plus spécifiquement de cibler les sources de données qui devront être générées ou améliorées de façon à améliorer la qualité de l'information, autant d'un point de vue de l'accessibilité, de la précision des estimations et de la répartition spatiale. Les besoins au niveau de l'amélioration et de la production de données pourront donc encourager la mise sur pieds de nouveaux projets de recherche.
- Le troisième objectif spécifique vise à générer les différents comptes de façon à ce qu'ils puissent fournir de l'information pour différentes échelles spatiales et différents types d'utilisation du sol. En plus de servir de base de comparabilité pour des projets subséquents, cette démarche accentue grandement les possibilités d'utilisation pratique des résultats.

En plus de viser à atteindre ces objectifs de recherche et fournir des ouvertures pour de futures recherches, l'intérêt scientifique de cette recherche est de répondre à trois questions entourant la disponibilité et la qualité des données et sources d'information. La réponse à ces questions est importante du fait qu'elle permettra de bien cibler ce qui est actuellement possible de faire en lien avec la comptabilité du carbone au Québec. Voici donc les questions auxquelles nous chercherons à répondre:

- Existe-t-il suffisamment de données et de sources d'information pour dresser un premier portrait de la majorité des comptes expérimentaux de carbone proposés par la TDR-CECN dans un contexte québécois?
- L'analyse de l'évolution temporelle des comptes expérimentaux de carbone produits selon la TDR-CECN est-elle possible dans le contexte québécois?
- L'information disponible permettant la production des comptes expérimentaux du carbone dans un contexte québécois selon la TDR-CECN est-elle suffisamment précise pour permettre une répartition spatiale de la majorité des données par municipalité régionale de comté (MRC)?

Pour cette dernière question, l'utilisation des limites des MRC comme unité spatiale se justifie par le fait qu'elle découpe le territoire en près de 100 unités distinctes et que, comme les MRC sont des juridictions administratives ayant des compétences en aménagement du territoire (MAMOT 2016), des données sur les comptes du carbone du SCEE seraient susceptibles de les aider dans leurs prises de décisions, et recèle ainsi un intérêt pratique dans l'aménagement du territoire.

CHAPITRE II

ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DU CARBONE ÉCOSYSTÉMIQUE DANS LE CADRE DU SYSTÈME DE COMPTABILITÉ ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE POUR LE QUÉBEC MÉRIDIONAL

Auteurs

Jeffrey Auclair*¹ et Jérôme Dupras¹

¹ Institut des sciences de la forêt tempérée (ISFORT), Université du Québec en
Outaouais (UQO), 58 rue Principale, Ripon, QC, Canada, J0V 1V0

* Auteur correspondant : jeoffrey.auclair@gmail.com

Article en préparation pour une soumission dans *Ecological Economics*

Résumé

Les dernières années ont vu émerger un mouvement international visant l'évaluation et la comptabilisation du capital naturel qui s'inscrit dans un contexte où les activités humaines engendrent une pression importante sur les écosystèmes. Afin de pallier au manque d'information accessible aux décideurs sur le capital naturel, le Système de comptabilité économique et environnementale (SCEE) propose une démarche standardisée permettant la comptabilisation du capital naturel basée sur une structure similaire à celle du Système de comptabilité nationale. Cette étude se base sur la méthodologie définie par la trousse de démarrage rapide des Comptes Écosystémiques du Capital Naturel, un ouvrage annexe au SCEE qui définit comment produire certains comptes expérimentaux du SCEE. Plus précisément, cette recherche a pour but de dresser un premier portrait des comptes du carbone du SCEE au Québec, Canada, pour la période 2000-2010. Les résultats obtenus permettent de caractériser plusieurs des comptes de carbone proposé par le SCEE. Plus spécifiquement, pour les milieux naturels, des estimés de carbone ont été réalisés pour la biomasse aérienne, les sols, la production primaire nette et la production primaire brute, les feux de forêt ainsi que sur la récolte du bois. Au niveau agricole, des estimations de carbone ont été réalisées par rapport aux sols des champs agricoles, aux stocks de bétail, aux récoltes, ainsi qu'aux produits de l'élevage du bétail. En ce qui concerne les autres comptes, des estimations de stocks et de flux de carbone ont pu être réalisées par rapport aux changements d'utilisation du sol, à la pêche commerciale, à l'aquaculture, aux émissions provenant des activités anthropiques, ainsi qu'aux stocks de carbone atmosphérique. Ces résultats pourront contribuer à l'orientation de politiques de gestion des ressources naturelles et de lutte contre les changements climatiques en fournissant une information nouvelle sur la gestion des stocks de carbone à différentes échelles.

MOTS-CLÉS : Carbone; comptabilité écosystémique; économie écologique; Québec méridional; services écosystémiques; système de comptabilité environnementale et économique (SCEE).

2.1 Introduction

Les dernières années ont vu émerger un mouvement international visant l'évaluation et la comptabilisation du capital naturel poussées par des initiatives tels l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, l'Économie des écosystèmes et de la biodiversité et le Système de comptabilité économique et environnementale (SCEE) (MEA, 2005; TEEB, 2010; SEEA-CF, 2012; Méral, 2012). Cette volonté internationale s'inscrit dans un contexte où les activités humaines engendrent une pression environnementale telle que les écosystèmes se dégradent au point que nos sociétés se trouvent exposées à des risques d'épuisement des ressources et de changements climatiques (Steffen et al., 2004; Rockström et al., 2009; Obst et Vardon, 2014). Comme les indicateurs économiques traditionnels ne considèrent pas les services offerts par les milieux naturels (Harris et Fraser, 2002), les initiatives d'évaluation et de comptabilisation du capital naturel ont pour but de soutenir la prise de décision en y apportant de l'information complémentaire (MEA, 2005; TEEB, 2010; SEEA-CF, 2012).

Suivant la tendance internationale qui s'exerce, l'Institut de la statistique du Québec (ISQ) a récemment produit les premières assises afin d'établir une comptabilité écosystémique du capital naturel (CECN) spécifique à la province de Québec au Canada (Uhde et Keith, 2017). Plus précisément, l'ISQ a produit les comptes des terres, soient les comptes de base du SCEE qui décrivent les changements d'utilisation du sol sur un territoire donné (SEEA-CF, 2012; Uhde et Keith, 2017). À ce stade de développement, des travaux supplémentaires sont toutefois nécessaires afin d'implémenter d'autres comptes du SCEE au Québec (Uhde et Keith, 2017).

De façon plus spécifique, le SCEE propose, dans son cadre central, les lignes directrices d'une démarche standardisée permettant la comptabilisation du capital naturel basée sur une structure similaire à celle du Système de comptabilité national, soit le système qui produit la majorité des indicateurs économiques (SEEA-CF,

2012). Cependant, comme il est relativement récent, le cadre central du SCEE délègue à d'autres ouvrages le soin de proposer des structures permettant une implémentation pratique des comptes expérimentaux qu'il décrit (SEEA-EEA, 2012). La trousse de démarrage rapide des Comptes Écosystémiques du Capital Naturel (TDR-CECN) du Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique est l'un d'eux (Weber, 2014a). Plus précisément, la TDR-CECN propose une structure comptable globale, mais détaillée, qui définit comment produire certains comptes expérimentaux du SCEE et qui peut s'appliquer dans toutes les régions du monde (Weber, 2014a). Comme la TDR-CECN vise une implémentation rapide des comptes expérimentaux du SCEE, elle se concentre à décrire les comptes liés aux composantes principales des écosystèmes afin qu'ils puissent ensuite servir de base à la production de comptes plus détaillés (Weber, 2014a).

L'une des composantes considérées par la TDR-CECN est le carbone écosystémique, qui prend en compte l'ensemble des stocks et des flux de carbone, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. Étant donné l'ampleur du travail à effectuer pour produire l'ensemble des comptes proposés par la TDR-CECN, la présente étude se base spécifiquement sur les comptes de carbone écosystémique.

Selon la TDR-CECN, la production des comptes liés au carbone est importante sur deux plans principaux. Dans un premier temps, d'un point de vue de changements climatiques, ces comptes amènent de l'information par rapport aux émissions et au stockage du carbone. Ensuite, puisque les quantités de carbone sont un bon indicateur de la biomasse qui se trouve dans les écosystèmes, ces comptes fournissent de l'information qui peut être utilisée afin d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles et de promouvoir une gestion durable des écosystèmes en offrant de l'information sur une base temporelle qui peut être comparée entre différentes régions (Weber, 2014a).

Bien que plusieurs études, portant sur la production de comptes du SCEE, aient été publiées à l'international (e.g. Edens et Graveland, 2014; Remme et al., 2015; Fry et al., 2016; Vincente et al., 2016; Gutiérrez-Martín et al., 2017), une seule a été réalisée selon la TDR-CECN (Weber, 2014b). Plus spécifiquement, cette étude a dressé un premier portrait des comptes du carbone, d'eau et de biodiversité de l'Île Maurice (Weber, 2014b). En Amérique du Nord, l'agence fédérale Statistique Canada a produit plusieurs comptes du SCEE. Toutefois, ces comptes ne permettent pas une répartition spatiale précise à l'échelle provinciale, et aucun de ces comptes n'est spécifique au carbone (Statistique Canada, 2012- 2016).

Ainsi, le présent projet de recherche vise à établir les premières bases d'une comptabilité du carbone dans le cadre du SCEE spécifique au Québec. De surcroît, cette étude prend son importance du fait qu'elle est la première à produire une série de comptes spécifiques au carbone dans le cadre du SCEE en Amérique du Nord. Plus précisément, ce projet s'articule autour de trois objectifs principaux.

Le premier objectif vise à définir une procédure permettant la production des comptes du carbone dans la province. Comme la TDR-CECN a comme objectif de s'appliquer dans toutes les régions du monde (Weber, 2014a), cette procédure pourra servir de point de comparaison pour des projets subséquents. De surcroît, la présente procédure utilise certaines données et facteurs de conversions provenant de sources internationales. Ces sources pourraient donc servir à d'autres projets ailleurs dans le monde si aucune source locale plus précise n'est disponible.

Le second objectif consiste à dresser une analyse critique sur la disponibilité et la qualité des données. Cela permettra plus spécifiquement de cibler les sources de données qui devront être générées ou améliorées de façon à améliorer la qualité de l'information, autant d'un point de vue de l'accessibilité, de la précision des estimations et de la répartition spatiale. Les besoins au niveau de l'amélioration et de

la production de données pourront donc encourager la mise sur pieds de nouveaux projets de recherche.

Pour sa part, le troisième objectif vise à générer l'information des comptes produits de façon à ce qu'elle puisse être répartie de façon la plus précise possible sur le territoire. En plus de servir de base de comparabilité pour des projets subséquents, cette démarche accentue grandement les possibilités d'utilisation pratique des résultats.

2.2 Méthodologie

Cette étude se base sur la méthodologie décrite par la TDR-CECN (Weber, 2014a). Cet ouvrage propose une série de tableaux présentant les comptes qu'il veut mettre de l'avant, plusieurs directives ou conseils portant sur l'implémentation de ces comptes, ainsi que des sources de données potentielles qui peuvent être utilisées lorsque les données spécifiques à la région étudiée ne sont pas disponibles ou suffisamment précises. La présente étude s'est donc grandement inspirée de chacun de ces éléments afin de produire les différents comptes liés au stockage et au flux de carbone écosystémique du Québec méridional.

2.2.1 Zone à l'étude et période d'analyse

La zone étudiée correspond au territoire couvert par la forêt aménagée de la province de Québec au Canada, soit le Québec méridional (Figure 2.1). Cette zone a été sélectionnée puisqu'elle correspond au territoire couvert par le jeu de données principal sur lequel se base cette étude, soit les Comptes des terres du Québec méridional (Uhde et Keith, 2017). En effet, les comptes des terres, qui représentent

les changements de couverture du sol qui ont lieu sur un territoire donné, se veulent la base de la CECN proposée par le SCEE (SEEA-CF, 2012; Weber, 2014a).



Figure 2.1 Localisation de la zone étudiée

Plus spécifiquement, la zone étudiée correspond au territoire où les données des comptes des terres sont disponibles à la fois pour la période d'ouverture et pour la période de fermeture. Cette zone a une superficie totale de 616 861 km², et est principalement composée de milieux forestiers. En effet, comme le démontre le tableau 2.1, les milieux forestiers ont une superficie de 366 238 km², soit 79% de la partie terrestre du territoire.

Tableau 2.1 Superficie des différents types d'utilisation du sol des Comptes des terres pour la période d'ouverture

Utilisation du sol	Superficie (km ²)	% (total)	% (terrestre)
Milieux forestiers	366 238	59	79
<i>Forêts de conifères à couvert fermé</i>	<i>172 698</i>	<i>28</i>	<i>37</i>
<i>Forêts de feuillus à couvert fermé</i>	<i>69 370</i>	<i>11</i>	<i>15</i>
<i>Forêts mixtes à couvert fermé</i>	<i>117 623</i>	<i>19</i>	<i>25</i>
<i>Forêts à couvert ouvert</i>	<i>6 547</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Milieux humides	65 879	11	14
<i>Milieux humides forestiers</i>	<i>31 667</i>	<i>5</i>	<i>7</i>
<i>Milieux humides herbacés ou arbustifs</i>	<i>34 212</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Terres agricoles	26 056	4	6
Surfaces artificielles	6 639	1	1
Plans et cours d'eau intérieurs	151 412	25	-
Pas de données	637	0	0

L'étude a été réalisée pour la période allant de 2000 à 2010. Ce choix vient d'abord du fait que les comptes des terres ont été produits à l'aide des 3^e et 4^e inventaires écoforestiers réalisés par le gouvernement du Québec sur près de deux décennies; soit sur les périodes 1990-1999 et 2000-2013 (Uhde et Keith, 2017). La période considérée dans la présente étude se rapproche donc de la fin de chacun de ces inventaires. Cette décision repose sur le fait que l'un des buts recherchés par ce projet est d'établir les premières bases d'une comptabilité du carbone au Québec dans le cadre du SCEE. Il est ainsi jugé que l'utilisation d'une période plus tardive que mitoyenne, par rapport aux années de production des inventaires écoforestiers, permet une collecte de données provenant de sources plus à jour et qui ont plus de chance d'être réutilisées dans de futurs projets.

2.2.2 Cadre de travail

Comme défini par le SCEE, le système comptable qui est utilisé dans la présente étude repose sur une série de comptes qui englobent les actifs naturels, les flux

physiques et les activités économiques (SEEA-CF, 2012; Weber, 2014a). L'idée générale étant de générer des stocks d'ouverture et de fermeture liés au carbone écosystémique, de générer des comptes de flux pour expliquer la variation de stocks entre les deux périodes et d'utiliser les comptes sur les activités économiques afin de générer des indices de santé des écosystèmes et de soutenabilité par rapport à l'utilisation du carbone écosystémique (Weber, 2014a). La production de ces indices n'est toutefois pas un objectif poursuivi spécifiquement par la présente étude.

La TDR-CECN, propose une série de tableaux très détaillés permettant d'implanter une comptabilité du carbone dans un pays ou une région donnés (Weber, 2014a). Comme le démontre la figure 2.2, l'approche utilisée se veut un assemblage de jeux de données sur une grille matricielle recouvrant la zone étudiée. Cette procédure nécessite donc beaucoup de traitements de données et recours à l'utilisation d'un logiciel de système d'information géographique. Plus précisément, selon la nature des données utilisées, les données peuvent être disposées sur la grille par une agrégation, une extrapolation, une désagrégation ou une multiplication de facteurs (voir Annexe A). Les données disposées sur la grille matricielle peuvent ensuite être utilisées pour produire les comptes en tant que tels, mais aussi pour produire des analyses pour différents regroupements de comptes et à différentes échelles spatiales (Weber, 2014a).

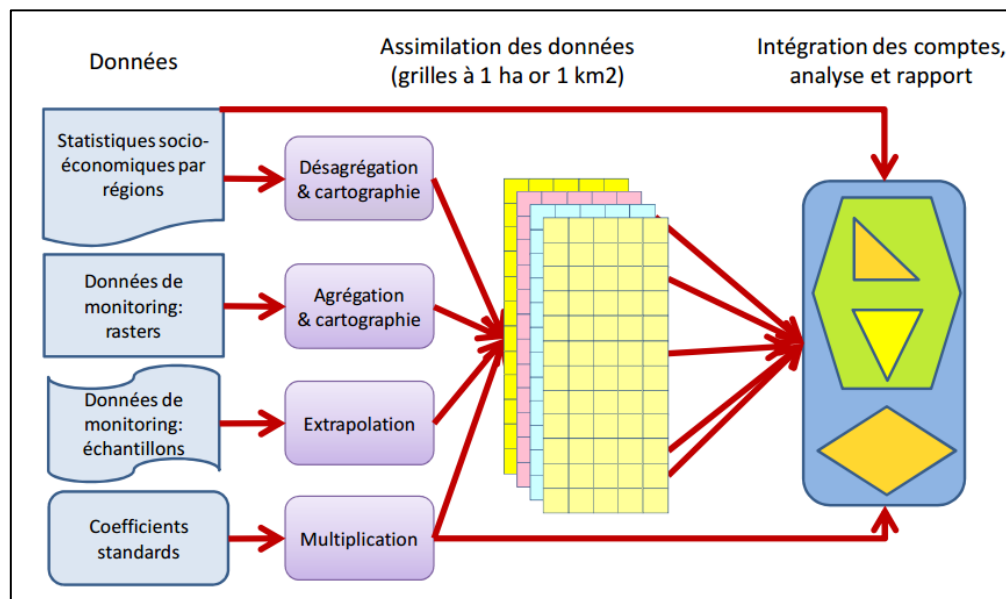


Figure 2.2 Modèle permettant la compilation des données des comptes proposées par la TDR-CECN¹

La grille matricielle utilisée pour l'assemblage des données est la même grille que celle utilisée pour la production des comptes des terres. Cela se justifie par le fait que l'utilisation de cette grille permet d'incorporer directement au présent projet les données des comptes des terres et ces données se veulent la base de la CECN (Weber, 2014a). Ces données permettent de connaître les différentes utilisations du sol, autant au début de période qu'en fin de période (Uhde et Keith, 2017). Elles peuvent donc servir à spatialiser les différentes sources d'information sur le territoire et ainsi générer un système comptable précis. Plus précisément, la grille matricielle provenant des comptes des terres possède une résolution de 50 mètres (Uhde et Keith, 2017). Si on compare au 616 861 km² du territoire étudié, cette résolution offre donc une répartition spatiale très précise des différents types d'utilisation du sol.

¹ Source : Trousse de démarrage rapide des Comptes Écosystémiques du Capital Naturel, Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique (Weber 2014a)

2.2.3 Sources et traitements de données

Étant donné que l'éventail de comptes proposés par la TDR-CECN est très exhaustif, ce n'est pas la totalité des comptes qui y étaient présentés qui a pu être produite dans cette étude. Cela s'explique par le fait que les données n'étaient pas disponibles pour produire certains d'entre eux. De ce fait, cette section se concentre à expliquer les sources de données utilisées ainsi que la méthodologie employée pour la production des comptes pour lesquelles de l'information était disponible.

2.2.3.1 Comptes sur les milieux forestiers et humides

La production des comptes reliés aux milieux humides et forestiers s'est faite selon une démarche similaire puisque les sources de données recensées englobent de façon générale ces deux types de milieux à la fois. Plus spécifiquement, les comptes considérés par rapport à ces milieux englobent comme comptes de stock le carbone aérien, c'est-à-dire le carbone au-dessus du niveau du sol, ainsi que le carbone contenu dans les sols. Au niveau des flux, les comptes considérés englobent la production de biomasse par les écosystèmes, la récolte de bois ainsi que les perturbations liées aux feux de forêt.

Les comptes liés au carbone aérien ont été produits à partir de données provenant de l'étude de Duchesne et al. (2015) qui a estimé le carbone aérien à l'aide du 3^e inventaire écoforestier et d'autres sources de données. Cette étude a permis la production d'un jeu de données à environ 375 m de résolution en combinant 94 000 points d'échantillonnage à diverses photographies aériennes. L'estimation du carbone aérien y a été réalisée à l'aide de plusieurs niveaux d'information tels l'espèce, le DHP, la structure du sol, la température et les précipitations (Duchesne et al., 2015). Toutefois, étant sous forme de points, le format des données de cette étude ne permettait pas un couplage direct avec la grille matricielle des comptes des terres. Ainsi, des estimations par district écologique ont été réalisées pour chacun des types

de milieux humides et forestiers en utilisant la moyenne de la valeur des points appartenant aux différents milieux naturels de chacun des districts écologiques. Plus spécifiquement, les districts écologiques découpent le territoire selon la végétation, la géomorphologie, la géologie et le relief (MFFP, 2016). En tout, il y a 2038 districts écologiques dans la zone à l'étude (Annexe B). Ce jeu de données est très intéressant pour la présente étude puisqu'il permet des estimés précis et bien répartis sur le territoire. Il serait toutefois intéressant que l'exercice soit répliqué pour le 4^e inventaire écoforestier afin que les stocks de fermetures puissent également être estimés.

Pour leur part, les comptes du carbone contenu dans les sols ont été réalisés à partir de données provenant de l'étude de Garneau et van Bellen (2016). Cette étude se base sur plusieurs sources permettant de déterminer des moyennes de masse organique qui sont ensuite appliquées sur des superficies de tourbières et de milieux forestiers afin d'estimer le carbone se trouvant dans le sol de ces deux milieux, et ce, par région naturelle (Garneau et van Bellen, 2016). En tout, on compte 43 régions naturelles dans la zone à l'étude (Annexe C) et c'est avec le 4^e inventaire écoforestier que les estimations de superficies ont été réalisées. Cette étude est donc intéressante pour le projet en cours puisqu'elle offre des données spatialisées. Elle comporte toutefois une limite importante puisqu'elle porte spécifiquement sur les tourbières et non sur les milieux humides en général. De ce fait, les estimations de l'étude de Garneau et van Bellen (2016) sous-estiment le carbone qui se trouve dans le sol des milieux humides en général puisque seules les tourbières sont considérées. Comme aucune source de données n'a été identifiée pour caractériser le carbone se trouvant dans le sol des autres types milieux humides, un facteur de 1,2 a été multiplié aux valeurs de carbone des sols des tourbières de chaque région naturelle afin d'estimer l'apport des autres milieux humides. Ce facteur a été calculé à partir de l'étude de Freedman et al. (2009) qui indique 83% du stockage du carbone des milieux humides au Canada se fait par les tourbières ($1/0,83 = 1,2$). Notons toutefois que cette approche ne permet pas

d'obtenir une bonne distinction régionale de la répartition du carbone des autres milieux humides. Tout comme pour le carbone aérien, il serait intéressant qu'une telle étude soit répliquée sur une autre période temporelle afin de pouvoir estimer des stocks d'ouverture et de fermeture.

Les données utilisées pour produire les comptes de production primaire brute (PPB) et de production primaire nette (PPN) proviennent du capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de la NASA. Ces données sont d'une résolution de 1km et bien qu'elles tendent à sous-estimer la productivité des sites très productifs et surestimer les sites qui ne le sont pas, elles sont généralement bonnes pour estimer les tendances générales de PPB et PPN (Turner et al., 2006). Les données ont été collectées annuellement pour l'ensemble de la période 2000-2010.

Les comptes liés à la récolte de bois ont été réalisés à l'aide de deux jeux de données; soit les données de la Fédération des producteurs forestiers du Québec pour la forêt privée et celles du Bureau du forestier en chef pour la forêt publique. Les données sur les volumes de bois mis en marché en forêt privée provenant de la Fédération des producteurs forestiers du Québec se répartissent en 12 syndicats forestiers (Annexe D), principalement situés au sud de la zone à l'étude tandis que les données du Bureau du forestier en chef se répartissent en 71 unités d'aménagement (Annexe E). Dans les deux cas, les données ont été récoltées pour la période 2000-2010 et sont exprimées selon l'espèce en m³ de bois récolté. Les tables de densité du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2006) ont ensuite servi à convertir ces valeurs en valeur de carbone.

Les données sur les feux de forêt proviennent du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec. Ces données inventorient les superficies de territoire où ont eu lieu des feux de forêt et ont été récoltées pour la période 2000-2010. Ces superficies ont été jumelées aux données sur le carbone aérien afin d'estimer la quantité de

biomasses touchée par ces feux de forêt. Ensuite, un facteur de conversion a été utilisé afin d'estimer la proportion de carbone qui a été rejetée dans l'atmosphère suite à ces feux de forêt. Plus spécifiquement, un facteur de 48,9% a été estimé à l'aide d'une matrice de conversion provenant de l'étude de Kurz et al. (1992) qui indique les quantités moyennes de CO₂, CO et CH₄ qui sont émis dans l'atmosphère suite aux feux de forêt.

2.2.3.2 Comptes sur les milieux agricoles

En ce qui concerne les milieux agricoles, les comptes de stocks considérés englobent le carbone contenu dans les sols ainsi que le carbone contenu dans les stocks de bétail. Pour leur part, les comptes de flux considérés englobent le carbone contenu dans la récolte de produits agricoles, dans les produits de l'élevage du bétail, dans les résidus de production ainsi que dans la variation du stock de bétail.

Hormis pour le carbone au sol, la production de l'ensemble des comptes liés à l'agriculture a utilisé une approche similaire. D'abord, les données collectées proviennent de la base de données CANSIM de Statistique Canada. Ensuite, comme les valeurs brutes des données collectées sont généralement exprimées en poids, l'étude de Guzmán et al. (2014), qui présente des tableaux détaillés portant sur la quantité d'énergie se trouvant dans les différents produits agricoles, a été utilisée pour convertir ces valeurs en énergie. Par la suite, le glossaire de O'Hara (1990) a permis d'estimer que 40 GJ = 1 tonne de carbone. Finalement, comme les valeurs extraites de la base de données CANSIM sont exprimées au niveau de la province, les données des recensements agricoles de 2001, 2006 et 2011 de Statistique Canada ont été utilisées pour répartir les valeurs de carbone obtenues par municipalité régionale de comté (MRC) (Annexe F). En effet, comme ces recensements permettent généralement de connaître le nombre de chacun des types d'animaux et les

superficies de chacun des types de cultures par MRC, il a été possible de répartir les valeurs de carbone estimées au prorata des données du recensement.

Au niveau des spécificités, les données d'Agriculture et agroalimentaire Canada ont permis d'estimer les poids des bovins et des porcs tandis que l'étude de Thériault (2011) a permis d'estimer le poids des moutons et des agneaux. Pour sa part, l'étude d'Agriculture et agroalimentaire Canada (2007) permet de déterminer la densité du sirop d'érable, ce qui est important puisque les données de Statistique Canada sont présentées en litre pour ce produit. Finalement, l'étude de la *Japan Institute of Energy* (2008) permet d'estimer les résidus provenant de l'élevage du bétail, tandis que l'étude de Guzmán et al. (2014) permet d'estimer les résidus provenant des récoltes agricoles.

Les comptes de carbone contenus dans les sols agricoles ont été produits à l'aide de la carte du *Global Soil Organic Carbon* générée par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Cette carte d'une résolution de 1 km est produite par une collaboration internationale de plusieurs pays et vise à estimer le carbone se trouvant dans le sol pour la strate allant de 0 à 30 mètres (FAO, 2018). Ces données ont été utilisées pour faire des estimations du carbone spécifique aux milieux agricoles par MRC de façon à conserver une répartition spatiale similaire aux autres données agricoles. Le choix d'utiliser une moyenne par MRC se justifie également par le fait que l'analyse de fiabilité des estimations canadiennes de ce jeu de données est en cours de production (FAO, 2018). Le fait d'utiliser des moyennes permet ainsi d'atténuer l'effet des erreurs potentielles.

2.2.3.3 Comptes sur les milieux aquatiques

Très peu d'information a été identifiée quant à la production des comptes liés aux milieux aquatiques. En effet, les données recensées ont permis la production de deux

comptes seulement, soient le carbone compris dans les produits de l'aquaculture et des pêches commerciales.

Les comptes sur la pêche commerciale sont produits selon les données de Pêche et Océan Canada et comprennent à la fois des données sur les pêches maritimes et les pêches en eau douce. Pour sa part, le compte sur l'aquaculture provient de la base de données CANSIM de Statistique Canada. Dans les deux cas, des données annuelles pour la période 2000-2010 étaient disponibles afin de déterminer le poids total des poissons récoltés. Cependant, aucune étude n'a été identifiée pour déterminer le carbone contenu spécifiquement dans chacune de ces espèces. Ainsi un taux global de 11% du poids des poissons, provenant d'une estimation faite à l'aide de l'étude de Boyd et al. (2007), qui décrit dans un de ses tableaux la composition chimique des poissons d'élevage les plus communs, a permis d'estimer le carbone contenu dans les récoltes de poissons.

2.2.3.4 Autres comptes

Certains comptes ne sont liés à aucun milieu naturel en particulier. Les comptes considérés qui ont cette caractéristique portent sur les gains et pertes de carbone provenant des changements d'utilisation du sol, le carbone provenant des émissions d'énergie fossile ainsi que du carbone contenu dans l'atmosphère.

Les comptes des variations de carbone issus par les changements d'utilisation du sol ont été réalisés à partir des données sur les comptes des terres. La grille matricielle composée de cellules d'une résolution de 50 mètres permet une spatialisation détaillée des changements de couverture de sols qui ont eu lieu entre le 3^e et le 4^e inventaire écoforestier (Uhde et Keith, 2017). Comme aucune étude spécifique n'a été identifiée pour quantifier l'effet sur le carbone des différents changements de

couverture du sol, les valeurs des comptes de stocks ont été utilisées pour estimer ces variations de carbone.

Le compte sur le carbone atmosphérique a été produit comme stocks de début et de fin de période à l'aide de données annuelles mondiales comptabilisant le CO₂ se retrouvant dans l'atmosphère. Ces données ont été produites par la *National Oceanic and Atmospheric Administration* des États-Unis pour les années 2000 et 2010. Un calcul au prorata de la superficie de la zone à l'étude par rapport à la superficie de la planète a ensuite été réalisé afin d'estimer le carbone atmosphérique appartenant à la zone étudiée, comme proposé par la TDR-CECN (Weber, 2014a).

Finalement, les comptes sur les émissions anthropiques de carbone ont été produits à l'aide des données d'émissions de gaz à effet de serre de l'Inventaire canadien des gaz à effet de serre. Cet inventaire est produit par Environnement et Changement climatique Canada et les données étaient disponibles pour la période 2000-2010. Ces données présentent une classification très détaillée basée sur les recommandations du GIEC et n'ont pas nécessité de traitement particulier outre la conversion des valeurs d'émissions de CO₂ et de CH₄ en quantité de carbone.

2.3 Résultats

Le travail effectué au cours de cette étude permet de dresser un premier portrait, dans le cadre du SCEE, des comptes du carbone écosystémique pour le Québec méridional. Il est possible pour plusieurs des comptes produits de présenter de l'information à plusieurs échelles spatiales différentes, et pour certains avec un grand niveau de détail. De ce fait, des tableaux de résultats détaillés sont présentés en annexes (Annexes G, H, I et J). Les prochaines sections décriront les résultats

globaux obtenus pour chacun des comptes, ainsi que les niveaux de détails pour lesquels l'information peut être présentée.

2.3.1 Comptes sur les milieux forestiers

L'information obtenue pour chacun des comptes des milieux forestiers, hormis ceux de la récolte de bois, peut être subdivisée selon les quatre catégories de forêt mise de l'avant par les comptes des terres, soient les forêts de conifères, de feuillus, mixtes et ouvertes. Les résultats globaux obtenus pour les différents comptes liés aux milieux forestiers sont présentés dans le tableau 2.2. Comme il y est démontré, le carbone aérien total est estimé à 1 668 Mt et est réparti spatialement par districts écologiques, soit une délimitation qui divise le territoire de la zone à l'étude en 2038 unités spatiales. Pour sa part, le carbone contenu dans les sols est estimé à 3 456 Mt, est réparti entre régions naturelles (43 unités spatiales) et peut être divisé en 2 sous-comptes, soit selon le carbone se trouvant dans l'horizon organique et dans l'horizon minéral du sol. Le carbone total stocké par les milieux forestiers est donc estimé à 5 124 Mt de carbone. La figure 2.3 combine ces résultats afin de présenter les stocks de carbone total contenu dans les milieux forestiers par MRC. Pour y arriver, une désagrégation a été réalisée avec les données sur le carbone et les superficies des milieux forestiers ont été utilisées afin de répartir ces valeurs par MRC.

Au niveau des flux, la productivité des écosystèmes est exprimée pour la période 2000-2010 par une PPB de 348 Mt de carbone annuellement, ainsi que par une PPN de 205 Mt de carbone annuellement. Autrement, il est estimé que durant cette période, il y a eu des pertes de carbone vers l'atmosphère de l'ordre de 0,8 Mt de carbone annuellement dû aux feux de forêt. Également, selon la méthodologie employée, il y aurait une diminution de carbone forestier de l'ordre de 0,7 Mt annuellement dû aux changements d'utilisations du sol. Finalement, les comptes du bois récolté permettent d'estimer qu'il y a en moyenne 11,6 Mt de carbone extrait des

forêts publiques annuellement par l'exploitation forestière. Ces valeurs peuvent se répartir en 71 unités spatiales. Au niveau des forêts privées, il a été estimé que 2,1 Mt de carbone ont été extraits annuellement des forêts administrées par les syndicats de producteurs forestiers qui délimitent le territoire en 12 unités spatiales. Il est donc estimé que les coupes forestières ont retiré en moyenne 13,7 Mt de carbone annuellement des milieux forestiers du Québec méridional. Autant pour les forêts privées que publiques, il est possible de répartir l'information obtenue par essence d'arbre. En effet, respectivement 9 et 4 sous-comptes ont été produits selon des regroupements d'essence d'arbre pour les récoltes en forêt publique et privée. La figure 2.4 illustre comment se répartit l'ensemble de ces coupes par MRC selon des estimations réalistes en désagrégeant les unités spatiales et en utilisant les superficies forestières afin de pondérer l'information.

Tableau 2.2 Stocks et flux de carbone entre 2000 et 2010 dans les milieux forestiers du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN

	Compte	Carbone	Nombre de sous-comptes	Répartition spatiale minimale	Nombre d'unités spatiales
Stock	Carbone dans la biomasse aérienne	1 668 Mt	-	Districts écologiques	2038
	Carbone dans les sols	3 456 Mt	2	Régions naturelles	43
Flux	Production primaire brute	348 Mt/an	-	1 km	-
	Production primaire nette	205 Mt/an	-	1 km	-
	Feux de forêt	0,8 Mt/an	-	30 m	-
	Récolte de bois (forêt publique)	11,6 Mt/an	9	Unité d'aménagement	71
	Récolte de bois (forêt privée)	2,1 Mt/an	4	Syndicat de producteurs	12
	Changements d'utilisation du sol (perte)	0,7 Mt/an	-	50 m	-

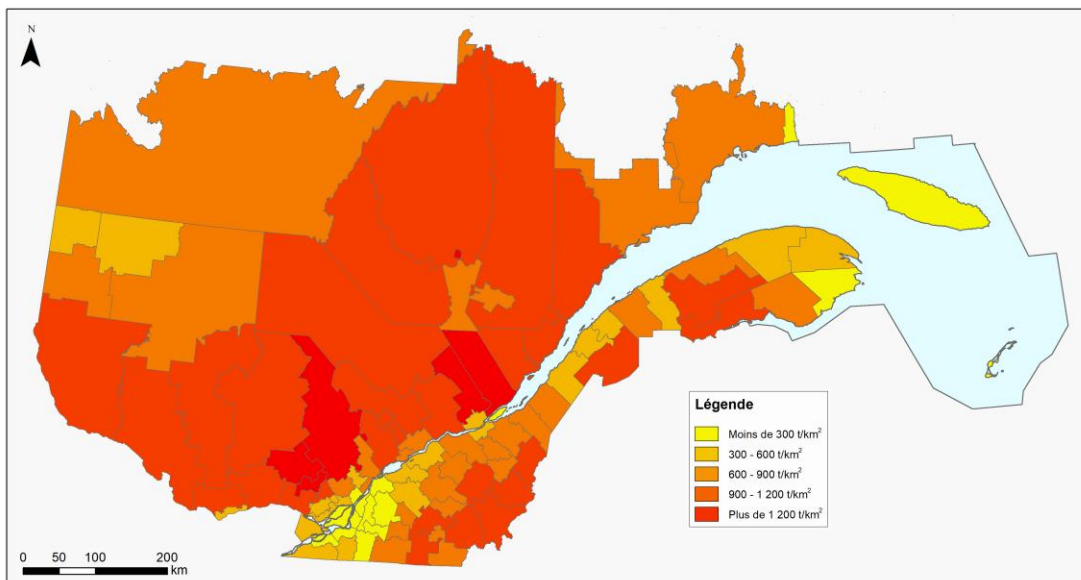


Figure 2.3 Répartition des stocks de carbone total des milieux forestiers par MRC et par km² pour la période 2000-2010

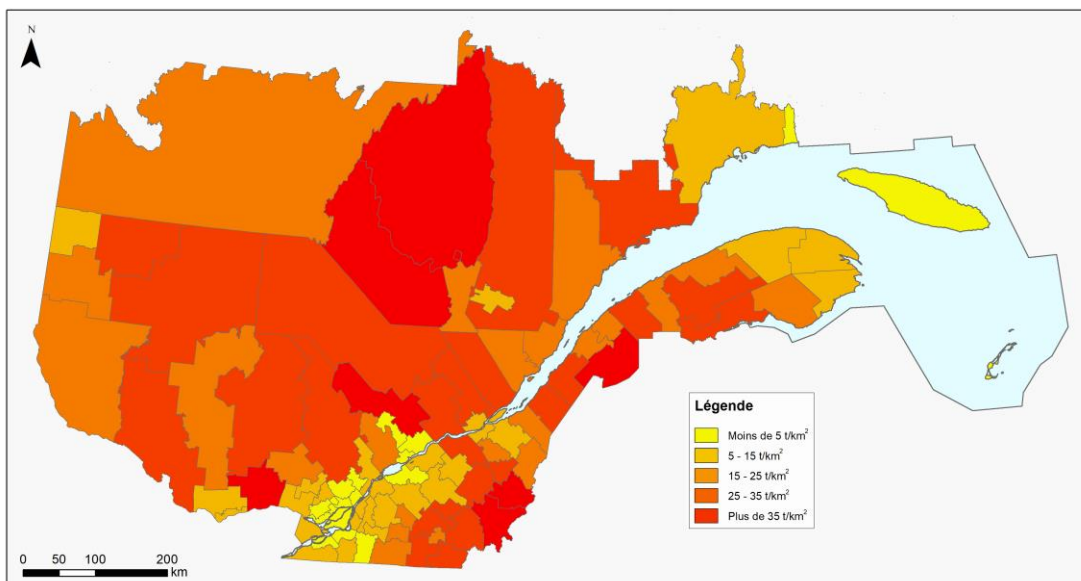


Figure 2.4 Répartition annuelle moyenne du carbone extrait des récoltes de bois par MRC et par km² pour la période 2000-2010

2.3.2 Comptes sur les milieux humides

Puisque les milieux humides possèdent une grande capacité de rétention du carbone par rapport à leur superficie (IPCC, 1996), il est important de présenter les résultats obtenus pour ces milieux de façon distincte des milieux forestiers. En utilisant les données d'utilisation du sol des Comptes des terres du Québec méridional, l'information de chacun des comptes des milieux peut être décomposée entre les deux types de milieux humides proposés par les comptes des terres, soient les milieux humides forestiers et les milieux humides arbustifs et herbacés. Comme le démontre le tableau 2.3, la biomasse aérienne totale se répartit entre districts écologiques (2038 unités spatiales) et est estimée à 252 Mt de carbone. Le carbone contenu dans les sols est pour sa part estimé à 6 346 Mt de carbone et est réparti entre régions naturelles (43 unités spatiales). En tout, le carbone total stocké par les milieux humides est donc estimé à 6 598 Mt. Suivant la même démarche utilisée la figure 2.3, la figure 2.5 illustre la répartition des stocks de carbone total des milieux humides par MRC.

Comparativement aux milieux forestiers, les sols des milieux humides permettent de stocker une quantité de carbone significativement plus importante malgré leurs superficies relatives beaucoup plus petites. Au niveau des flux, la PPB et la PPN ont respectivement permis d'estimer une productivité de 58 Mt et de 35 Mt de carbone annuellement pour la période 2000-2010. Il est également estimé que les changements de couverture du sol ont permis de stocker 5,6 Mt au cours de la période. Cela s'explique par le fait que les superficies des milieux humides forestiers se seraient accrues au cours de la période. Finalement, il est estimé que les feux de forêt créent une perte de carbone vers l'atmosphère de l'ordre de 0,6 Mt de carbone annuellement.

Tableau 2.3 Stocks et flux de carbone entre 2000 et 2010 dans les milieux humides du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN

	Compte	Carbone	Nombre de sous-comptes	Répartition spatiale minimale	Nombre d'unités spatiales
Stock	Carbone dans la biomasse aérienne	252 Mt	-	Districts écologiques	2038
	Carbone dans les sols	6 346 Mt	-	Régions naturelles	43
Flux	Production primaire brute	58 Mt/an	-	1 km	-
	Production primaire nette	35 Mt/an	-	1 km	-
	Feux de forêt	0,06 Mt/an	-	30 m	-
	Changements d'utilisation du sol (gain)	5,6 Mt/an	-	50 m	-

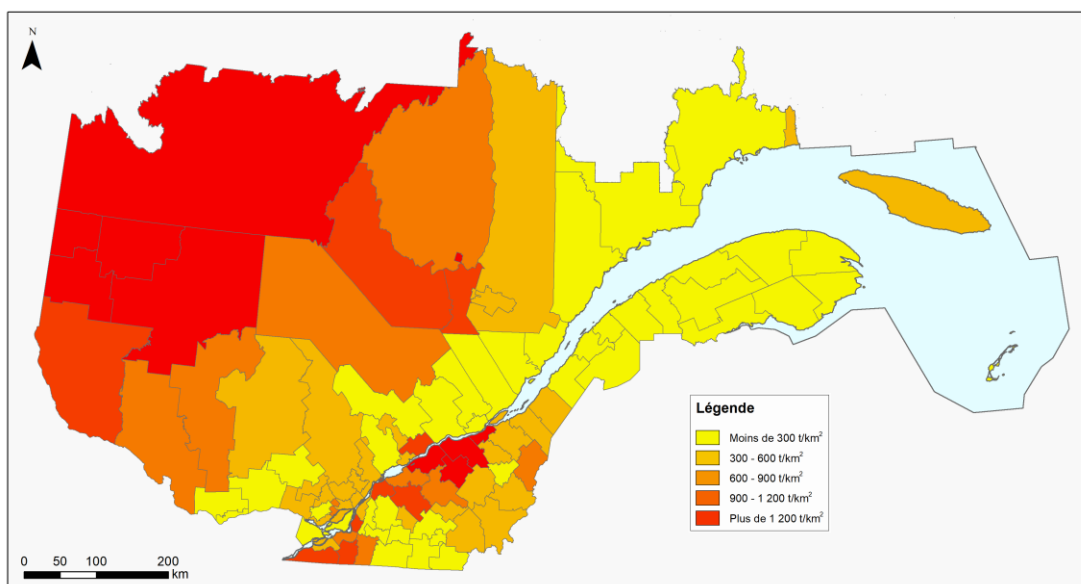


Figure 2.5 Répartition des stocks de carbone total des milieux humides par MRC et par km² pour la période 2000-2010

2.3.3 Comptes sur les milieux agricoles

La plupart des comptes de carbone liés aux milieux agricoles ont pu être répartis par MRC, ce qui délimite le territoire entre 101 unités spatiales. Dans un premier temps, comme le démontre le tableau 2.4, ces comptes permettent d'estimer que le carbone compris dans le bétail recensé en début de période serait de 0,167 Mt, tandis que le carbone en fin de période est estimé à 0,153 Mt. Il y a donc eu une diminution nette de 0,014 Mt de carbone au niveau des stocks de bétail. L'information sur ces stocks peut être répartie en sous-comptes selon sept types ou catégorie d'animaux (e.g. bovin, porc, poulet). Au niveau des flux, le carbone contenu dans les produits de l'élevage du bétail est estimé pour sa part à 0,5 Mt/an pour la période 2000-2010. L'information obtenue peut être divisée en sous-comptes selon le type d'animal, mais aussi par rapport au lait, aux œufs et au miel. De leur côté, les comptes sur les récoltes ont permis d'estimer que 2,7 Mt de carbone a été extraits des champs agricoles annuellement (Figure 2.6). Il est également estimé que les cultures agricoles ont généré des résidus qui sont estimés à 2,5 Mt de carbone annuellement. Les comptes liés aux récoltes peuvent être subdivisés en plus de 20 sous-comptes représentant les différents types de culture agricole. Les données sur le carbone des sols agricole ont pour leur part permis d'estimer que le sol de ces milieux contient 110 Mt de carbone. Finalement, les données sur les changements d'utilisation du sol ont permis d'estimer une diminution de 0,4 Mt de carbone annuellement dans les milieux agricoles dus à une diminution des superficies de ces milieux.

Tableau 2.4 Stocks et flux de carbone entre 2000 et 2010 dans les milieux agricoles du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN

	Compte	Carbone	Nombre de sous-comptes	Répartition spatiale minimale	Nombre d'unités spatiales
Stock	Carbone dans les stocks de bétail	0,167 Mt – 0,153 Mt	7	MRC	101
	Carbone dans les sols	110 Mt	-	MRC	101
Flux	Récolte de produits agricoles	2,7 Mt/an	23	MRC	101
	Produits de l'élevage du bétail	0,5 Mt/an	8	MRC	101
	Diminution nette du stock de bétail	0,001 Mt/an	7	MRC	101
	Résidus de la production agricole	2,5 Mt/an	21	MRC	101
	Changements d'utilisation du sol (perte)	0,04 Mt/an	-	50 m	-

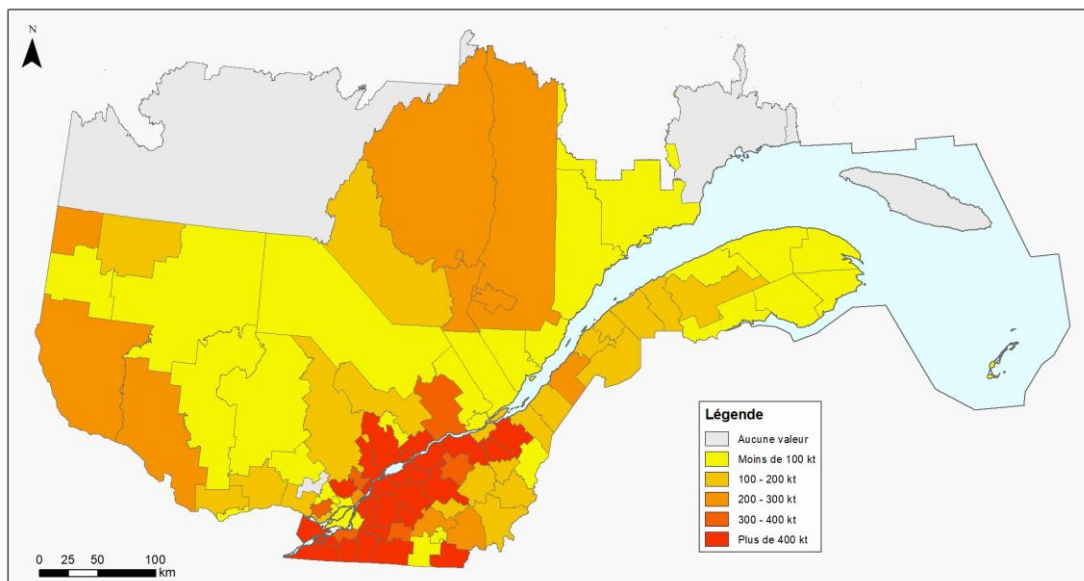


Figure 2.6 Répartition du carbone extrait des cultures agricoles par MRC pour la période 2000-2010

2.3.4 Autres comptes

Les données présentées dans cette section regroupent les comptes qui n'appartiennent pas spécifiquement aux milieux forestiers, humides et agricoles. De plus, l'information recensée n'a pas permis une répartition spatiale efficace des données sur le territoire. Ainsi, les données ont été présentées pour l'ensemble de la zone à l'étude seulement. Dans un premier temps, comme le démontre le tableau 2.5, les données sur l'aquaculture ont permis d'estimer que 0,0002 Mt de carbone ont été récolté annuellement dans ces élevages pour la période 2000-2010. Au niveau des pêches commerciales, il a été estimé que 0,007 Mt de carbone a été récolté annuellement des milieux aquatiques par cette activité. De plus, l'information sur les pêches commerciales peut se diviser entre la pêche maritime et la pêche en eau douce. Ensuite, il a été estimé que 953 Mt de carbone se trouvent dans l'atmosphère au-dessus de la zone à l'étude. Finalement, les comptes sur les émissions de carbone démontrent que les activités anthropiques au Québec ont généré des émissions annuelles de 18 Mt de carbone vers l'atmosphère pour la période 2000-2010. De plus, l'information qui y est présentée peut être divisée en 61 sous-comptes selon le type d'usage ou d'industrie dans lesquels ces émissions ont été générées.

Tableau 2.5 Stocks et flux de carbone entre 2000 et 2010 dans les milieux humides du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN

	Compte	Carbone	Nombre de sous-comptes	Répartition spatiale minimale	Nombre d'unités spatiales
Stock	Carbone dans l'atmosphère	952 Mt	-	Provinciale	1
Flux	Émissions de carbone dû à l'énergie fossile	18 Mt/an	61	Provinciale	1
	Aquaculture	0,0002 Mt/an	-	Provinciale	1
	Pêche commerciale	0,007 Mt/an	2	Provinciale	1

2.4 Discussion

Le travail effectué dans le cadre de la présente étude permet de dresser un premier portrait des comptes expérimentaux du carbone proposés par le SCEE pour le Québec méridional. Les résultats obtenus démontrent qu'une implantation d'une comptabilité du carbone dans le cadre du SCEE est réalisable dans la province. De plus, ces résultats indiquent qu'une répartition spatiale de l'information liée à une majorité de comptes générés est possible, ce qui confirme que l'information qui est produite pourra soutenir la prise de décision à différentes échelles spatiales.

Les résultats obtenus sur le stockage de carbone des milieux naturels se comparent avec les chiffres de l'étude de Colombo et al. (2007). Dans cette étude, les auteurs estiment que les milieux naturels des unités d'aménagement forestier de l'Ontario possèdent un stock de carbone moyen de 4 280 Mt de carbone pour la période 2000-2010 et ce en prenant à la fois le carbone aérien et le carbone au niveau du sol. De plus, selon les données géographiques produites par le Ministère des ressources naturelles de l'Ontario, ces unités d'aménagement ont une superficie totale d'environ 440 000 km². Cette étude estime donc que le stock de carbone est d'environ 9 727 tC/km². De son côté, la présente étude estime un stock de carbone de 19 517 tC/km² pour les milieux naturels du Québec méridional. Les comptes liés au stockage de carbone des milieux naturels font partie des comptes principaux mis de l'avant par la TDR-CECN et cette comparaison permet d'observer que les résultats obtenus sont deux fois plus élevés que ce qui est obtenu par l'étude de Colombo et al. (2007), ce qui tend à démontrer que la démarche utilisée surestime potentiellement le stock réel de carbone qui se trouve sur dans les milieux naturels du Québec méridional.

De plus, les résultats obtenus sur plusieurs autres comptes doivent être utilisés avec prudence. En effet, comme le présent projet est un premier exercice en comptabilité du carbone dans le cadre du SCEE pour le Québec méridional, beaucoup de travail

doit être effectué afin d'améliorer la précision des comptes produits dans cette étude. De plus, des efforts supplémentaires doivent être mis de l'avant afin de produire l'information nécessaire à la production des comptes qui n'ont pu être générés au cours du présent projet (voir Annexe K). Les prochains paragraphes décriront plus en détail diverses limites liées aux comptes produits afin d'orienter les besoins en recherches supplémentaires.

Dans un premier temps, certains comptes liés aux flux de carbone jugés importants n'ont pu être générés lors du présent projet. Au niveau des milieux forestiers, aucune source d'information n'a été identifiée permettant de faire des estimations sur les résidus produits lors des coupes forestières, ainsi que sur l'utilisation de ces résidus. De plus, aucune source d'information suffisamment précise n'a été identifiée afin de permettre de produire les comptes de carbone contenu dans la litière et le bois mort, ainsi que par rapport à la respiration des hétérotrophes qui rejette du carbone de façon importante dans l'atmosphère (Davidson et al., 2006). Ces deux catégories de compte n'ont pas été produites autant pour les milieux forestiers que les milieux humides. En ce qui concerne les milieux humides plus spécifiquement, des estimations fiables du carbone se trouvant dans les extractions de tourbe n'ont pu être réalisées. En effet, bien que l'ISQ rend disponibles des données sur les volumes de tourbes (ISQ, 2018), ces données ne permettent pas de connaître la densité de matière organique contenue dans ces volumes. Comme les densités de différents volumes de tourbe sont très variables (Clymo et al., 1998), aucune estimation n'a été produite. Au niveau des données agricoles, l'étude de Guzmán et al. (2014) a été utilisée afin d'estimer les résidus produits dans les milieux agricoles. Toutefois, aucune source d'information n'a permis de déterminer comment ces résidus sont utilisés. Pour les milieux aquatiques, seuls les comptes liés à la pêche commerciale ont pu être produits. Cela s'explique d'abord par le fait qu'aucune source d'information permettant de caractériser les stocks de biomasses aquatiques n'a été identifiée. Ensuite, bien que Pêche et Océan Canada produit des données sur la pêche récréative, les valeurs qui y

sont comptabilisées sont calculées en nombre de prise et non en poids (MPO, 2012). Comme des données en poids sont nécessaires pour pouvoir produire des estimations de quantité de carbone, aucune estimation n'a été réalisée à ce niveau. Finalement, aucune source d'information n'a permis d'estimer le carbone contenu dans les importations et les exportations de marchandises, ainsi que dans les boues d'épuration.

Ensuite, bien que plusieurs des comptes de stocks aient pu être produits, les stocks de carbone contenus dans la biomasse aérienne et dans les sols ont été produits lors d'une période donnée seulement. Cela représente une limite comptable importante puisque le système proposé par la TDR-CECN repose sur des stocks d'ouverture et de fermeture, auxquels les comptes de flux servent à expliquer les variations (Weber, 2014a). De plus, le fait d'avoir de l'information à un temps donné seulement ne permet pas l'analyse temporelle des stocks de carbone, ce qui limite grandement l'utilité de la présente démarche.

Pour leur part, les comptes de carbone provenant des milieux agricoles permettent en règle générale une bonne répartition spatiale sur le territoire et possèdent un grand niveau de détail puisque l'information sur les récoltes et le bétail peut être divisée en plusieurs classes. Toutefois, bien que l'étude de Guzmán et al. (2014) offre des facteurs précis et détaillés, elle possède deux limites par rapport au projet actuel. Premièrement, les facteurs qui y sont présentés sont calculés d'un point de vue international et ne prennent ainsi pas en compte les spécificités de l'agriculture québécoise. Ensuite, ces mêmes facteurs sont exprimés en joule et doivent être convertis en carbone. Des données exprimées en carbone et spécifiques à un contexte québécois seraient donc susceptibles d'améliorer la précision de ces comptes. De plus, les données utilisées provenant de la FAO ayant servi à produire les données de carbone contenu dans les sols sont en cours de validation (FAO, 2018). À défaut d'avoir trouvé des sources de données plus précises, ce sont les données de la FAO

qui ont été utilisées. Il serait toutefois intéressant d'identifier une source d'information dont la fiabilité est évaluée.

En ce qui concerne les milieux humides, l'étude de Garneau et van Bellen (2016), qui a servi à générer les comptes de carbone se trouvant dans le sol, porte sur les tourbières en particulier et non sur l'ensemble des milieux humides. Comme aucune source d'information n'a été identifiée pour compléter directement l'étude de Garneau et van Bellen (2016), il serait utile qu'un jeu de données sur le carbone contenu dans le sol des autres types de milieux humides soit produit.

Au niveau des pêches commerciales, les quantités de poissons récoltés ont été converties en valeur de carbone selon l'étude de Boyd et al. (2007). Comme cette conversion est basée sur un seul taux global, il serait pertinent de générer de l'information portant plus spécifiquement les taux de carbone moyens contenus dans les espèces de poissons pêchés au Québec.

Les comptes des changements d'utilisation du sol ont pour leur part ont été calculés à partir d'estimations simples faites à l'aide des valeurs produites par les comptes de stock. Cette approche a été utilisée par défaut puisqu'aucune source d'information n'a été identifiée sur l'effet qu'ont les divers changements d'utilisation du sol sur les stocks de carbone. Il serait intéressant qu'une recherche plus approfondie à ce niveau soit effectuée dans un contexte québécois afin de pouvoir réaliser des estimations plus précises.

Finalement, la majorité des comptes produits peut être répartie sur le territoire, ce qui permet d'effectuer des analyses pour différentes régions. Cependant, selon l'échelle spatiale utilisée, la précision des estimations qui en résulte est variable d'un compte à l'autre puisque certaines proviennent de données qui possèdent une résolution spatiale beaucoup moins précise que d'autres. Une production de données pouvant

être spatialisées de façon fine sur le territoire permettrait de diminuer grandement cet effet.

Ces limites démontrent qu'il y a plusieurs enjeux liés à la production des comptes du carbone écosystémique comme proposé par la TDR-CECN. Ces enjeux s'articulent d'abord sur la disponibilité et la précision des données, mais aussi par rapport aux facteurs de conversion permettant d'estimer des quantités de carbone à partir des données brutes qui manquent parfois de précision et ne permettent pas toujours une bonne distinction régionale puisque certains sont uniques et d'autres proviennent de sources internationales. Comme expliqué par la TDR-CECN, étant donné le volet expérimental de ce cadre comptable, il faut s'attendre à faire face à ce type d'enjeux, peu importe la région du monde dans laquelle le cadre de la TDR-CECN est appliqué (Weber, 2014a). Les difficultés rencontrées dans la réalisation du présent projet de recherche sont donc loin d'être spécifiques au contexte du Québec méridional.

De surcroît, il est aussi possible de constater que les défis d'application liés à ce type de comptabilité sont intrinsèquement liés à la qualité des résultats qui peuvent être générés. Une validation des sources utilisées et de la méthodologie employée est donc nécessaire. Toutefois, puisque l'application de ce type de comptabilité nécessite un nombre important de jeux de données et de sources d'information provenant souvent de champs d'expertise distincts, cette validation ne peut se faire facilement. La TDR-CECN (Weber, 2014a) incite beaucoup sur l'importance de la collaboration et les auteurs de la présente étude est lui aussi tout à fait de cet avis. Ainsi plusieurs experts de domaines différents ont été approchés au cours du présent projet de façon à augmenter la probabilité d'identifier les meilleures données et sources d'information disponibles. Néanmoins, les auteurs conçoivent qu'il est probable que certains jeux donnés et sources d'information plus précise et mieux adaptée au présent projet de recherche puissent exister. Ce projet se veut en effet un premier exercice en comptabilisation du carbone selon le SCEE pour le Québec méridional et n'a

nullement la prétention de produire des résultats finaux. Une collaboration étroite avec des experts des différents domaines concernés doit donc de se poursuivre afin d'améliorer la qualité des comptes produits.

2.5 Conclusion

Les résultats obtenus par le présent projet de recherche permettent de dresser un premier portrait des comptes du carbone du Québec méridional pour la période 2000-2010. De surcroît, cette recherche prend son importance du fait que cette comptabilisation spécifique au carbone représente une première initiative dans le cadre du SCEE en Amérique du Nord. Plus spécifiquement, au niveau des milieux naturels, des estimés de carbone ont été compilés pour la biomasse aérienne, les sols, la PPN et la PPB, les feux de forêt ainsi que sur la récolte du bois. Au niveau agricole, des estimations de carbone ont été compilées par rapport aux sols des champs agricoles, aux stocks de bétail, aux récoltes, ainsi qu'aux produits de l'élevage du bétail. En ce qui concerne les autres comptes, des estimations de carbone ont pu être compilées par rapport aux changements d'utilisation du sol, à la pêche commerciale, à l'aquaculture, aux émissions provenant des activités anthropiques, ainsi qu'aux stocks de carbone atmosphérique.

Bien que beaucoup de travail reste à réaliser afin d'améliorer les procédures et de générer les comptes qui n'ont pu être produits, les résultats obtenus ont permis de mettre sur pieds une base de données qui pourra contribuer à l'orientation de politiques de gestion des ressources naturelles et de lutte contre les changements climatiques en permettant une comparaison entre région de différents stocks et flux de carbone. Toutefois, comme ce projet se veut un premier exercice, les retombées qu'il pourrait éventuellement générer sont beaucoup plus grandes. En effet, le cadre utilisé vise à terme la production de données temporelles qui permettront un suivi des

différents stocks et flux de carbone. Cela pourra grandement aider les gestionnaires à cibler et évaluer l'efficacité de leurs politiques. De plus, des comptes supplémentaires pourront être produits et d'autres, améliorés afin d'offrir, encore davantage d'information. Ainsi, la présente étude ouvre la porte à de futurs projets de recherches en vue de poursuivre l'implémentation des comptes du carbone du SCEE du Québec méridional. De surcroît, la méthodologie et les résultats obtenus par ce projet de recherche pourront servir de base et de point de comparaison en vue d'une implémentation de ces comptes du carbone du SCEE dans d'autres régions du monde.

CHAPITRE III

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les écosystèmes subissent une pression importante provenant des activités humaines (Rockström et al., 2009; Obst et Vardon, 2014). Bien que cette problématique soit complexe et que plusieurs facteurs peuvent être mis de l'avant pour l'expliquer, celui qui a été considéré par le présent projet de recherche est le manque d'information disponible. Avec peu d'information concrète et accessible sur l'évolution de l'état des écosystèmes, les décideurs peuvent difficilement prendre des directions optimales concernant la gestion du capital naturel (Harris et Fraser, 2002). Une solution à ce problème est mise de l'avant par le SCEE qui propose l'établissement d'une comptabilité du capital naturel (SEEA-CF, 2012). Des initiatives ont été réalisées en vue de son implantation au Canada et récemment au Québec (Statistique Canada, 2012-2016; Uhde et Keith, 2017). Basé sur la TDR-CECN, un ouvrage annexe au SCEE, l'objectif de ce mémoire était de dresser un premier portrait des comptes expérimentaux du carbone pour le Québec méridional. Pour atteindre cet objectif, une procédure a d'abord été mise de l'avant afin de produire les comptes expérimentaux de carbone selon le SCEE dans la province. Ensuite, la qualité, ainsi que la disponibilité, des données et des sources d'information ont été répertoriées pour les différents types de comptes. Cela permet d'exposer les besoins en recherche afin de permettre l'avancement de la comptabilité du carbone au Québec. Finalement, des tableaux ont été produits afin d'illustrer les résultats obtenus. Ces résultats démontrent un portrait de différents stocks et flux de carbone pour le Québec méridional pour la période 2000-2010.

Les trois questions de recherche de ce mémoire étaient articulées autour de la disponibilité et de la qualité des sources de données et d'information. Plus spécifiquement, ces questions étaient : (a) «Existe-t-il suffisamment de données et de sources d'information pour dresser un premier portrait de la majorité des comptes expérimentaux de carbone proposés par la TDR-CECN dans un contexte québécois?»; (b) «L'analyse de l'évolution temporelle des comptes expérimentaux de carbone produits selon la TDR-CECN est-elle possible dans le contexte québécois?»; et (c) «L'information disponible permettant la production des comptes expérimentaux du carbone dans un contexte québécois selon la TDR-CECN est-elle suffisamment précise pour permettre une répartition spatiale de la majorité des données par MRC?».

La réponse à la première question, i.e. «il existe suffisamment de données et de sources d'information pour produire un premier portrait de la majorité des comptes expérimentaux de carbone», n'est pas concluante. D'abord, les données et l'information disponible permettent d'estimer des valeurs de carbone pour plusieurs des comptes liés aux comptes de stocks et de flux. Néanmoins, un nombre considérable de comptes décrits dans la TDR-CECN par rapport aux stocks et flux de carbone n'ont pu être produits. Par exemple, au niveau des stocks, les comptes de carbone se trouvant dans la litière et le bois mort et de carbone se trouvant dans la biomasse aquatique n'ont pu être produits. Au niveau des comptes de flux, les comptes d'extraction de tourbe et de carbone retourné dans l'atmosphère par la respiration des hétérotrophes n'ont entre autres, pas été produits. Le manque de données le plus flagrant se trouve toutefois au niveau de l'utilisation du carbone. En effet, les données sur le carbone inclus dans les importations et exportations ne sont pas suffisamment détaillées pour permettre la production des comptes d'utilisation du carbone. De même, le manque d'information entourant sur l'utilisation des résidus provenant des boues d'épuration, ainsi que de l'exploitation agricole et forestière, fait en sorte que les comptes de la ressource en carbone accessible n'ont pas été produits. Bien que plusieurs comptes aient pu être produits, on ne parle pas d'une majorité

forte. Il reste donc du travail à accomplir afin de générer la totalité des comptes proposés par la TDR-CECN.

Pour sa part, la seconde question, i.e. «l'analyse de l'évolution temporelle des comptes expérimentaux de carbone est réalisable», n'est également pas répondue avec succès. Cela s'explique principalement par le fait les stocks de carbone des deux plus grands puits de carbone, soit la biomasse aérienne et la biomasse des sols des milieux naturels, ne sont disponibles que pour une période donnée. De leurs côtés, plusieurs des données sur les flux de carbone sont disponibles annuellement pour la période 2000-2010. L'information liée à ces comptes pourrait donc être utilisée pour faire des analyses temporelles. Néanmoins, comme les comptes de stocks forment la base de la comptabilité proposée par la TDR-CECN (Weber, 2014a) et que les données permettant de les produire les comptes de carbone contenu dans la biomasse aérienne et des sols ne sont disponibles que pour une seule période temporelle, il sera nécessaire que davantage de données soient produites pour qu'une réelle interprétation temporelle puisse être réalisée.

De son côté, la troisième question, i.e. «l'information disponible suffisamment précise pour permettre une répartition spatiale de la majorité des données par MRC», est répondue positivement. En effet, sauf pour quelques exceptions, la répartition spatiale des données sur le territoire était possible. Bien que cette répartition spatiale se fasse selon de découpages différents selon les jeux de données, ils permettent néanmoins de répartir les valeurs des différents comptes sur la grille au 50 mètres utilisé, et ainsi, des estimations par MRC peuvent être réalisées. Notons toutefois que la précision de ces estimations varie pour les différents comptes. En effet, les estimations produites à l'aide de données réparties sur des territoires de plus grandes superficies que celles des MRC seront nécessairement moins précises que ceux produits à l'aide de données possédant une répartition spatiale plus fine.

Suite aux résultats obtenus dans ce mémoire, il est possible de conclure qu'il y a suffisamment de données disponibles pour dresser les premières bases d'une comptabilité du carbone au Québec. En effet, des résultats sur plusieurs des comptes de stocks et de flux de carbone ont pu être produits. Toutefois, les résultats démontrent également qu'il y a encore beaucoup de travail à faire dans le domaine. En effet, plusieurs limites ont été recensées par le présent projet de recherche. Ces limites s'articulent autour de la disponibilité et la précision des données, ainsi que sur les facteurs de conversion qui manquent parfois de précision et qui ne permettent pas toujours une bonne répartition régionale de l'information due au fait qu'ils sont parfois uniques ou proviennent de sources internationales.

Plus spécifiquement, les limites recensées ciblent les principaux comptes qui pourraient être améliorés ou produits. D'abord, des recherches doivent être menées afin d'être en mesure de bien estimer les quantités de carbone inclus dans les importations et les exportations afin de pouvoir produire les comptes d'utilisation du carbone. De même, de l'information sur l'utilisation des résidus provenant des exploitations agricoles et forestières, ainsi que des boues d'épuration, doit être définie et incorporée au projet afin de pouvoir produire les comptes du carbone accessibles. De plus, les données sur les stocks de carbone, particulièrement forestier, devraient être évaluées de façon plus fréquente afin de permettre les analyses temporelles. De surcroît, les données pour certains autres comptes n'étaient pas disponibles ou incomplètes. Des recherches supplémentaires devraient idéalement être réalisées afin de les compléter ou les produire. Également, certains comptes produits bénéficieraient de données plus précises afin de pouvoir améliorer la précision des résultats. Finalement, ce type de comptabilité bénéficierait grandement de données brutes produites à des échelles plus fines afin d'en augmenter sa précision ainsi que son potentiel d'applications pratiques.

Bien que plusieurs limitent ont été définies par le présent projet, il est bon de rappeler que ces résultats ne sont pas surprenants. En effet, la TDR-CECN met beaucoup d'emphase sur le fait que la comptabilité qu'elle propose comporte une grande partie expérimentale et que les données et sources d'information nécessaires à la production des différents comptes qui y sont proposés, ne sont pas toujours évidents à trouver et peuvent parfois nécessiter des compromis liés à leur précision (Weber, 2014a). Les difficultés rencontrées dans la réalisation du présent projet de recherche sont donc loin d'être spécifiques au contexte du Québec méridional. De surcroît, il a également été expliqué que vu que la comptabilité proposée par la TDR-CECN propose un très grand nombre de comptes différents, plusieurs jeux de données et sources d'information appartenant à des domaines distincts sont nécessaires. Cela fait en sorte que la validation des sources à utiliser peut parfois être ardue. De ce fait, une collaboration étroite avec des experts des différents domaines concernés est fortement conseillée afin d'augmenter les probabilités que les meilleurs jeux de données et sources d'information disponibles soient utilisés.

En conclusion, il est bon de rappeler que la CECN est un champ émergent et que ce mémoire, tout comme les autres projets mis de l'avant dans le cadre du SCEE jusqu'à ce jour, ne sont que les premiers pas effectués dans le domaine. Si les efforts et les ressources y sont suffisamment investis, la CECN a le potentiel d'avoir éventuellement un impact significatif sur notre façon de gérer les écosystèmes. En effet, ce projet permettrait à terme d'effectuer des analyses régionales et temporelles des différents stocks et flux de carbone de Québec méridional, ce qui grandement aider les gestionnaires à cibler et à évaluer leurs politiques. À l'heure actuelle, le plus gros du travail reste à accomplir et c'est en peaufinant les différentes méthodes, données et sources d'information qu'il sera possible d'y arriver. En plus de pouvoir servir de référence et de points de comparaison par rapport à d'autres projets en CECN, cette étude pourra donc servir de base à de futurs travaux afin d'orienter une

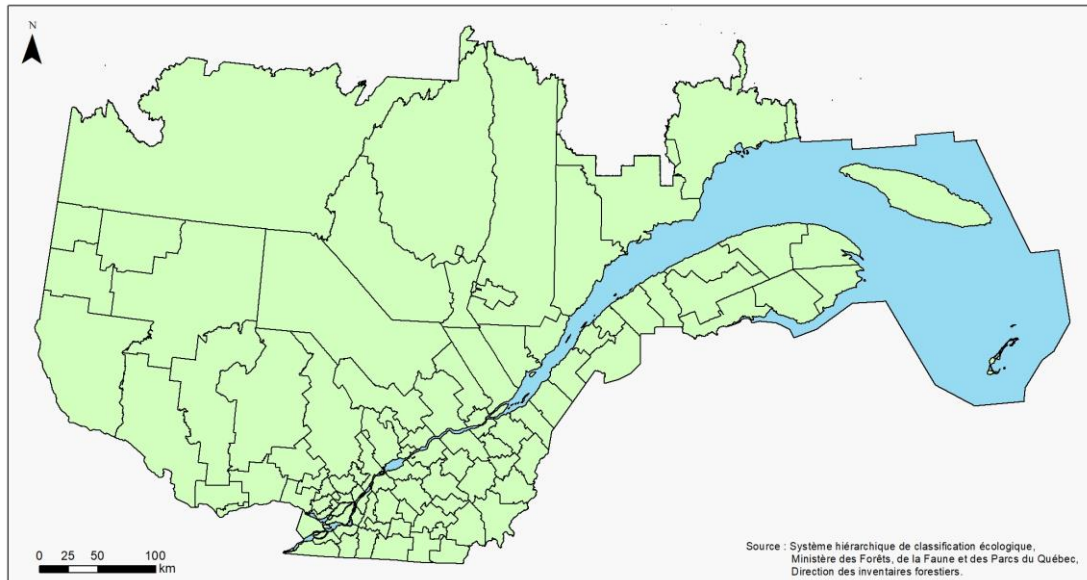
production plus complète et précise des comptes expérimentaux du carbone pour le Québec méridional.

ANNEXES

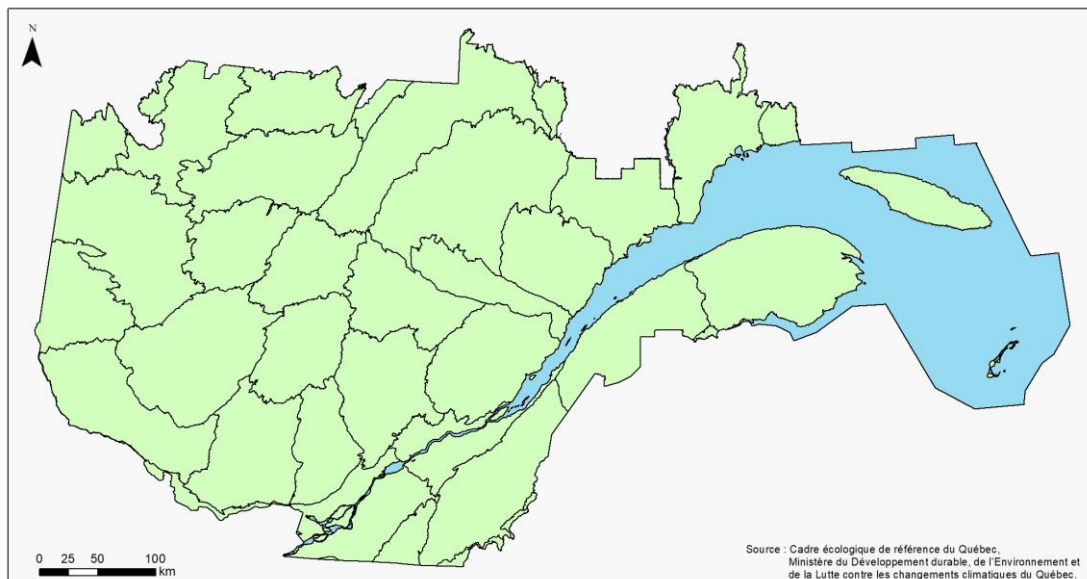
Annexe A : Tableau des opérations utilisées pour compiler chacun des comptes de la TDR-CECN au cours du présent projet

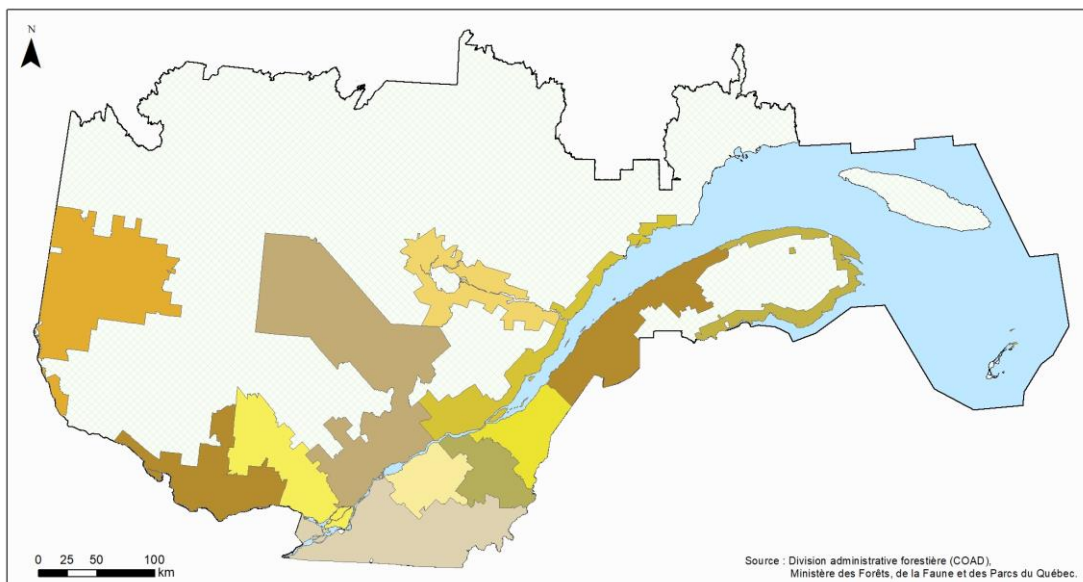
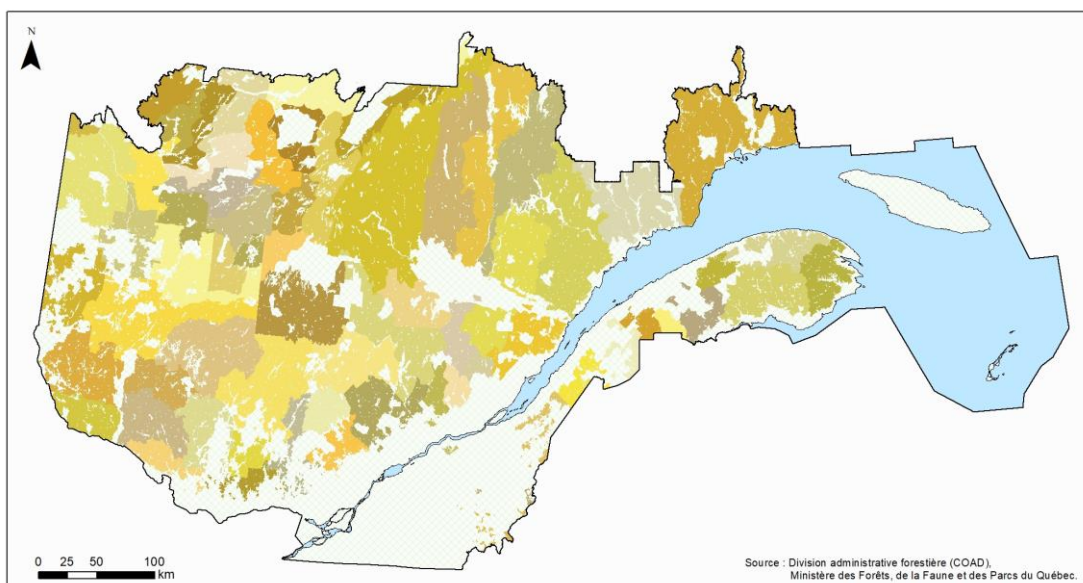
Compte	Désagrégation	Agrégation	Extrapolation	Multiplication	Aucune opération
Carbone dans la biomasse aérienne			X		
Carbone dans les sols	X				
Production primaire brute et nette		X			
Feux de forêt		X			
Récolte de bois	X				
Carbone dans les stocks de bétail	X				
Récolte de produits agricoles	X				
Produits de l'élevage du bétail	X				
Diminution nette du stock de bétail	X				
Résidus de la production agricole				X	
Changements d'utilisation du sol				X	
Carbone dans l'atmosphère					X
Émissions de carbone dû à l'énergie fossile					X
Aquaculture					X
Pêche commerciale					X

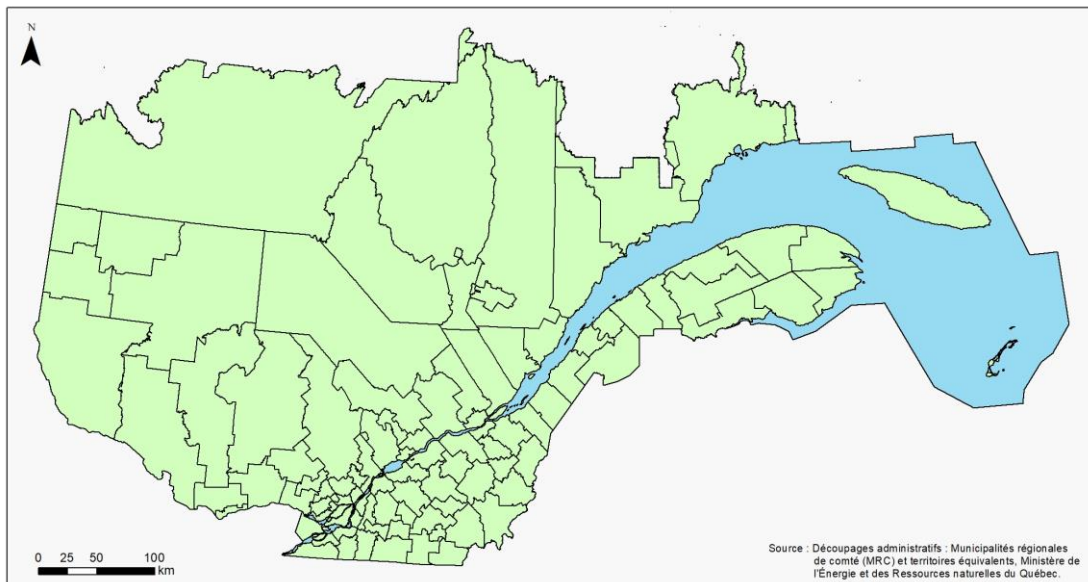
Annexe B : Carte de la répartition des districts écologiques



Annexe C : Carte de la répartition des régions naturelles



Annexe D : Carte de la répartition des syndicats de producteurs forestiers**Annexe E : Carte de la répartition des unités d'aménagement forestier**

Annexe F : Carte de la répartition des municipalités régionales de comté

Annexe G : Tableau détaillé des stocks carbone entre 2000 et 2010 du Québec méridional répartis selon l'ensemble comptes de la TDR-CECN

Compte	Carbone (Mt)
Carbone dans la biomasse aérienne des milieux forestiers	1 668
Carbone dans la biomasse aérienne des milieux humides	252
Carbone dans les sols des milieux forestiers	3 456
<i>Horizon organique</i>	<i>2 390</i>
<i>Horizon minéral</i>	<i>1 774</i>
Carbone dans les sols des milieux humides	6 346
Carbone dans les sols des milieux agricoles	110
Carbone dans l'atmosphère	952
Carbone dans les stocks de bétail²	0,153
<i>Bovins</i>	<i>0,065</i>
<i>Porc</i>	<i>0,078</i>
<i>Poulet</i>	<i>0,08</i>
<i>Dinde</i>	<i>0,02</i>
<i>Autres volailles</i>	<i>0,0003</i>
<i>Mouton et agneau</i>	<i>0,0008</i>
<i>Autre bétail</i>	<i>0,0003</i>

² Pour le stock de bétails, des données étaient disponibles en début et en fin de période. Ce tableau présente les données en fin de période seulement.

Annexe H : Tableau détaillé des flux carbone entre 2000 et 2010 du Québec méridional répartis selon les comptes des milieux agricoles de la TDR-CECN

Compte	Mt/an de carbone contenu dans les produits agricoles	Mt/an de carbone contenu dans les résidus
Produits de l'élevage du bétail	0,521	-
<i>Bovins</i>	0,041	-
<i>Porc</i>	0,212	-
<i>Mouton et agneau</i>	0,0004	-
<i>Poulet</i>	0,040	-
<i>Dinde</i>	0,005	-
<i>Lait</i>	0,219	-
<i>Œuf</i>	0,004	-
<i>Miel</i>	0,0004	-
Grandes cultures	2,291	2,537
<i>Avoine</i>	0,094	0,141
<i>Blé</i>	0,051	0,077
<i>Canola</i>	0,007	0,007
<i>Grains mélangés</i>	0,023	0,024
<i>Haricots</i>	0,005	0,008
<i>Maïs (fourrage)</i>	0,615	0,620
<i>Maïs (grain)</i>	1,132	1,141
<i>Orge</i>	0,140	0,164
<i>Soja</i>	0,223	0,355
Fruits et légumes³	0,086	0,004
Foin	0,340	-
Sirop d'érable	0,010	-

³ Il existe plusieurs sous comptes de fruits et légumes. Toutefois, de par leur faible valeur, ils ne sont pas présentés dans ce tableau.

Annexe I : Tableau détaillé des flux carbone entre 2000 et 2010 du Québec méridional répartis selon les comptes de la TDR-CECN n'appartenant pas aux milieux agricoles

Compte	Carbone (Mt/an)
Production primaire brute des milieux forestiers	348
Production primaire brute des milieux humides	58
Production primaire nette des milieux forestiers	205
Production primaire nette des milieux humides	35
Feux de forêt (milieux forestiers)	0,8
Feux de forêt (milieux humides)	0,06
Récolte de bois (forêt publique)	11,58
<i>Bouleau à papier</i>	<i>0.75</i>
<i>Bouleau jaune</i>	<i>0.26</i>
<i>Érable</i>	<i>0.52</i>
<i>Peuplier</i>	<i>0.69</i>
<i>Autres Feuillus durs</i>	<i>0.16</i>
<i>Pins blanc et rouge</i>	<i>0.09</i>
<i>Pruche</i>	<i>0.02</i>
<i>SEPM</i>	<i>9.02</i>
<i>Thuya</i>	<i>0.06</i>
Récolte de bois (forêt privée)	2.09
<i>Peuplier</i>	<i>0.48</i>
<i>Feuillus mélangés</i>	<i>0.44</i>
<i>Sapin, épinettes, pin gris et mélèzes</i>	<i>1.02</i>
<i>Autres résineux</i>	<i>0.15</i>
Émissions de carbone dû à l'énergie fossile⁴	18
Aquaculture	0,0002
Pêche commerciale	0,007

⁴ Il est possible de se référer à l'Inventaire canadien des gaz à effet de serre, produit par Environnement et Changement Climatique Canada, pour avoir un portrait plus détaillé de ces comptes.

**Annexe J : Tableau des principaux stocks et flux carbone entre 2000 et 2010
répartis entre MRC pour le Québec méridional**

MRC	Stock de carbone total dans la biomasse aérienne et les sols des milieux naturels (t)	Production primaire nette (t/an)	Feux de forêt (t/an)	Récolte de bois (t/an)	Produits de l'élevage du bétail (t/an)	Récolte de produits agricoles (t/an)	Résidus de la production agricole (t/an)
Abitibi	35 801 994	2 687 972	127	199 397	1 183	12 881	11 997
Abitibi-Ouest	11 387 335	1 183 486	90	36 087	1 918	19 581	18 236
Acton	551 534	169 823	-	10 732	14 300	46 670	43 465
Antoine-Labelle	25 106 656	8 886 307	12	559 199	1 780	8 350	7 777
Argenteuil	2 151 997	622 625	-	13 140	2 468	15 515	14 450
Arthabaska	2 905 538	618 846	-	18 453	20 760	86 082	80 170
Avignon	3 917 665	2 161 079	91	114 970	435	3 278	3 053
Beauce-Sartigan	2 676 490	929 977	-	73 779	5 953	15 161	14 120
Beauharnois-Salaberry	377 459	37 784	-	2 363	4 381	71 413	66 508
Bécancour	2 239 372	345 193	-	10 288	9 684	47 603	44 334
Bellechasse	2 121 116	673 510	-	25 522	25 802	45 706	42 567
Bonaventure	5 140 076	2 680 619	-	129 110	389	5 886	5 482
Brome-Missisquoi	1 818 149	636 131	-	40 201	15 669	75 575	70 385
Charlevoix	4 994 560	2 237 328	132	94 290	2 829	4 237	3 946
Charlevoix-Est	3 133 145	1 383 800	34	67 724	2 051	2 087	1 944
Coaticook	1 377 333	539 173	2	34 054	15 226	40 087	37 334
D'Autray	1 742 541	437 673	-	9 723	9 030	61 987	57 730
Deux-Montagnes	253 633	53 200	-	715	1 095	13 164	12 260
Drummond	2 515 676	432 872	-	12 907	23 415	108 568	101 111
Gatineau	253 506	84 113	-	2 069	234	2 731	2 544
Joliette	388 983	81 798	2	252	3 909	30 408	28 319
Kamouraska	2 494 732	1 075 941	14	91 429	8 547	21 662	20 174
La Côte-de-Beaupré	6 785 129	2 918 084	-	136 908	479	2 096	1 952
La Côte-de-Gaspé	4 945 756	2 570 048	-	132 396	60	319	297
La Haute-Côte-Nord	14 531 336	6 980 635	160	330 477	224	1 538	1 433
La Haute-Gaspésie	6 078 982	3 193 929	-	156 579	79	915	852
La Haute-Yamaska	656 083	211 555	-	13 371	12 380	29 451	27 429
La Jacques-Cartier	4 657 405	1 934 723	98	87 218	822	3 872	3 606
La Matanie	3 928 727	1 920 196	-	116 257	1 722	7 793	7 258
La Matapédia	6 289 176	3 111 402	-	167 376	2 801	16 073	14 969
La Mitis	2 513 642	1 133 777	-	66 771	4 420	14 014	13 052
La Nouvelle-Beauce	917 947	277 049	-	19 160	29 090	44 065	41 039
La Rivière-du-Nord	690 073	216 593	-	3 095	717	2 632	2 451
La Tuque	53 647 968	15 407 071	74,591	990 434	39	338	315
La Vallée-de-la-Gatineau	26 293 719	7 273 199	286	309 290	727	6 877	6 404
La Vallée-de-l'Or	90 450 089	11 691 528	46,488	712 088	741	2 920	2 719
La Vallée-du-Richelieu	263 863	74 561	6	4 712	3 137	73 169	68 144
Lac-Saint-Jean-Est	6 128 668	1 255 433	871	63 424	6 771	25 046	23 326
L'Assomption	198 492	33 905	-	103	1 678	23 049	21 466
Laval	210 761	33 192	-	458	94	5 589	5 205
Le Domaine-du-Roy	36 162 613	9 851 557	158,911	696 901	2 549	14 828	13 809
Le Fjord-du-Saguenay	48 050 977	17 703 392	127,174	906 275	3 555	20 775	19 348
Le Granit	4 548 552	1 444 555	6	104 411	4 234	10 872	10 125
Le Haut-Richelieu	896 995	65 265	-	4 125	16 278	160 210	149 207
Le Haut-Saint-François	3 631 928	1 105 811	81	72 492	5 757	19 221	17 901
Le Haut-Saint-Laurent	2 086 305	277 853	13	17 428	7 624	100 673	93 759
Le Rocher-Percé	3 572 636	1 907 621	25	81 612	101	1 207	1 124

Le Val-Saint-François	1 649 732	612 044	-	38 677	9 142	19 412	18 079
L'Érable	3 263 967	423 980	2	12 643	12 716	30 890	28 769
Les Appalaches	2 498 141	894 700	-	64 429	8 463	15 966	14 870
Les Basques	1 121 708	526 231	-	32 977	2 404	10 184	9 485
Les Chenaux	1 698 306	282 322	20	871	3 041	21 291	19 829
Les Collines-de-l'Outaouais	2 901 007	1 034 741	30	31 643	971	14 831	13 812
Les Etchemins	3 088 669	949 806	-	42 152	2 731	5 175	4 819
Les îles-de-la-Madeleine	645	378	-	-	151	372	346
Les Jardins-de-Napierville	1 121 617	131 116	-	8 286	3 370	83 559	77 820
Les Laurentides	4 182 627	1 441 141	-	47 029	536	2 232	2 079
Les Maskoutains	635 853	150 782	-	9 530	34 511	240 370	223 862
Les Moulins	265 608	60 698	-	188	591	6 333	5 898
Les Pays-d'en-Haut	1 204 419	388 617	-	8 110	-	-	-
Les Sources	1 046 844	318 976	20	20 484	4 587	14 825	13 806
Lévis	1 167 058	107 475	-	3 412	4 113	10 713	9 977
L'Île-d'Orléans	220 147	45 865	-	2 208	979	9 467	8 817
L'Islet	3 180 767	1 051 145	-	62 172	4 792	12 998	12 105
Longueuil	347 273	32 452	13	2 042	64	5 634	5 247
Lotbinière	3 625 241	530 590	-	50 255	23 836	53 946	50 241
Manicouagan	16 303 923	7 589 733	361	597 344	90	622	579
Marguerite-D'Youville	227 041	50 148	13	3 164	674	37 610	35 027
Maria-Chapdelaine	68 498 616	19 795 567	283,661	1 336 111	3 121	22 512	20 966
Maskinongé	3 100 397	1 148 926	-	51 582	13 056	63 994	59 599
Matawinie	16 929 603	5 660 704	5,642	312 384	5 085	12 500	11 642
Mékinac	7 642 204	3 064 271	3,267	230 001	2 538	11 524	10 732
Memphrémagog	1 665 863	656 685	-	41 503	1 966	8 773	8 170
Minganie	28 006 029	4 102 326	13	17 270	-	-	-
Mirabel	319 554	96 471	-	1 379	4 075	34 246	31 894
Montcalm	697 106	212 169	-	656	11 610	64 216	59 806
Montmagny	2 537 242	851 594	-	47 790	5 628	12 817	11 937
Montréal	153 677	27 273	-	382	238	1 345	1 253
Nicolet-Yamaska	1 191 524	188 403	11	5 615	12 518	119 533	111 323
Nord-du-Québec	314 130 445	27 860 467	116,365	1 742 218	-	-	-
Papineau	4 638 756	1 591 574	-	113 975	1 694	12 044	11 217
Pierre-De Saurel	821 436	80 760	-	5 101	6 524	80 332	74 815
Pontiac	26 782 435	7 507 257	48	467 591	1 880	19 127	17 814
Portneuf	5 708 950	2 086 024	21	135 344	5 834	31 794	29 610
Québec	482 938	156 301	-	7 578	931	3 656	3 405
Rimouski-Neigette	3 245 480	1 408 789	-	94 170	4 400	10 595	9 867
Rivière-du-Loup	1 286 918	485 095	43	28 456	4 734	16 197	15 085
Robert-Cliche	901 855	359 946	-	24 900	10 398	12 442	11 587
Roussillon	458 228	46 204	-	1 689	1 072	35 773	33 316
Rouville	199 261	56 436	-	3 567	13 281	65 153	60 678
Rouyn-Noranda	16 149 033	3 066 869	6,644	139 913	366	4 373	4 072
Saguenay	1 557 632	481 869	21	15 021	-	-	-
Sept-Rivières	21 507 036	9 233 189	358	292 021	-	-	-
Shawinigan	1 297 870	397 270	544	1 232	627	2 372	2 210
Sherbrooke	298 468	115 367	-	7 292	982	3 361	3 130
Témiscamingue	38 337 963	9 262 959	616	407 576	3 068	25 925	24 144
Témiscouata	4 606 515	2 192 888	-	169 327	3 603	13 046	12 150
Thérèse-De Blainville	275 147	45 470	-	649	613	5 782	5 385
Trois-Rivières	399 779	98 683	-	304	3 041	21 291	19 829
Vaudreuil-Soulanges	563 986	162 809	-	10 199	3 595	90 916	84 672

Annexe K : Liste des comptes de la TDR-CECN qui n'ont pas été produits par la présente étude

Compte non produit
Stock de carbone contenu dans la litière et le bois mort
Stock de carbone contenu dans les milieux aquatiques et marins
Stock de carbone contenu dans les infrastructures
Respiration secondaire des écosystèmes
Résidus générés par les coupes forestières
Utilisation des résidus générés par les coupes forestières
Utilisation des résidus agricoles
Extraction de tourbe
Végétation broutée par le bétail
Production et disposition des boues d'épuration et des eaux usées
Carbone incorporé dans les marchandises importées et exportées

BIBLIOGRAPHIE

- Archambault C. (2016). Effet de la diversité spécifique et fonctionnelle des arbres sur la densité et profondeur d'enracinement. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal. 87 p.
- Agriculture and Agri-Food Canada (2007) Canadian Maple Products Situation and Trends 2006-2007.
- Borgström Hansson, C. et Wackernagel, M. (1999) Rediscovering place and accounting space: how to re-embed the human economy. *Ecological Economics* 29, 203-213. doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00010-5
- Boyd, C.E., Tucker, C., Mcnevin, A., Bostick, K. et Clay, J. (2007) Indicators of Resource Use Efficiency and Environmental Performance in Fish and Crustacean Aquaculture. *Reviews in Fisheries Science* 15, 327-360. doi.org/10.1080/10641260701624177
- Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R.S., (...), Whyte, A. (2009) Science for managing ecosystem services: beyond the millennium ecosystem assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 1305-1312. doi.org/10.1073/pnas.0808772106
- Clymo, R.S., Turunen, J. et Tolonen, K. (1998) Carbon Accumulation in Peatland. *Oikos* 81, 368-388.
- Colombo, S., Chen, J. et Ter-Mikaelian, M. (2007). Carbon storage in Ontario's forests, 2000-2100. Ontario Ministry Natural Resources and forestry., Applied Research and Development Branch. Climate Change Research Information Note 06, 8.
- Costanza, R., de Groot, R. Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S. et Turner, R.K. (2014) Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* 26, 152-158. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., (...), Van Den Belt, M. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260. doi.org/10.1038/387253a0
- Daily, G.C. (1997) *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press.
- Davidson, E.A., Janssens, I.A. et Luo, Y. (2006) On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10. *Global Change Biology* 12, 154-164. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x
- Duchesne, L., Houle, D., Ouimet, R., Lambert, M.C. et Logan, T. (2015) Aboveground carbon in Quebec forests: stock quantification at the provincial scale and assessment of temperature, precipitation and edaphic properties effects on the potential stand-level stocking. *PeerJ* 4, e1767. doi.org/10.7717/peerj.1767
- Dupras, J. et Alam, M. (2015) Urban Sprawling and Ecosystem Services: A Half-Century Perspective in the Montreal Region (Quebec, Canada). *Journal of Environmental Policy and Planning* 17, 180-200. doi.org/10.1080/1523908X.2014.927755
- Dupras, J., Alam, M. et Revéret J. (2015a) Economic Value of Greater Montreal's Non-Market Ecosystem Services in a Land Use Management and Planning Perspective. *The Canadian Geographer/ Le géographe canadien* 59, 93-106. doi.org/10.1111/cag.12138
- Dupras, J., Drouin, C., André, P. et Gonzalez, A. (2015b) Towards the establishment of a green infrastructure in the region of Montreal (Quebec, Canada). *Planning Practice and Research* 30, 355-375. doi.org/10.1080/02697459.2015.1058073
- Dupras, J., Patry, C., Tittler, R., Gonzalez, A., Alam, M. et Messier, C. (2016) Management of vegetation under electric distribution lines will affect the supply of multiple ecosystem services. *Land Use Policy* 51, 66-75. doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.11.005
- Dupras, J., Laurent-Luchetti, J., Revéret, J.P. et DaSilva, L. (2017) Using Contingent Valuation and Choice Experiment to Value the Impacts of Agri-environmental Practices on Landscape Aesthetics. *Landscape Research*. doi.org/10.1080/01426397.2017.1332172

- Edens, B. et Graveland, C. (2014) Experimental valuation of Dutch water resources according to SNA and SEEA. *Water Resources and Economics* 7, 66-81. doi.org/10.1016/j.wre.2014.10.003
- Environnement et Changement climatique Canada (2018) Rapport d'inventaire national 1990-2016 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada, 16p.
- European Commission, Organisation for Economic Co-operation and Development, United Nations, World Bank (2012) System of Environmental-Economic Accounting - Experimental Ecosystem Accounting (SEEA-EEA).
- European Commission, International Monetary Fund, Organisation for Economic Co-operation and Development, United Nations, World Bank (2008) System of National Accounts (SNA).
- Fairhead, J., Leach, M. et Scoones, I. (2012) Green Grabbing: a new appropriation of nature? *Journal of Peasant Studies* 39, 237-261. doi.org/10.1080/03066150.2012.671770
- Folke, C., Jansson, Å., Rockström, J., Olsson, P., Carpenter, S.R., (...), Westley, F. (2011) Reconnecting to the biosphere. *AMBIO* 40, 719-738. doi.org/10.1007/s13280-011-0184-y
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018) Global soil organic carbon map: Technical report.
- Freedman, B. Stinson, G. et Lacoul, P. (2009) Carbon credits and the conservation of natural areas. *Environmental Reviews* 17, 1-19. doi.org/10.1139/A08-007
- Fry, J., Lenzen, M., Giurco, D. et Pauliuk, S. (2015) An Australian multi-regional waste supply-use framework. *Journal of Industrial Ecology* 20, 1295-1305. doi.org/10.1111/jiec.12376
- Garneau M. et van Bellen, S. (2016) Synthèse de la valeur et la répartition du stock de carbone terrestre au Québec. Rapport de recherche remis au Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques du Québec, 60 p.
- Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P.L. et Montes, C. (2010) The history of

ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics* 69, 1209-1218. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007

Gutiérrez-Martín, C., Borrego-Marín, M.M. et Berbel, J. (2017) The economic analysis of water use in the Water Framework Directive based on the System of Environmental-Economic Accounting for Water: A case study of the Guadalquivir River Basin. *Water* 9, art. no. 180. doi.org/10.3390/w9030180

Guzmán, G., Aguilera, E., Soto, D., Cid, A., Infante, J., (...), González de Molina, M. (2014) Methodology and conversion factors to estimate the net primary productivity of historical and contemporary agroecosystems. *Documents de travail, Sociedad Española de Historia Agraria*, 1407.

Harris, M. et Fraser, I. (2002) Natural resource accounting in theory and practice: A critical assessment. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 46, 139–192. doi.org/10.1111/1467-8489.00018

He, J., Moffette, F., Fournier, R., Revéret, J.P., Théau, J., (...), Varin, M. (2015) Meta-Analysis for the Transfer of Economic Benefits of Ecosystem Services Provided by Wetlands within Two Watersheds in Quebec, Canada. *Wetland Ecology and Management* 23, 707-725. doi.org/10.1007/s11273-015-9414-6

He, J., Dupras, J. et Poder, T. (2017) The value of Wetlands in Quebec : a comparison between contingent valuation and choice experiment. *Journal of Environmental Economics and Policy*. doi.org/10.1080/21606544.2016.1199976

International Panel on Climate Change (IPCC) (1996) *Climate change 1996: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific technical analysis. Contribution of working group II to the second assessment report of the IPCC.* Cambridge University Press, Cambridge.

International Panel on Climate Change (IPCC) (2001) *Climate change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the IPCC.* Cambridge University Press, Cambridge.

International Panel on Climate Change (IPCC) (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.* Published: IGES, Japan

- Institut de la statistique du Québec (ISQ) (2018) Mines en chiffres: La production minérale au Québec en 2016.
- Jax, K., Barton, D.N., Chan, K.M.A., de Groot, R., Doyle, U., (...), Wichmann, S. (2013) Ecosystem services and ethics. *Ecological Economics* 93, 260-268. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.008
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Dorji, L., Thoennes, P. et Tshering, K. (2013) An initial estimate of the value of ecosystem services in Bhutan. *Ecosystem Services* 3, e11-e21. doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.11.004
- Kurz, W.A., Apps, M.J., Webb, T.M. et McNamee, P.J. (1992) The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase 1. Forestry Canada, Edmonton, 93 pp.
- Lavallée, S. et Dupras, J. (2016) Réflexions sur les systèmes de paiement pour services écosystémiques en milieu agricole au Québec. *Développement durable et territoires* 7(1). doi.org/10.4000/developpementdurable.11210
- L'Ecuyer-Sauvageau, C., Dupras, J., Auclair, J., Fetue Ndefo, F., Poder, T. et He, J. (sous presse). The economic value of the Ottawa region Green Network. *Urban Ecosystems*.
- McCauley, J. (2006) Selling out on nature. *Nature* 443, 27-28. doi.org/10.1038/443027a
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005) Ecosystems and human well-being: A framework for assessment. Washington, DC: Island Press.
- Méral, P. (2012) Le concept de service écosystémique en économie : origine et tendances récentes. *Natures Sciences Sociétés* 20, 3-15. doi.org/10.1051/nss/2012002
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) (2016) Niveaux supérieurs du système hiérarchique de classification écologique. Direction des inventaires forestiers, 13p.
- Nahlik, A.M., Kentula, M.E., Fennessy, M.S. et Landers, D.H. (2012) Where is the consensus? A proposed foundation for moving ecosystem service concepts into practice. *Ecological Economics* 77, 27-35.

doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.01.001

- O'Hara Jr, F. (1990) Glossary: Carbon Dioxide and Climate. ORNL/CDIAC-39, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. Third Edition. <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/pns/convert.html#2> (site consulté : le 11 avril 2018)
- Obst, C. et M. Vardon (2014) Recording environmental assets in the national accounts. *Oxford Review of Economic Policy* 30, 126-144. doi.org/10.1093/oxrep/gru003
- Obst, C (2015) Reflections on natural capital accounting at the national level; Advances in the system of environmental-economic accounting. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal* 6, 315-339. doi.org/10.1108/SAMPJ-04-2014-0020
- Pêches et Océans Canada (MPO) (2012) Enquête sur la pêche récréative au Canada 2010.
- Poder, T., Dupras, J., Ndefo, F. et He, J. (2016) The economic value of the Greater Montreal Blue Network (Quebec, Canada): a contingent ranking study to estimate non market-aquatic ecosystem services benefits. *PlosOne*. doi.org/10.1371/journal.pone.0158901
- Raymond, C.M., Singh, G.G., Benessaiah, K., Bernhardt, J.R., Levine, (...), Chan, K.M.A. (2013) Ecosystem services and beyond: using multiple metaphors to understand human-environment relationships. *Bioscience* 63, 536-546. doi.org/10.1525/bio.2013.63.7.7
- Reid, W.V., Mooney, H.A., Capistrano, D., Carpenter, S.R., Chopra, K., (...), Shidong, Z. (2006) Nature: the many benefits of ecosystem services. *Nature* 443, 749-749. doi.org/10.1038/443749a
- Remme, R.P., Edens, B., Schröter, M. et Hein, L. (2015) Monetary accounting of ecosystem services: A test case for Limburg province, the Netherlands. *Ecological Economics* 112, 116-128. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.02.015
- Robertson, M. (2012) Measurement and alienation: making a world of ecosystem services. *Transactions of the Institute of British Geographers* 37, 386-401. doi.org/10.1111/j.1475-5661.2011.00476.x

- Robinson, D.A., Fraser, I., Dominati, E.J., Davísdóttir, B., Jónsson, J.O.G., (...), Clothier, B.E. (2014) On the value of soil resources in the context of natural capital and ecosystem service delivery. *Soil Science Society of America Journal* 78, 685-700. doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0017
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., (...), Foley, J.A. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472-475. doi.org/10.1038/461472a
- Schröter, M., van der Zanden, E.H., van Oudenhoven, A.P.E., Remme, R.P., Serna-Chavez, H.M., de Groot, R.S. et Opdam, P. (2014) Ecosystem Services as a Contested Concept: A Synthesis of Critique and Counter-Arguments. *Ecology Letters* 7, 514–523. doi.org/10.1111/conl.12091
- Skroch, M. et Lopez-Hoffman, L. (2010) Saving nature under the big tent of ecosystem services: a response to Adams and Redford. *Conservation Biology* 24, 325-327. doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01416.x
- Statistics Canada (2012) Waste management in Canada. Human Activity and the Environment, Catalogue no. 16-201-X
- Statistics Canada (2013) Measuring ecosystem goods and services in Canada. Human Activity and the Environment, Catalogue no. 16-201-X
- Statistics Canada (2014) Agriculture in Canada. Human Activity and the Environment, Catalogue no. 16-201-X
- Statistics Canada (2015) The changing landscape of Canadian metropolitan areas. Human Activity and the Environment, Catalogue no. 16-201-X
- Statistics Canada (2016) Freshwater in Canada. Human Activity and the Environment, Catalogue no. 16-201-X
- Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P.D., Jäger, J., Matson, P.A., (...), Wasson, R.J. (2004) *Global change and the Earth system: a planet under pressure*. Springer-Verlag, New York, New York, USA. 336 pp. ISBN 3540408002.
- Stoneham, G., O'Keefe, A., Eigenraam, M. et Bain, D. (2012) Creating physical environmental asset accounts from markets for ecosystem conservation.

Ecological Economics 82, 114-122. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.06.017

Strunz, S. (2012) Is conceptual vagueness an asset? Arguments from philosophy of science applied to the concept of resilience. *Ecological Economics* 76, 112-118. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.02.012

TEEB (2010) *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB.*

The Japan Institute of Energy. (2008) *The Asian biomass handbook.*

Thériault, M., Pouliot, G., Pouliot, É., Baba-Khelil, A. et Castonguay, F. (2011) Étude de pesée des produits tripiers chez l'agneau lourd du Québec. Rapport de recherche remis au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (projet No. 11-C-100), 67 p.

Turner D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.C., Gower, S.T., Running, S.W., (...), Ahl, D.E. (2006) Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment* 102, 282-292. doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.017

Uhde, S. et M. Keith (2017) *Comptes des terres du Québec méridional.* Gouvernement du Québec, Institut de la statistique du Québec, 179 p.

United Nations, European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Monetary Fund, Organisation for Economic Co-operation and Development, World Bank (2014). *System of Environmental-Economic Accounting 2012— Central Framework (SEEA-CF).*

Vicente D.J., Rodríguez-Sinobas, L., Garrote, L. et Sánchez, R. (2016) Application of the system of environmental economic accounting for water SEEAW to the Spanish part of the Duero basin: Lessons learned. *Science of the Total Environment* 563-564, 611-622. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.078

Weber, J.L. (2014a) *Ecosystem Natural Capital Accounts: A Quick Start Package (ENCA-QSP),* Montreal, Technical Series No. 77, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 248 p.

Weber, J.L. (2014b) Experimental ecosystems natural capital accounts: Mauritius case study. Indian Ocean Commission, 41 p.

Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K. et Swinton, S.M. (2007) Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics* 64, 253-260. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024

