

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DANS LA FILIÈRE CÉRÉALIÈRE AU QUÉBEC POUR RÉDUIRE LES
ÉMISSIONS DE GAZ À EFFETS DE SERRE SELON UNE PERSPECTIVE CYCLE DE VIE : CAS
DU MAÏS-GRAIN

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAITRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

JÉRÉMIE SAMSON DAZOGBO

NOVEMBRE 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je remercie ma directrice de mémoire, la Professeure Cécile Bulle pour sa supervision, son soutien infailible, le financement de ce travail, sa compréhension et ses précieux conseils constants tout au long de ce mémoire ; la directrice exécutive du CIRAIG Sara Russo Garrido pour ses conseils ; et les analystes du CIRAIG (Dominique Maxime et Pablo Tirado Seco) pour leurs encadrements techniques lors des travaux de modélisation ; et toute ma famille pour laquelle j'ai sacrifié nos temps de loisir en famille, nos précieux vendredis et samedis soirs de films en famille ; au profit des travaux académiques à soumettre surtout en temps du COVID-19. J'adresse mes sincères remerciements au Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ) qui a financé cette recherche et qui m'a permis de pouvoir conduire mes travaux dans de bonnes conditions.

DÉDICACE

Ce mémoire est dédié à ma famille toute entière qui ne
croit pas à l'impossibilité mais qui croit au contraire
que tout est possible à celui qui croit!

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est une exigence partielle de la Maîtrise ès Sciences (MSc.) en environnement de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Il est divisé en cinq chapitres. Le chapitre I introduit le sujet dans son contexte et décrit la problématique abordée. Le chapitre II décrit brièvement le portrait de l'agriculture céréalière au Québec et présente une revue de la littérature des enjeux environnementaux et défis climatiques auxquels fait face l'agriculture tout en explorant les stratégies d'économie circulaire (EC) applicables au secteur céréalière. De plus, ce chapitre présente l'analyse du cycle de vie (ACV) en démontrant comment cette méthodologie peut aider dans l'identification des principaux contributeurs (points chauds) des gaz à effet de serre (GES) le long du cycle de vie des grains et sur lesquels ce projet doit concentrer ses efforts pour proposer des solutions de réduction de GES. La partie III sur la méthodologie et les résultats de recherche débute par l'identification des stratégies d'EC adoptables pour réduire l'impact des contributeurs identifiés. Elle décrit ensuite l'approche utilisée pour l'obtention et l'analyse des données, c'est-à-dire la modélisation quantitative des stratégies basée sur les métriques de la durabilité (ACV). Ce même chapitre III présente les résultats de ce mémoire qui feront par ailleurs l'objet d'une publication déjà acceptée, dans le cadre du numéro spécial « *La gestion du changement et la transition vers l'économie circulaire : Une perspective territoire* », de la Revue Organisations & Territoires. Il est suivi du chapitre IV qui porte sur la discussion et les perspectives d'avenir découlant desdits résultats. Enfin, le chapitre V conclut ce travail. La section des références bibliographiques et les annexes A, B et C sont les dernières parties de ce travail. Ce projet fait partie d'un projet plus large visant la création d'un outil d'aide à la décision pour les producteurs céréalières de Lanaudière financé par le MAPAQ, projet au sein duquel les résultats de ce mémoire seront valorisés.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE.....	iii
AVANT-PROPOS	iv
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	xiii
RÉSUMÉ.....	xv
ABSTRACT	xix
CHAPITRE I.....	1
INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE GÉNÉRALE	2
2.1 Portrait du secteur céréalier au Québec.....	2
2.2 Impacts du changement climatique sur l’agriculture	2
2.3 L’agriculture : un contributeur non-négligeable aux émissions de GES et aux autres impacts environnementaux	5
2.3.1 Principaux contributeurs aux impacts environnementaux de l’agriculture au Canada	5
2.3.2 Principaux contributeurs aux impacts environnementaux de l’agriculture au Québec	7
2.3.3 Principaux contributeurs aux impacts environnementaux à l’industrie céréalière au Québec.....	7
2.3.3.1 Bilan environnemental du maïs (Voir section 4.1.1)	8
2.3.3.2 Bilan environnemental du soja	8
2.3.3.3 Bilan environnemental du blé.....	8
2.3.3.4 Bilan environnemental de l’orge.....	9
2.3.3.5 Bilan environnemental de l’avoine	9
2.3.3.6 Bilan environnemental du canola.....	9
2.4 L’économie circulaire comme solution aux enjeux environnementaux de l’agriculture	10
2.4.1 Économie circulaire	10
2.4.2 Économie circulaire dans le milieu agricole.....	12
2.4.2.1 Pertinence de l’ÉC dans le milieu agricole	12
2.4.2.2 Stratégies circulaires pour l’irrigation	13
2.4.2.3 Stratégies circulaires pour la fertilisation des sols.....	13

2.4.2.4	Stratégies circulaires pour valoriser les matières résiduelles agricoles et bioéconomie	14
2.4.3	Gisements de matières résiduelles disponibles et pratiques d'économie circulaire déjà en place dans la région de Lanaudière pour l'agriculture.....	16
2.4.3.1	Matières organiques.....	17
2.4.3.1.1	Gisements disponibles en Lanaudière.....	17
2.4.3.1.2	Surplus alimentaires.....	18
2.4.3.1.3	Fruits et légumes laissés aux champs	19
2.4.3.1.4	Drêche.....	20
2.4.3.1.5	Boues de papetières	20
2.4.3.1.6	Lactosérum	20
2.4.3.1.7	Valorisation des surplus énergétiques.....	21
2.4.3.1.8	L'ÉC et les déplacements potentiels d'impacts	21
2.5	L'ACV, outil d'évaluation de la performance environnementale.....	23
2.5.1	L'analyse du cycle de vie.....	23
2.5.2	L'ACV pour éclairer la circularité dans le secteur agricole en Lanaudière	24
2.6	Mise en contexte du projet : Utilisation des métriques de la durabilité (ACV) pour évaluer la performance environnementale des stratégies circulaires pour la production céréalière	25
2.7	QUESTION GÉNÉRALE, OBJECTIFS ET HYPOTHESE DE RECHERCHE	25
	QUESTION GÉNÉRALE : La question est : « <i>Comment l'adoption de stratégies d'utilisation circulaires des ressources disponibles dans Lanaudière pourrait contribuer à une réduction de l'impact environnemental, notamment les GES, de la production céréalière et quels sont les écueils à éviter en matière de déplacement d'impact</i> »?	25
	SOUS-OBJECTIF 1 : À la lumière des résultats du bilan environnemental initial de référence (CIRAIG et al., 2015) et des principaux contributeurs identifiés, le sous-objectif 1 est « <i>d'identifier les stratégies de circularité de valorisation de déchets et de résidus disponibles sur les fermes, à l'échelle du territoire (municipalités et industries voisines) pour chacun des points chauds identifiés et retenus</i> ».	26
	Ces stratégies circulaires seront paramétrisées en tenant compte des gisements disponibles de différentes matières résiduelles qui ont été répertoriés dans une étude parallèle à celle-ci (distances de transport, etc.) et en collaboration avec les producteurs partenaires du projet.....	26
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS		27
3.1	ARTICLE SCIENTIFIQUE PUBLIÉ : L'économie circulaire dans la filière céréalière au Québec pour réduire les émissions de gaz à effet de serre selon une perspective cycle de vie : le cas du maïs grain	27
3.1.1	Introduction	28
3.1.2	Mise en contexte	29
3.1.2.1	L'économie circulaire dans le secteur agricole.....	29
3.1.2.2	Matières résiduelles disponibles dans Lanaudière pour l'ÉC en agriculture	31
3.1.2.3	L'analyse de cycle de vie pour éclairer la circularité dans le secteur agricole en Lanaudière..	31
3.1.2.4	Objectifs.....	32
3.1.3	Méthodologie	32
3.1.3.1	Sous objectif 1 : Identification des stratégies pertinentes d'ÉC.....	32
3.1.3.1.1	Principaux contributeurs au changement climatique de la production céréalière dans Lanaudière	32
3.1.3.1.2	Stratégies d'ÉC potentiellement pertinentes pour réduire l'empreinte carbone de la production de grains	32

3.1.3.1.3	Stratégies les plus pertinentes pour les producteurs céréaliers partenaires du projet	33
3.1.3.2	Sous objectif 2 : Analyse de la performance environnementale des stratégies d'EC identifiées	33
3.1.3.2.1	Modélisation du cycle de vie des stratégies d'EC identifiées	33
3.1.3.2.2	Fonction et unité fonctionnelle	34
3.1.3.2.3	Traitement des fonctions secondaires et règles d'imputation	34
3.1.3.2.4	Frontières du système	35
3.1.3.2.5	Sources des données d'inventaire du cycle de vie (ICV)	36
3.1.3.2.6	Évaluation des impacts environnementaux.....	36
3.1.3.2.7	Interprétation.....	36
3.1.3.3	Sous-objectif 3 : Recommandations	38
3.1.4	Résultats.....	38
3.1.4.1	Sous-objectif 1 : Identification des stratégies pertinentes d'ÉC	38
3.1.4.1.1	Étape 1 : Principaux contributeurs au changement climatique de la production céréalière en Lanaudière 38	
3.1.4.1.2	Étape 2 : Stratégies d'ÉC potentiellement pertinentes pour réduire l'empreinte carbone de la production de grains.....	39
3.1.4.1.3	Stratégies les plus pertinentes pour les producteurs céréaliers partenaires.....	40
3.1.4.2	Sous-objectif 2 : Analyse de la performance environnementale des stratégies d'ÉC identifiées	41
3.1.4.2.1	Définition des scénarios d'ACV correspondant aux trois stratégies d'ÉC identifiées.....	41
3.1.4.2.2	Évaluation de la performance environnementale des stratégies identifiées.....	43
3.1.4.2.3	Qualité des données d'inventaire.....	46
3.1.4.2.4	Analyses de sensibilité.....	47
3.1.4.2.5	Applications et limites de l'ACV.....	50
3.1.4.3	Sous-objectif 3 : Recommandations pour les producteurs partenaires du projet.....	51
3.1.4.3.1	Éléments clefs à prendre en compte dans la mise en œuvre des stratégies d'ÉC	51
3.1.4.3.2	Nos recommandations pour la ferme N. J. Pagé Inc.	53
3.1.5	RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES À L'ARTICLE : RECOMMANDATIONS POUR LES QUATRE AUTRES FERMES	58
3.1.5.1	Recommandations pour la ferme Les Entreprises Adam 2000 Inc. (Voir carte de positionnement de la ferme par rapport aux sources potentielles de gisements à ce lien)	59
3.1.5.2	Recommandations pour la Ferme Gros et Fils(Voir carte de positionnement de la ferme par rapport aux sources potentielles de gisements à celien).....	61
3.1.5.3	Recommandations pour la Ferme 9228-5063 Québec Inc. (Voir carte de positionnement de la ferme par rapport aux sources potentielles de gisements à celien).....	64
3.1.5.4	Recommandations pour Anc. Ferme Théobald Brisson(Voir carte de positionnement de la ferme par rapport aux sources potentielles de gisements à celien)	67
CHAPITRE 4	.....	70
DISCUSSION ET PERSPECTIVES	.....	70
CHAPITRE 5	.....	72
CONCLUSION	.....	72
CHAPITRE 6	.....	111

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES111

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Principaux contributeurs au changement climatique de la production de maïs au Québec (adapté de CIRAIG et Groupe AGÉCO, 2015).....	39
Figure 3.2 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 1 calculée avec IMPACT World+ 2.0	44
Figure 3.3 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 calculée avec IMPACT World+ 2.0	45
Figure 3.4 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 3 calculée avec IMPACT World+ 2.0	46
Figure 3.5 : Analyse de sensibilité sur les distances de transport des MRF dans les stratégies 1 et 3	48
Figure 3.6 : Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant les stratégies 1, 2 et 3 avec l'inclusion de la fonction de gestion des déchets	49
Figure 3.7 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la Ferme N. J. Pagé inc.....	54
Figure 3.14 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la ferme Les Entreprises Adam 2000 Inc.....	59
Figure 3.15 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la Ferme Gross et fils inc.....	61
Figure 3.16 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la Ferme 9228-5063 Québec Inc.....	64
Figure 3.17 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la Ferme Théobald Brisson	67
Figure 3.8 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 1 calculée avec IMPACT World+ 2.0	75
Figure 3.9 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 calculée avec IMPACT World+ 2.0	77
Figure 3.10 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 3 selon IMPACT World+ 2.0	79
Figure 3.11 : Analyse de sensibilité sur les distances de transport des MRF dans les stratégies 1 et 3	81
Figure 3.12 : Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant les stratégies 1, 2 et 3 avec l'inclusion de la fonction de gestion des déchets	82
Figure 3.13 : - Diagramme récapitulatif de la méthodologie	84

Figure 4.1 : - CONTRIBUTION DES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE DE LA PRODUCTION DE L'AVOINE DES DES SIX
GRAINS ET PRINCIPAUX CONTRIBUTEURS..... 85

Figure 4.2 : L'ECONOMIE CIRCULAIRE SELON L'IEDDEC ET RECYC-QUEBEC 110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Principaux gaz à effet de serre émis du secteur agricole avec leurs potentiels de réchauffement planétaires	6
Tableau 2.2 : Bilan environnemental de la production de 1 kg de chacun des six grains : maïs, soya, blé, orge, avoine et canola	9
Tableau 2.5 : Gisements de résidus disponibles dans Lanaudière et leur teneur.....	17
Tableau 4.1 : AUTRES STRATÉGIES CIRCULAIRES INVENTORIÉES DANS LA LITTÉRATURE	101

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ACV = Analyse du cycle de vie

CCTEI = Le Centre de transfert technologique en écologie industrielle

CDBL = le Conseil de développement bioalimentaire de Lanaudière

CE = Circular economy

ÉC = Économie circulaire

GES = Émissions de gaz à effets de serres

GHG = Green House Gaz

GWP = Global Warming Potential

LBDC = Lanaudière Biofood Development Council

LCA = Life cycle Assessment

MDDELCC = Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques

MRF = Matière résiduelles fertilisantes

PQGMRF = Politique québécoise de gestion des matières résiduelles

PRP = Potentiel de réchauffement planétaire

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

CO₂ = Dioxyde de carbone

N₂O = Oxyde nitreux

kg CO₂e/kg grain = unité du Potentiel de réchauffement planétaire

Mt CO₂éq = Mégatonne

ANNEXES

ANNEXE 1 : ANALYSE DÉTAILLÉE DE LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DES TROIS STRATEGIES D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE IDENTIFIÉES

ANNEXE 2 : ANALYSES DE SENSIBILITÉ DÉTAILLÉES

ANNEXE 3 : DIAGRAMME RECAPITULATIF DE LA MÉTHODOLOGIE

ANNEXE 4 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE LA PRODUCTION DES SIX GRAINS.

RÉSUMÉ

Mise en contexte

La présente étude vise à « *Développer une approche itérative pour prioriser les stratégies d'économie circulaires (ÉC) pertinentes en matière de réduction des émissions de GES pour la production de grains en la région de Lanaudière à l'aide de l'analyse du cycle de vie (ACV)* ».

Quelles sont les pratiques agricoles actuelles des producteurs céréaliers de Lanaudière et leurs points chauds en matière d'impact environnemental, et plus particulièrement de changement climatique ? Comment l'adoption de pratiques circulaires d'utilisation des ressources disponibles dans Lanaudière pourrait contribuer non seulement à une réduction de l'utilisation des ressources primaires, mais également à une réduction de l'impact environnemental de la production céréalière ? Quels sont les écueils à éviter en matière de déplacement d'impact ?

La mise en œuvre de l'ÉC, si elle a une vocation vertueuse, n'aboutit pas de manière systématique à une réduction de l'impact environnemental (Geoffrey et al. 2021; (Janik *et al.*, 2020). Il est donc essentiel que l'ÉC soit encadrée d'une quantification de l'impact pour s'assurer que l'on n'est pas en train de déplacer le problème ailleurs en adoptant des stratégies qui réduisent la linéarité de nos systèmes de production.

L'ACV est une approche systémique (endossée, notamment, par l'Organisation des nations unies pour la protection de l'environnement (UNEP) et l'Union européenne) qui permet de procéder à ce genre de validation de la pertinence environnementale des stratégies de circularité envisagées. Dans le cadre de cette étude, j'ai travaillé sur comment arrimer l'ACV et l'ÉC pour pouvoir identifier dans un premier temps les principaux contributeurs à l'impact de la production céréalière en Lanaudière à l'aide de l'ACV en amont de l'identification des stratégies de circularité. Ensuite, à l'aide de cette information, j'ai pu choisir clairement des stratégies de circularité en me focalisant sur celles qui permettraient potentiellement une réduction de ces points chauds de l'impact du cycle de vie de la production de grains. La performance environnementale de chacune de ces stratégies a fait ensuite l'objet d'une analyse, identifiant les conditions nécessaires à remplir ainsi que les éventuels compromis environnementaux à établir, pour que chacune de ces stratégies reste pertinente d'un point de vue environnemental.

Méthodologie

Le projet se base dans un premier temps sur une analyse d'impact environnemental du cycle de vie du système de production céréalière (exemple du maïs-grain) déjà réalisée dans une étude publiée en 2015 (CIRAIG et al., 2015), qui constituera le bilan environnemental initial de référence. À la lumière de cette analyse, les plus grands contributeurs à l'impact sur le changement climatique seront identifiés.

Dans un second temps, des stratégies de circularité ont été identifiées pour chacun des points chauds identifiés. Ces stratégies ont été élaborées en co-construction avec cinq producteurs partenaires de terrain du projet auxquels les résultats de l'étude préliminaire ont été présentés. Elles ont également été paramétrisées en tenant compte des gisements disponibles de différentes matières résiduelles qui ont été répertoriées dans une étude parallèle à celle-ci (distances de transport, etc.).

L'ACV des stratégies proposées a ensuite été réalisées et les paramètres influant le plus la performance environnementale des stratégies analysées et ont été identifiés à l'aide d'analyses de sensibilité. Les nouveaux scénarios circulaires et leurs performances environnementales ont été comparés au statu quo pour les producteurs et pour les autres acteurs impliqués dans le système. Cette dernière étape a permis de comprendre les situations où les stratégies d'ÉC présentent un réel bénéfice environnemental.

Résultats et discussion

Les points chauds qui émergent de l'étude réalisée sur la production du maïs-grain en Lanaudière en matière d'empreinte carbone sont les suivants : la fertilisation (22%), le séchage (20%) et le travail du champ (53%), mais pour ce troisième contributeur, les émissions les plus importantes sont liées au N₂O issu de la décomposition des engrais minéraux, donc surtout influencées par les choix en matière de fertilisation. C'est donc sur la fertilisation et le séchage que nous avons concentré nos efforts pour identifier des stratégies de circularité.

Pour la fertilisation, les alternatives stratégiques suivantes ont été envisagées : a) Accroître la valorisation des matières organiques fertilisantes (fumiers etc.) des fermes et d'autres structures avoisinantes comme matières fertilisantes au détriment des engrais minéraux de synthèse ; b) Utiliser des déchets agricoles ou industriels qui sont compostés comme amendements agricoles.

Pour ce qui est du séchage, les alternatives stratégiques envisagées sont l'utilisation de biogaz c) produit par digestion anaérobie de boues d'épuration (on considère également dans ce scénario l'utilisation du digestat pour l'amendement agricole) ou d) produit à partir de fumier (ici aussi le digestat est utilisé comme fertilisant) au détriment du gaz naturel habituellement utilisé dans les activités de séchage.

Pour les alternatives a) et b), l'un des déterminants les plus importants de la performance environnementale des stratégies de circularité est la distance sur laquelle il faut transporter les matières fertilisantes ou les amendements organiques. Au-delà d'une certaine distance (qui dépend du type d'engrais organique ou d'amendement), tout le bénéfice environnemental de chacune de ces stratégies est perdu.

Avec l'hypothèse d'une distance de 10 km par défaut, accroître la valorisation d'engrais organiques de fermes environnantes comme matières fertilisantes au détriment des engrais minéraux de synthèse permet une diminution de l'empreinte carbone (kg CO₂eq/kg grain maïs) de 2% à 6%, selon le scénario, par rapport au scénario de référence. La réduction d'impact la plus élevée est observée dans le cas où tout l'engrais appliqué est d'origine organique provenant d'un producteur biologique. A contrario, une production intensive basée sur des apports 100% minéraux représente une augmentation de l'empreinte carbone de 1% par rapport au scénario de référence (puisque dans la situation moyenne actuelle, il y a déjà une certaine proportion d'engrais organiques utilisés). Pour un engrais organique - celui qui a la meilleure performance environnementale - la distance limite au-delà de laquelle le transport compense tous les bénéfices de l'utilisation de l'engrais organique est de 50 km. Cette distance diminue pour des fertilisants organiques de moindre performance environnementale.

Pour la série de stratégies de circularité b), c'est-à-dire l'utilisation des déchets agricoles et industriels pour le compostage (amendement agricole), les résultats préliminaires montrent que les scénarios de compostage présentent de manière générale un score d'impact plus élevé que le scénario de référence. Ceci est dû d'une part aux émissions de méthane lors du compostage, mais également au fait qu'il faut une quantité très importante d'amendement pour remplacer une petite quantité d'engrais. Néanmoins, quand on tient compte de l'impact évité de gestion du déchet, il y a un bénéfice environnemental à utiliser le compost comme amendement (avec, ici aussi, une distance limite au-delà de laquelle ce bénéfice est compensé par l'impact du transport).

Pour la série de stratégies de circularité c) et d), c'est-à-dire l'utilisation des boues d'épuration (provenant de Lanaudière) ou de fumier et leur digestion anaérobie pour la récupération et l'utilisation du biogaz comme substitut du gaz naturel pour le séchage des grains et du digestat pour l'amendement agricole, les résultats indiquent une réduction entre 10% et 13% des émissions de GES, et révèlent que les boues d'épuration représentent le scénario le plus avantageux. Dans ce cas-là également la distance à parcourir entre le gisement et la ferme a une influence importante sur la performance environnementale de la stratégie de circularité : si la distance est de plus de 100 km, le scénario avec du biogaz produit à partir de fumier a plus d'impact que le scénario de référence.

Un scénario qui combine l'utilisation de fumier (stratégie a) et de biogaz à partir de boues (stratégie c) obtenus dans un rayon de 10 km autour de la ferme réduirait le score pour l'indicateur Changement climatique de 25%.

Conclusion

Les résultats de cette étude doivent être intégrés dans un outil d'aide à la décision pour les producteurs céréaliers de la région de Lanaudière afin de les aider à identifier et mieux choisir les gisements parmi ceux disponibles dans leur région en vue de l'adoption éclairée de pratiques circulaires moins polluantes pour l'environnement, notamment en matière d'émissions de GES, tout en maintenant leur rendement. Ainsi, les producteurs céréaliers de Lanaudière pourront identifier, recycler et valoriser de façon plus éclairée les ressources résiduelles disponibles dans leur région.

Mots clés :secteur céréalier, analyse du cycle de vie, économie circulaire, valorisation déchets, résidus, biogaz, boues, réduction de GES.

ABSTRACT

Background

This study aims to Develop an iterative approach to prioritize circular economy (CE) strategies relevant to reducing GHG emissions for grain production in Lanaudière using life cycle analysis (LCA).

What are the current agricultural practices of cereal producers in Lanaudière region and their hot spots in terms of environmental impact, and more particularly climate change? How could the adoption of circular practices of the use of resources available in Lanaudière contribute not only to a reduction in the use of primary resources, but also to a reduction in the environmental impact of cereal production? What are the pitfalls to avoid when it comes to impact displacement?

The implementation of CE, if it has a virtuous objective, does not systematically lead to a reduction in environmental impact (Geoffrey et al. 2021; Janik et al., 2020). It is therefore essential that CE be accompanied by a quantification of the impact to ensure that we are not shifting the problem elsewhere by adopting strategies that reduce the linearity of our production systems.

LCA is a systemic approach (endorsed, in particular, by the United Nations Environmental Protection Organization (UNEP) and the European Union) which makes it possible to carry out this type of validation of the environmental relevance of strategies of circularity envisaged. As part of this study, I worked on how to link LCA and CE to be able in a first step to identify the main contributors to the impact of cereal production in Lanaudière prior to circularity, using LCA. Then, using this information, I was able to clearly choose circularity strategies, focusing on those that would potentially reduce these hotspots of grain production lifecycle impact. The environmental performance of each of these strategies was then the subject of an analysis, identifying in the process the conditions necessary for each of these strategies to remain relevant from an environmental point of view and the possible environmental compromises.

Methodology

The project was initially based on an environmental impact analysis of the life cycle of the cereal production system (example of grain maize) already carried out in a study published in 2015 (CIRAIG et al., 2015), which constituted the initial baseline environmental assessment. In light of this analysis, the biggest contributors to the impact on climate change were identified.

Secondly, circularity strategies were identified for each of the identified hotspots. These strategies were developed in co-construction with five maize producers, field partners of the project, to whom the results of the preliminary study were presented. The strategies were also parameterized taking into account the available deposits of different residual materials that were listed in a parallel study to this very one (transport distances, etc.).

The LCA of the proposed strategies was then carried out and the parameters most influencing the environmental performance of the strategies were analyzed and quantified using sensitivity analysis. The circular scenarios and their environmental performance were compared to the status quo for the producers and for the other actors involved in the system. This last step made it possible to understand the situations where CE strategies have a real environmental benefit.

Results and discussion

The hot spots that emerge from the study carried out on the production of grain corn in Lanaudière in terms of carbon footprint are the following: fertilization (22%), drying (20%) and field work (53%), but for this third contributor, the most significant emissions are related to N₂O resulting from the decomposition of mineral fertilizers, and therefore mainly influenced by the choices in terms of fertilization. It is therefore on the fertilization and the drying that we have focused our efforts to identify circularity strategies.

For fertilization, the following strategic alternatives have been considered: a) Increase the use of fertilizing organic materials (manure, etc.) from neighboring farms as fertilizing materials to the detriment of synthetic mineral fertilizers; b) Use agricultural or industrial waste that is composted as agricultural amendments.

As far as drying is concerned, the alternatives considered are the use of biogas c) produced by anaerobic digestion of sewage sludge (this scenario also considers the use of digestate for agricultural amendment) or d) produced from manure (here too the digestate is used as fertilizer) at the detriment of the natural gas usually currently used in drying activities.

For alternatives a) and b), one of the most important determinants of the environmental performance of circularity strategies is the distance over which the fertilizers or organic amendments must be transported.

Beyond a certain distance (which depends on the type of organic fertilizer or amendment), all the environmental benefits of these strategies are lost.

With the assumption of a distance of 10 km by default, increasing the use of organic fertilizers from surrounding farms as fertilizing materials to the detriment of synthetic mineral fertilizers allows a reduction in the carbon footprint (kg CO₂eq/kg corn grain) 2% to 6%, depending on the scenario, compared to the reference scenario. The highest impact reduction is observed when all the fertilizer applied is of organic origin from an organic producer. Conversely, intensive production based on 100% mineral inputs represents an increase in the carbon footprint of 1% compared to the reference scenario (since in the current average situation, there is already a certain proportion of organic fertilizers used). For an organic fertilizer - the one with the best environmental performance - the limit distance beyond which transport compensates for all the benefits of the use of organic fertilizer is 50 km. This distance decreases for organic fertilizers with lower environmental performance.

For the series of circularity strategies b), i.e. the use of agricultural and industrial waste for composting (agricultural amendment), the preliminary results show that the composting scenarios generally present a score of higher impact than the reference scenario. This is due partly to methane emissions during composting, but also to the fact that a very large amount of amendment is needed to replace a small amount of fertilizer. However, when we take into account the avoided impact of waste management, there is an environmental benefit from using compost as an amendment (with, here too, a limit distance beyond which this benefit is offset by the impact transportation).

For the series of circularity strategies c) and d), i.e. the use of sewage sludge (from Lanaudière) or manure and their anaerobic digestion for the recovery and use of biogas as a substitute for natural gas for grain drying and digestate for agricultural amendment, the results indicate a reduction of between 10% and 13% of GHG emissions, and reveal that sewage sludge represents the most advantageous scenario. Also, in this case the distance to be covered between the field and the farm has a significant influence on the environmental performance of the circularity strategy: if the distance is more than 100 km, the scenario with biogas produced from manure has more impact than the baseline scenario.

A scenario that combines the use of manure (strategy a) and biogas from sludge (strategy c) obtained within a radius of 10 km around the farm would reduce the score for the Climate Change indicator by 25%.

Conclusion

The results of this study must be integrated into a decision support tool for maize producers in the Lanaudière region to help them identify and better locate the optimal deposits among those available in their region with a view to informed adoption of circular practices that pollute less the environment, particularly in terms of GHG emissions, while maintaining their performance. Thus, the grain producers of Lanaudière will be able to identify, recycle and valorize in a more enlightened way the residual resources available in their region.

Keywords :cereal sector, life cycle analysis, circular economy, waste recovery, residues, sludge biogas, GHG reduction.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'agriculture dépend beaucoup des conditions climatiques. Le secteur des productions céréalières fait face à une augmentation des risques reliés à l'urgence climatique (sécheresse, inondations, fortes variations des températures), qui le fragilisent. Par ailleurs, l'agriculture intensive est aussi l'un des contributeurs non négligeables aux impacts environnementaux et aux émissions de GES dans l'atmosphère. Pour faire face à ces enjeux, les producteurs céréaliers doivent simultanément maintenir des niveaux de rendement intéressants et des coûts de production accessibles. Adopter des pratiques plus durables, notamment celles de l'ÉC, peut contribuer à répondre à ces enjeux et rendre le secteur céréalier plus résilient. Certaines stratégies d'ÉC peuvent permettre aux producteurs céréaliers de faire face à ces enjeux de résilience notamment, l'utilisation des résidus agricoles, déchets industriels pour la fertilisation et de la boue de stations d'épuration pour la production de biogaz pour le séchage des grains. Mais pour adopter de telles pratiques, les producteurs doivent pouvoir d'une part connaître les opportunités de valorisation de ces sous-produits et rebuts (en interne ou sur le territoire voisin) et d'autre part en comprendre les bénéfices et les risques connexes pour prendre des décisions éclairées. Cette approche, exige une quantification de la performance (économique, en termes de rendement et en termes d'impact environnemental) des solutions envisagées.

Il existe très peu d'études permettant d'identifier les opportunités en termes d'ÉC pour le secteur des productions céréalières et d'en comprendre la performance économique et environnementale. Une telle approche permettrait d'identifier les meilleures stratégies d'ÉC, ce qui garantirait simultanément une bonne production non dommageable à l'environnement et en même temps éviterait de transférer les impacts d'une étape du cycle de vie des céréales à une autre. Certaines stratégies d'ÉC déjà existantes ont des effets rebonds. Elles peuvent accroître les émissions de GES et c'est ce que cette étude vise à éviter. Cette étude voudrait identifier des stratégies circulaires qui contribueront à la réduction des émissions de GES dans le milieu agricole grâce à l'approche cycle de vie.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE GÉNÉRALE

À travers ce chapitre, je vais présenter un bref aperçu du portrait du secteur céréalier au Québec, ensuite développer les pans de la littérature qui sont pertinents pour bien comprendre les enjeux environnementaux que subit la culture céréalière et en même temps montrer sa contribution à l'impact environnemental ainsi que les solutions possibles, notamment celles mettant en œuvre l'ÉC.

2.1 Portrait du secteur céréalier au Québec

Les grandes cultures, qui s'étendent sur plus d'un million d'hectares, dominent le paysage agricole du Québec. Les grains produits au Québec sont destinés majoritairement à l'alimentation animale (MAPAQ, 2019). Le maïs et le soya sont les principaux grains produits au Québec, mais on y retrouve également du blé, de l'avoine, de l'orge et du canola (MAPAQ, 2019). Les deux rotations les plus typiques sont la rotation maïs-soya-blé d'une part et la rotation orge-avoine-canola d'autre part (MAPAQ, 2019).

La demande mondiale de ces grains étant en constante évolution, leurs rendements sont appelés à augmenter (MAPAQ, 2019) malgré les conditions climatiques devenant de plus en plus difficiles. Par exemple, les phénomènes El Niño et La Niña affectent de plus en plus fortement le climat et la météorologie de la plupart des pays du monde (Huynh *et al.*, 2020) y compris le Québec au Canada par conséquent augmentent les risques de variabilité saisonnières et des phénomènes extrêmes.

2.2 Impacts du changement climatique sur l'agriculture

Selon un rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la température moyenne mondiale a augmenté rapidement au cours des 100 dernières années, en particulier au cours des 25 dernières années (GIEC, 2007).

L'agriculture est l'un des secteurs les plus vulnérables au changement climatique. Au Québec, le secteur de la production des grains fait face à une augmentation des risques climatiques tels que les sécheresses, les inondations, les fortes variations de températures et autres phénomènes extrêmes, qui le fragilisent (Gouvernement du Québec, 2019).

Les principaux impacts du changement climatique sur la production agricole dans les régions écologiques du monde se traduisent généralement par les phénomènes tels que (GIEC, 2007 ; Hoa, 2013) : 1)

l'augmentation de la température qui affecte la capacité de développer les cultures (grains et autres) et d'élever les animaux, entraînant une modification de la productivité agricole ; 2) la réduction des ressources en eau : de nombreuses régions n'auront plus assez d'eau et ne pourront donc pas continuer à cultiver, ce qui entraînera une diminution de la superficie cultivée ; et 3) la fonte de la glace polaire, ce qui entraînera des dégâts tels que l'inondation des terres agricoles.

Le changement des conditions climatiques réduit également la biodiversité, provoque un déséquilibre écologique, en particulier une augmentation des catastrophes naturelles, et affecte la croissance des plantes et le développement des maladies des plantes. Il entraîne des phénomènes météorologiques extrêmes et irréguliers tels que des pluies précoces, tardives ou hors saison, ce qui compliquent l'organisation des saisons de plantation et de la structure des cultures et entraîne des dommages à la production agricole (GIEC, 2007 ; Hoa, 2013).

Selon un rapport publié par l'Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) en 2022, la production mondiale de céréales a baissé de 6% de 2021 à 2022 (FAO, 2022) à cause des changements climatiques. Dans le même rapport, la FAO a conclu qu'à l'échelle de la planète, 46 pays, dont 33 en Afrique, 10 en Asie, deux en Amérique latine et Caraïbes, et un en Europe, ont besoin d'une aide alimentaire extérieure. Cette liste comprend désormais l'Ukraine et le Sri Lanka (FAO, 2022).

Le changement climatique réduit la production céréalière dans le monde, laissant 400 millions de personnes confrontées à la faim et 3 milliards de personnes touchées par les inondations et les pénuries d'eau potable (Huynh et al., 2020). Huynh et al. (2020) ont par exemple rapporté que l'Inde a subi des pertes en céréales de 125 millions de tonnes, l'équivalent des 18% de la production totale du pays, dues aux impacts du changement climatique de 2015 à 2020.

La région de la planète qui subit les impacts les plus graves du changement climatique est l'Afrique subsaharienne, qui a le moins de capacité d'adaptation au changement climatique et doit augmenter ses importations alimentaires pour combler la pénurie (NIAEM, 2012). Par exemple, de 2004 à nos jours, 24 pays d'Afrique subsaharienne ont été confrontés de façon régulière et constante à un état d'urgence en raison de pénuries alimentaires causées par une combinaison d'invasion de criquets et de sécheresse (NIAEM, 2012). Les événements météorologiques défavorables survenus en Afrique du Nord et en Afrique australe ont provoqué une contraction de la production céréalière dans la plupart des pays en 2022 (FAO, 2022). La situation de l'Afrique de l'Est soulève de sérieuses préoccupations, en raison de plusieurs saisons de sécheresse et d'un risque imminent de famine dans certaines régions car les déficits pluviométriques

persistants ont fortement réduit les perspectives de production et ont déjà causé la mort de nombreux animaux en 2022 (FAO, 2022). Cette situation a gravement détérioré la sécurité alimentaire dans la sous-région, en particulier des éleveurs (FAO, 2022). En Afrique de l'Ouest, les perspectives de production concernant les récoltes de 2022 sont incertaines compte tenu de l'aggravation des conflits et d'un démarrage irrégulier de la saison des pluies (FAO, 2022).

Aux États-Unis d'Amérique, les conditions de sécheresse réduisent les perspectives de production de céréales (FAO, 2022). Par exemple, la production totale de blé d'hiver et de blé de printemps de 2022 selon les prévisions devrait progresser et atteindre 47,3 millions de tonnes, mais elle est restée inférieure de près de 2 millions de tonnes à la moyenne quinquennale (FAO, 2022).

Dans l'Union européenne, les conditions météorologiques chaudes et sèches réduisent les perspectives de production de blé. Selon les prévisions initiales, les récoltes de blé d'hiver de 2022 devraient s'élever à 133 millions de tonnes en 2022, soit 4 pour cent de moins qu'en 2021 (FAO, 2022).

Cette contraction s'explique par les prévisions de baisse des rendements due aux périodes prolongées de déficits pluviométriques dans les régions méridionales et orientales, aggravées par de récentes vagues de chaleur (FAO, 2022).

Au Québec, Les changements climatiques tels que la hausse des températures, l'augmentation de la fréquence de perturbations naturelles (p. ex. les sécheresses et les épidémies d'insectes), l'allongement de la saison de croissance et de la saison sans gel, en plus de la modification de certaines variables physico-chimiques de l'eau, sont autant d'aléas qui affecteront parmi autres secteurs l'agriculture (Ouranos, 2022). Les changements climatiques auront des conséquences différenciées sur les rendements potentiels des cultures fourragères et maraîchères, ainsi que sur les élevages. La production de plusieurs cultures pourrait bénéficier d'une saison de croissance plus longue, notamment le soya (Jing *et al.*, 2017), le maïs (R. Bryant, 2016), ainsi que certaines espèces fourragères (Thivierge *et al.*, 2017). Ces gains de rendement dépendent généralement d'une adaptation des pratiques culturales comme la modification de la date et du nombre de récoltes, ainsi que de l'utilisation de cultivars mieux adaptés au climat futur. À l'inverse, les cultures qui sont mieux adaptées aux régions fraîches, telles que le canola (Qian *et al.*, 2018), l'orge et le blé, pourraient être pénalisés par des conditions de croissance plus chaudes. Selon ces prédictions, la modification des patrons des précipitations apportera un allongement de la durée des épisodes de sécheresse, spécialement en été, ce qui augmentera les risques de stress hydrique des cultures, entraînant une diminution des rendements (Vogel *et al.*, 2019).

De manière paradoxale, l'agriculture, qui est l'un des secteurs les plus affectés par les stress climatiques, est par ailleurs l'un des contributeurs importants à ces impacts environnementaux et un émetteur significatif de GES dans l'atmosphère.

2.3 L'agriculture : un contributeur non-négligeable aux émissions de GES et aux autres impacts environnementaux

L'agriculture moderne intensive contribue aux impacts environnementaux et au changement climatique (Swilling 2019; Parry 2019). Elle contribue de façon non négligeable aux émissions de GES dans l'atmosphère et aux impacts environnementaux. Par ailleurs, une tendance à l'utilisation accrue de matériaux biosourcés nécessitera de plus grandes surfaces pour cultiver des matériaux biosourcés, ce qui augmentera l'utilisation des terres et l'ensemble des impacts associés à l'agriculture (Jérôme et al. (2022) ; Wiprächtiger et al. (2020) et Yang et al. 2022).

2.3.1 Principaux contributeurs aux impacts environnementaux de l'agriculture au Canada

En matière de changements climatiques, le secteur de l'agriculture émet notamment du méthane (CH₄) - au Canada, en 2016, 30 % des émissions nationales de CH₄ étaient attribuables à l'agriculture selon le [Comité sénatorial permanent de l'agriculture et des forêts (CSPAF)] -, de l'oxyde nitreux (N₂O) - au Canada, en 2016, 77 % des émissions nationales de N₂O étaient attribuables à l'agriculture selon la même étude – et du dioxyde du carbone (CO₂). Les trois gaz, le CH₄, le N₂O et le CO₂, contribuent tous au réchauffement planétaire et leurs potentiels de réchauffement planétaire – PRP (en anglais : GWP pour Global Warming Potential) – sont détaillés dans le Tableau 1.

Tableau 2.1 : Principaux gaz à effet de serre émis du secteur agricole avec leurs potentiels de réchauffement planétaires

Gaz à effet de serre (GES)	Formule chimique	Potentiel de réchauffement Planétaire sur 100 ans, en kg CO ₂ eq/kg émis (PRP / GWP) ¹	Durée de vie atmosphérique (années)
Dioxyde de carbone	CO ₂	1	Variable (5 à 200 ans)
Méthane	CH ₄	25	12 +- 1,8
Oxyde nitreux	N ₂ O	298	114

Sources : Environnement et Changement climatique Canada, 2018, *Rapport d'inventaire national 1990-2016 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. Documents : <https://unfccc.int/documents/181690>; GIEC, 2012, quatrième Rapport d'évaluation, *Errata* [disponible en anglais seulement à ce moment]; GIEC, 2013, cinquième Rapport d'évaluation, *Working Group I: The Scientific Basis* [disponible en anglais seulement à ce moment].

Un rapport récent préparé en 2018 par le CSPAF du Canada sur les émissions de GES montre qu'au Canada 729 mégatonnes d'émissions de GES ont été libérées dans l'atmosphère dont environ 10 % provenaient du secteur agricole du pays (Ymène et al., 2021). Ce rapport précise que ces émissions sont surtout attribuables à l'élevage de bétail (5 %), à la production végétale (3 %) ainsi qu'au transport à la ferme et à l'énergie utilisée sur place (2 %) (CSPAF, 2018).

Différentes exploitations agricoles produisent des quantités variables de GES, qu'il s'agisse de petites fermes d'élevage ou de cultures, ou de grandes exploitations d'élevage de bovins de boucherie (Ymène et al., 2021). Les empreintes carbone varient selon chaque sous-secteur de l'agriculture et leur évaluation est un effort complexe qui exige la prise en compte de chaque processus du cycle de vie de leur production (Ymène et al., 2021).

Le CH₄ et le N₂O sont les principaux GES contributeurs à l'empreinte carbone de l'agriculture au Canada, contribuant à 38 % et 36 % respectivement, le CO₂ étant responsable des 26 % restants (Ymène et al., 2021). Le CH₄ et le N₂O sont tous deux émis notamment lors de l'utilisation du fumier (c-à-d. la manutention, le stockage et l'épandage) (CSPAF, 2018). Ymène et al. (2021) précisent que les GES proviennent de la

¹Le potentiel de réchauffement de la planète du méthane tient compte à la fois des effets directs et des effets indirects de l'augmentation de l'ozone et de la vapeur d'eau stratosphérique.

fermentation entérique du bétail, de l'application d'engrais synthétiques et organiques, de la décomposition anaérobie de la biomasse, de la culture et du travail du sol, de la minéralisation de la matière organique du sol et du fumier, entre autres sources.

Le CO₂ est libéré pendant le travail du sol et par la décomposition des matières organiques et est attribué principalement à l'affectation des terres, au changement d'affectation des terres et à la foresterie, à l'exception des émissions provenant du chaulage et de l'application d'urée et d'autres engrais émettant du carbone (Gouvernement du Québec, 2019). Le N₂O est émis directement et indirectement par les sols agricoles avec l'application des engrais azotés inorganiques (CSPAF, 2018). L'application d'engrais inorganiques azotés représente 22 % des émissions agricoles totales (CSPAF, 2018).

Au Québec comme ailleurs dans le monde, les producteurs céréaliers, pour atteindre leurs objectifs de rendement, adoptent des pratiques de production linéaires non-durables avec des impacts sur l'environnement tels que l'eutrophisation des eaux, l'épuisement et la dégradation des sols et les émissions de GES dans l'air (Basso et *al.*, 2021).

2.3.2 Principaux contributeurs aux impacts environnementaux de l'agriculture au Québec

Au Québec, en 2017, le secteur agricole, y compris la production céréalière, a rejeté 9,8 % des émissions nationales de GES dans l'atmosphère, soit 7,7 Mt CO₂éq. (Gouvernement du Québec, 2019). La fermentation entérique, la gestion des sols agricoles et la gestion du fumier ont produit la plus grande part de ces émissions, soit respectivement 37,3 %, 31,0 % et 26,6 % du total du secteur agricole (Gouvernement du Québec, 2019). Le CO₂ attribuable au chaulage et à l'application d'urée et d'autres engrais émettant du carbone représente, quant à lui seul, 5,1 % des émissions de GES du secteur agricole (Gouvernement du Québec, 2019). Avec la croissance démographique la production alimentaire devrait augmenter de 50% d'ici 2050, ce qui laisse sous-entendre qu'il y aura proportionnellement une augmentation des émissions de GES d'ici 2050 (Veolia, 2018).

2.3.3 Principaux contributeurs aux impacts environnementaux à l'industrie céréalière au Québec

La production céréalière est un contributeur important aux impacts environnementaux en termes de terres cultivées, d'utilisation d'eau douce et de nutriments (Springmann et al., 2018).

Beaucoup d'études ont utilisé l'analyse du cycle de vie (ACV), (une approche de quantification de la performance environnementale présentée de manière plus détaillée à la section 2.5) pour mesurer la performance environnementale de différents systèmes de production. Par exemple, les Producteurs de grains du Québec, qui représentent les intérêts des 11 000 productrices et producteurs de grains de la province, ont fait réaliser par le consortium de recherche CIRAIG, Groupe AGÉCO et Quantis, des ACVs afin de retracer et d'évaluer la performance environnementale et le portrait socioéconomique des six principaux grains

produits au Québec (CIRAIG et al., 2015), notamment le maïs, le soya, le blé, l'avoine, l'orge et le canola. Les dimensions socioéconomiques couvertes par le travail de (CIRAIG et al., 2015) incluent la gouvernance, la résilience économique, l'intégrité environnementale, la relation avec la communauté et le bien-être des travailleurs. Quant à l'analyse de la performance environnementale, les enjeux ou catégories d'impacts analysés sont les changements climatiques, la question de l'eau prélevée, la qualité des écosystèmes, les ressources en générales puis la santé humaine (CIRAIG et al., 2015). Le maïs et le soya ont le plus grand volume de production au Québec. Les figures de l'Annexe A illustrent les résultats issus d'analyse de contribution du CIRAIG et le bilan environnemental de la production de ces six grains. Le tableau 2 ci-après dans la sous-section 2.3.3.6 montre les bilans environnementaux de ces grains (CIRAIG et al., 2015).

2.3.3.1 Bilan environnemental du maïs (Voir section 4.1.1)

2.3.3.2 Bilan environnemental du soja

Pour l'indicateur changement climatique, les impacts totaux associés à la production de 1 kg de soya au Québec selon les données moyennes du secteur représentent 0,28 kg CO₂e/kg grain de soya, qui équivaut à 1,56km parcourus en voiture (Voir détails sur les principaux contributeurs aux impacts environnementaux et les autres catégories d'indicateurs dans le tableau 2 ci-après).

2.3.3.3 Bilan environnemental du blé

Les impacts sur les changements climatiques de la production du blé sont relativement plus importants que ceux du soya en raison des émissions d'oxyde nitreux plus fortes. Le blé requiert environ 15 fois plus d'engrais azotés que le soya et c'est pourquoi les émissions causées par les processus de nitrification et de dénitrification découlant de l'application des engrais azotés dans un champ de blé sont généralement plus importantes (CIRAIG et al., 2015). Les émissions d'oxyde nitreux ont également un impact sur la santé humaine qui est lui aussi relativement plus important que le celui du soya. Pour ce qui est de l'impact sur la qualité des écosystèmes, le blé a un impact relativement moins important que le soya puisque son rendement est plus élevé et donc l'occupation des terres est plus optimale (CIRAIG et al., 2015). L'impact sur les ressources de la production des intrants est plus significatif pour le blé que le soya, car le blé requiert une plus grande quantité d'urée et de nitrate d'ammonium et donc une plus grande consommation d'énergie pour leur production (CIRAIG et al., 2015).

2.3.3.4 Bilan environnemental de l'orge

Le bilan environnemental de l'orge s'apparente beaucoup à celui du blé. En effet, leur rendement est similaire et il n'y a pas de différences considérables entre les doses d'engrais appliqués (CIRAIG et al., 2015).

2.3.3.5 Bilan environnemental de l'avoine

Le bilan environnemental du kg d'avoine s'apparente également à celui du blé et de l'orge (CIRAIG et al., 2015). Bien que les besoins en engrais (engrais azotés surtout) et en chaux soient significativement plus faibles pour l'avoine, son rendement est respectivement 36 % et 40 % moins élevé que celui de l'orge et du blé. Cette différence explique également la plus grande contribution de la culture de l'avoine à l'occupation des sols pour l'indicateur « Qualité des écosystèmes ».

2.3.3.6 Bilan environnemental du canola

La culture de canola a le rendement le plus faible de toutes les productions à l'étude et c'est pourquoi son bilan environnemental est beaucoup plus élevé que tous les autres. Bien que l'impact total est plus important, les contributions des différentes étapes du cycle de vie aux indicateurs environnementaux demeurent sensiblement les mêmes que celles observées pour le blé, l'orge et l'avoine.

Tableau 2.2 : Bilan environnemental de la production de 1 kg de chacun des six grains : maïs, soya, blé, orge, avoine et canola

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
Unité	kg CO ₂ -éq.	DALY	PDF.m ² .an	MJ	L
Maïs	0,44	9,63·10 ⁻⁷	4,40	3,81	3,15
Soya	0,28	5,63·10 ⁻⁷	5,90	2,62	3,16
Blé	0,43	1,27·10 ⁻⁶	7,91	3,25	3,05
Orge	0,37	9,15·10 ⁻⁷	6,56	2,88	3,90
Avoine	0,37	1,08·10 ⁻⁶	8,63	3,20	4,53
Canola	0,87	2,39·10 ⁻⁶	11,28	7,04	8,00

Note :

- Pour l'indicateur « Santé humaine », afin d'évaluer le facteur de dommage, la gravité de la maladie potentiellement causée par ces substances est exprimée en DALY – Disabled Adjusted Life Years, unité reflétant le dommage à la santé humaine.

- Qualité des écosystèmes : cette catégorie regroupe les impacts liés à la toxicité aquatique et terrestre, à l'acidification et à l'eutrophisation aquatique, à l'acidification et à la nitrification terrestre et à l'occupation des terres. Elle est quantifiée en fraction d'espèces potentiellement disparues, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps, par kilogramme de substance émise (PDF*m²*an/kg).

2.4 L'économie circulaire comme solution aux enjeux environnementaux de l'agriculture

Pour mieux faire face aux multiples défis environnementaux qui lui sont imposés et pour réduire sa propre empreinte environnementale, le secteur agricole devrait être une cible principale des stratégies d'ÉC (Aznar-Sánchez *et al.*, 2020). Le bilan environnemental de la production de 1 kg de chacun des grains : maïs, soya, blé, orge, avoine et canola, découlant de l'étude de CIRAIG de 2015 est présenté dans le tableau 2 précédant. Le tableau 2 donne une vue d'ensemble du bilan total de chaque culture et permet de les mettre en perspective en fonction des catégories de dommage analysés (Changements climatiques, Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Ressources) et de l'inventaire d'eau prélevée. Les figures à l'Annexe A montrent aussi toutes les catégories midpoints (moyennes) et les principaux contributeurs associés à chacune de ces catégories.

2.4.1 Économie circulaire

La plupart des pays du monde s'appuient principalement sur le modèle économique linéaire depuis la révolution industrielle (Ellen MacArthur Fondation, 2019). Malheureusement, ce modèle économique ne tient pas compte du fait que les ressources naturelles du monde sont limitées. Au fil des ans, l'application de l'économie linéaire (EL), qui repose fortement sur la surexploitation des ressources naturelles pour stimuler la croissance économique et la création de richesses, menace de plus en plus les systèmes de survie de la planète (Boon et Anuga, 2020). L'épuisement rapide de ces ressources pour répondre aux demandes croissantes de l'humanité impose un changement vers l'économie circulaire (EC) (Boon et al., 2020). Ainsi, depuis les années 1990, l'ÉC se positionne comme cette approche qui permet la gestion durable des ressources non renouvelables.

Dans la littérature, il existe plusieurs définitions de l'ÉC. Selon Wyman (2017), l'ÉC est le modèle «réduire-réutiliser-recycler» contrairement au modèle linéaire «extraire-utiliser-jeter». Certaines entreprises présentent même l'ÉC comme une approche de gestion qui leur permet de conserver leur « *capital matière* » et de proposer à leurs clients non pas des produits, mais l'usage de leurs propres produits à eux (Sauvé, 2016). Cette nouvelle perspective économique permet de créer des emplois, de réparer et de recycler des produits et leurs composantes (Sauvé, 2016). De même, une ÉC implantée à l'échelle territoriale grâce à des boucles courtes peut créer des retombées positives pour les populations locales (Sauvé, 2016). L'Institut de

l'Environnement, du Développement Durable et de l'Économie circulaire (L'IEDDEC) et Recyc-Québec (2018) ont proposé la définition suivante de l'EC : « *repenser, dans une démarche itérative, à comment réduire la consommation des ressources primaires soit en prolongeant la durée de vie des produits et des composantes du système de production, soit en donnant une nouvelle vie aux ressources existantes, etc.* ». C'est dans le même ordre de définition que Boon et al. (2020) trouvent que le but de l'ÉC est de : 1) n'avoir aucun effet net sur l'environnement, 2) de réduire l'utilisation des ressources naturelles primaires et la production de déchets, puis 3) de réduire efficacement les déchets en les transformant en coproduits précieux. Selon MacArthur (2015), le déploiement et l'adoption des solutions circulaires réduiraient les besoins mondiaux en matières premières et stimulerait l'emploi et la croissance économique dans le monde. MacArthur (2015) présente l'ÉC comme un modèle économique qui vise à découpler la croissance économique de l'utilisation des ressources naturelles, que ce soit par la réduction de l'utilisation des ressources ou l'optimisation de leur utilisation, comme l'ont souligné aussi Belzile et al. (2014). L'idée principale de ce concept est qu'au lieu de jeter les produits avant que leurs valeurs intrinsèques ne soient pleinement exploitées, nous devrions les utiliser et les réutiliser encore (MacArthur, 2019). Actuellement, seul un petit pourcentage des valeurs originales des produits est récupéré après utilisation. Découpler la croissance des contraintes de ressources est une caractéristique capitale du concept d'ÉC (MacArthur 2019).

(Ghisellini *et al.*, 2016) ont observé que la littérature actuelle sur l'ÉC est encore infantile et souffre de lacunes importantes. Selon Suárez-Eiroa *et al.* (2019), l'ÉC est une alternative qui cherche à établir un modèle de production dans lequel les stratégies sont mises en œuvre pour un développement durable, basé sur l'optimisation des ressources utilisées. À cet effet, Bourguignon *et al.* (2016) ont conclu que pour réussir à apprivoiser l'ÉC, les ressources dans tout système de production, y compris l'agriculture, ont besoin de garder leurs utilités au sein du système économique aussi longtemps que possible, réduisant ainsi la nécessité de recourir à de nouvelles ressources primaires et la production de nouveaux déchets. Kirchherr *et al.* (2017) ont défini le concept d'ÉC comme « ce système économique qui vient remplacer le concept de « fin de vie » avec recyclage, réutilisation, réduction et valorisation des matériaux dans les processus de production, distribution et consommation ». Selon Kirchherr *et al.* (2017), l'ÉC repose sur trois principes : 1) la préservation et l'amélioration du capital naturel, 2) l'optimisation de l'efficacité des ressources et 3) la promotion de la capacité du système ».

L'ÉC est un modèle qui tente de changer le caractère non durable du mode de production linéaire traditionnel par un modèle qui utilise des matériaux recyclés pour la production alimentaire afin de réduire l'utilisation de ressources externes (Borrello *et al.* 2017). La récupération et le recyclage des déchets dans un système peuvent réduire la consommation et le gaspillage de ressources externes et l'impact environnemental (Diaz-

Elsayed *et al.*, 2020 ; Aznar-Sánchez *et al.*, 2020 ; Toop *et al.*, 2017).

Les stratégies d'ÉC ont été appliquées dans plusieurs autres champs d'activités avec succès. Elles peuvent aussi être adoptées par les systèmes et processus de production agricoles pour réduire l'utilisation de nouvelles ressources primaires et par conséquent l'impact de ce secteur sur l'environnement.

2.4.2 Économie circulaire dans le milieu agricole

2.4.2.1 Pertinence de l'ÉC dans le milieu agricole

Selon (Aznar-Sánchez *et al.*, 2020), le système agricole intensif à haut rendement semble aujourd'hui une alternative réaliste comparé au système traditionnel que connaissait l'humanité car il est capable de garantir l'approvisionnement en nourriture à une population croissante. Mais ce système agricole intensif fonctionne avec une plus grande utilisation de ressources primaires, ce qui représente un risque pour sa propre durabilité (Ceratti *et al.*, 2016). Ceratti *et al.* (2016) estiment d'ailleurs que, pour continuer à satisfaire la demande mondiale de nourriture jusqu'en 2050 sur la base des modes de production et de consommation intensives actuelles, des ressources équivalentes à celles de trois planètes seraient nécessaires. A cet effet, il devient important de repenser le modèle traditionnel linéaire de production agricole (extraire-utiliser-consommer-éliminer) pour que ce secteur puisse s'adapter aux conséquences du changement climatique et contribuer à la réduction d'impacts environnementaux notamment la réduction des GES. Ce sont les deux enjeux actuels auxquels font face les producteurs céréaliers au Québec.

Avec la croissance démographique, la production alimentaire y compris celle des grains, devrait augmenter de 50% d'ici 2050, ce qui accroîtrait les émissions de GES et les impacts environnementaux (Veolia, 2018). C'est à cet effet que (Basso *et al.*, 2021) ont trouvé qu'il est maintenant urgent de transformer les systèmes de production céréaliers intensifs linéaires non durables tant aux États-Unis que dans d'autres pays comme l'Argentine, l'Australie, le Brésil, le Canada, la Chine, l'Europe et la Russie. Ces auteurs montrent que l'adoption des systèmes circulaires durables pourrait aider à relever les défis imposés au monde agricole. Basso *et al.* (2021) confirment que le modèle actuel de production céréaliers cause l'épuisement et la dégradation des ressources, surtout avec la demande mondiale croissante de céréales présentement sous la menace du changement climatique et des guerres.

Selon plusieurs auteurs, le volume et la complexité croissants des déchets constituent une menace importante pour l'environnement et la santé publique (Chioatto et Sospino, 2023 ; (Kurniawan *et al.*, 2022). Les stratégies d'ÉC visent à limiter l'utilisation des ressources naturelles par la substitution partielle de matières premières essentiellement naturelles par des matières secondaires brutes (Chioatto et Sospino 2022 ; Kurniawan *et al.*, 2022). Selon d'autres auteurs, l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles peut être améliorée par une approche systémique qui combine l'ÉC et la bio-économie (Abdad-Segura *et al.*, 2021 ;

(Pavolová *et al.*, 2020) ; Yang *et al.* 2022). Il existe plusieurs stratégies possibles d'ÉC applicables dans la production agricole, dont les principales sont détaillées dans les sections suivantes.

2.4.2.2 Stratégies circulaires pour l'irrigation

Une quantité importante des ressources en eau est utilisée pour la production céréalière. L'agriculture, avec 70 % de la consommation mondiale en eau douce, en est la plus grande consommatrice (Alexandratos et Bruinsma 2012).

Les produits agricoles qui contribuent le plus à l'empreinte hydrique externe des nations sont : la viande bovine, le soja, le blé, le cacao, le riz, le coton et le maïs. Par conséquent, il existe des opportunités potentielles d'ÉC pour l'utilisation de l'eau dans la production alimentaire (Yang *et al.*, 2022). La récupération et le recyclage de l'eau est une approche de gestion des ressources en eau basée sur une approche circulaire (Smol *et al.* 2020). L'eau de pluie est généralement collectée pour l'irrigation agricole dans le cadre de la récupération de l'eau, ce qui réduit la consommation d'eau de surface et d'eau souterraine (Yannopoulos *et al.*, 2019).

Dans le cadre du cycle de l'eau, les eaux usées municipales, agricoles et industrielles peuvent être aussi utilisées pour l'irrigation agricole après avoir subi plusieurs étapes de filtration et de traitement pour les rendre non toxiques (Pedrero *et al.*, 2020). De nombreuses études indiquent que les eaux usées traitées contiennent encore des nutriments, notamment de l'azote, du phosphore et du potassium, et pourraient par conséquent être des sources de ces nutriments pour les terres agricoles. Une fois les eaux usées utilisées pour l'irrigation agricole, les quantités d'engrais chimiques peuvent être réduites, ce qui a des effets environnementaux et économiques positifs et réduit l'utilisation des ressources en eau (Chojnacka *et al.*, 2020); (Elia *et al.*, 2017)

La réutilisation de l'eau est donc prometteuse dans le processus de mise en œuvre de l'agriculture circulaire puisque dans de nombreuses régions dans le monde entier, cette ressource est utilisée pour l'irrigation agricole, influençant les débits des rivières ou la recharge des aquifères et des zones humides (Pedrero *et al.*, 2020).

2.4.2.3 Stratégies circulaires pour la fertilisation des sols

Au-delà de la récupération d'effluents pour l'irrigation qui peut, en prime, contribuer à la fertilisation à l'aide des nutriments qu'ils contiennent, d'autres stratégies d'ÉC peuvent contribuer à la fertilisation,

incluant l'utilisation de déchets alimentaires organiques pour produire des engrais issus de leur valorisation (Oliveira *et al.*, 2021).

La Politique québécoise de gestion des matières résiduelles (PQGMR) préconise le recyclage et la valorisation des résidus et vise le bannissement de l'élimination des résidus organiques putrescibles par enfouissement ou incinération depuis 2020. Les matières résiduelles fertilisantes (MRF) sont définies ainsi : « matières résiduelles dont l'emploi est destiné à entretenir ou à améliorer, séparément ou simultanément, la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés physiques et chimiques et l'activité biologique des sols » (MDDELCC, 2015). Les MRF recyclables peuvent être une source de fertilisants ou d'amendements de sol. Cependant, la MRF doit répondre à des critères de qualité environnementale. Chaque MRF est classifiée selon sa teneur en contaminants chimiques (catégories C), en agents pathogènes (catégories P), selon ses caractéristiques d'odeurs (catégories O) et sa teneur en corps étrangers (catégories E). C'est ce qu'on appelle la classification C-P-O-E (Hébert, 2015). Aussi, quand on considère la valeur agricole des résidus et leur statut de MRF, seuls les résidus ayant effectivement des propriétés d'engrais ou d'amendement des sols sont considérés comme des MRF. Le statut de MRF est encadré au Québec par le guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes qui spécifie les critères de référence et les normes réglementaires permettant l'utilisation de résidus à cette fin pourvu que ces résidus respectent les conditions de l'annexe 1 du [Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains](#) (< critère B) et être exempt d'odeur distincte d'hydrocarbures. Les terreaux « tout usage » devront respecter les critères du [Guide sur l'utilisation des MRFs](#). De plus, les mélanges de résidus peuvent s'avérer avantageux sur le plan agronomique. Par exemple, les mélanges cendres-chaux permettent d'obtenir un amendement calcique plus équilibré en termes de vitesse de neutralisation de l'acidité des sols, grâce à la présence conjointe de carbonates et d'hydroxydes (Hébert et Breton, 2008). Ils permettent de réduire le risque de surdose d'éléments fertilisants tels que le phosphore et le potassium qui sont concentrés dans la cendre.

2.4.2.4 Stratégies circulaires pour valoriser les matières résiduelles agricoles et bioéconomie

Des résidus de récolte de plantes peuvent non seulement être utilisés comme engrais, mais ils peuvent également être utilisés en alimentation animale ou valorisés énergétiquement.

La bioéconomie vise ainsi à convertir des déchets forestiers et agricoles en des produits chimiques précieux et riches en énergie. Elle prône le recyclage, la réutilisation et la conversion des déchets biologiques destinés à l'élimination dans d'autres processus (Leong *et al.*, 2021). Les déchets agricoles sont considérés comme la première source d'intrant en bioéconomie (Leong *et al.* 2021). La grande disponibilité des matières premières se traduit par une réduction globale des coûts de production et un flux ininterrompu de matières premières tout au long de l'année pour la bioéconomie.

Par exemple, les résidus de récolte, dont l'ensilage de tiges de maïs et la paille de blé, sont beaucoup moins riches en protéines, mais ont des teneurs plus élevées en ADF (fibre de détergent acide) et en NDF (fibre de détergent neutre) comparativement aux foins et ensilages de foin de bonne qualité (MAAARO, 2022). Ces résidus de récolte sont souvent disponibles pour une fraction du prix du foin ou des ensilages de foin, et peuvent être utilisés pour diluer les fourrages de haute qualité, tout en étant adéquats aux besoins nutritionnels de base de la vache gestante (MAAARO, 2022). Selon une étude menée par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales du gouvernement de l'Ontario en 2022, ces fourrages peuvent donner lieu à des économies significatives sans influencer le poids, la santé et la croissance du veau, surtout quand la vache est à la mi-gestation et que ses besoins nutritionnels sont relativement faibles (MAAARO, 2022). Mais les producteurs partenaires de Lanaudière consultés n'ont pas fourni des données sur cette pratique.

Aussi, selon des études conduites par (Yang et al. 2022), la paille issue de la culture du blé peut être utilisée comme engrais, alimentation ou valorisation énergétique. Ces mêmes auteurs ont aussi montré par des techniques de terrain pratique d'ÉC incluant l'utilisation de déchets alimentaires organiques et d'effluents traités pour produire de l'eau et des engrais recyclés, que des résidus de feuilles d'ananas dans les fermes peuvent être récupérés, des fibres de nano-cellulose, lesquelles qui peuvent être utilisées dans la cicatrisation des plaies et l'administration de médicaments (Yang et al. 2022). En outre, (Yang et al. 2022) concluaient aussi que les déchets végétaux et l'huile de cuisson peuvent être transformés en détergents biodégradables et le son de blé en vaisselle biodégradable.

Dans les mêmes ordres d'idées, (Sharma *et al.*, 2021) remarquent que la combustion de combustibles fossiles est à l'origine d'émissions de GES et constitue la plus grande menace pour l'environnement, et les changements climatiques mondiaux. Dans ce contexte, l'exploration des résidus agricoles et autres apparaît comme une alternative appropriée des ressources non renouvelables pour sauver l'environnement (Sharma *et al.*, 2021) techniques de conversion de la biomasse, la bioraffinerie génère de la bioénergie de manière stratégique qui s'inscrit finalement dans la bioéconomie (Kumar *et al.*, 2022).

Pendant ce temps, (Rolewicz-Kalinska *et al.*, 2020) ont analysé la corrélation entre la collecte des biodéchets et les stratégies d'ÉC dans la capitale de Pologne Varsovie et ont estimé que la quantité de biodéchets collectés augmentera, de 26,9 kg/habitant jusqu'à 148,1 kg/habitant. Et que par conséquent, la quantité de biogaz générée à partir de la biomasse pourrait augmenter à près de 9 millions de mètres cubes par an d'ici 2030, ce qui portera la production annuelle d'énergie renouvelable à près de 17 Gigawattheures c'est-à-dire

69TJ.L'ÉC est rentable et s'attaque au changement climatique en utilisant les déchets issus de l'agriculture dans la production d'énergie pour remplacer l'utilisation de combustibles fossiles. Par conséquent, les stratégies d'ÉC peuvent atténuer le changement climatique mondial en augmentant l'utilisation des énergies renouvelables et en transformant la structure énergétique pour la rendre plus durable. Cependant, dépendre de l'énergie provenant des déchets peut entraîner une pénurie de disponibilité des déchets pour la production de biogaz (Yang et al., 2022).

Par contre, au Canada, (Norouzi et Dutta, 2022) ont prouvé à partir de l'analyse de données disponibles sur la gestion et traitement des déchets gérées par l'Association canadienne de biogaz que la disponibilité de matériels de déchets, d'organisations locales de la gestion des déchets municipaux et autres, d'équipement et infrastructures de recyclage et politique d'incitatifs ne constituent aucun souci. A cet effet, ces auteurs suggèrent que : la croissance de l'industrie du biogaz au Canada repose sur : 1) des politiques provinciales de gestion de l'énergie et des déchets ; 2) des technologies avancées pour détourner les déchets organiques des sites d'enfouissement, 3) l'amélioration du rendement en biogaz par l'utilisation de méthodes de prétraitement existantes et 4) l'éducation des agriculteurs sur les opérations de digesteur (Norouzi et Dutta, 2022). Ceci rappelle par exemple l'étude de cas des îles Aland en Finlande à partir de laquelle Yang et al. (2022) notaient que les données énergétiques indiquent que l'utilisation de l'électricité excédentaire produite pour alimenter les véhicules électriques ensemble avec des processus circulaires de valorisation des déchets pour la production du biogaz sont plus bénéfiques que l'exportation de l'énergie excédentaire produite. D'après cette analyse de (Yang et al. 2022), le système énergétique impliquant les processus circulaires avait un bénéfice net annuel de 0,72 million d'euros, ce qui est nettement supérieur au bénéfice associé à l'exportation de l'énergie excédentaire produite (- 0,43 million d'euros). Cependant, le système d'ÉC a été vite confronté à des problèmes de disponibilité des matières premières locales pour la production de biogaz. Il est par conséquent primordial de toujours s'assurer de la disponibilité des sources de gisements de déchets avant toutes initiatives circulaires.

2.4.3 Gisements de matières résiduelles disponibles et pratiques d'économie circulaire déjà en place dans la région de Lanaudière pour l'agriculture

Une récente étude de caractérisation de la filière bioalimentaire conduite dans la région de Lanaudière par le Conseil de développement bioalimentaire de Lanaudière (CDBL) a été réalisée par le Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CCTEI) parallèlement à mon projet de maîtrise et au projet de recherche dans lequel il s'inscrit (CDBL 2022). Une synergie a été établie entre les deux projets et j'ai eu le privilège de pouvoir prendre connaissance des résultats préliminaires pour les valoriser dans mes propres

travaux. Voici à la lumière de cette étude la liste des principaux gisements disponibles et des stratégies d'ÉC déjà mises en œuvre pour les valoriser dans l'agriculture.

2.4.3.1 Matières organiques

2.4.3.1.1 Gisements disponibles en Lanaudière

Les matières résiduelles les plus importantes dans la région sont les matières organiques. Elles représentent 99,6% des matières résiduelles générées, soit 739 767 tonnes/an. Les matières organiques sont produites en majorité par le secteur de l'agriculture (730 594 tonnes/an) sous forme d'aliments pour animaux, de production laitière, de fumiers, de céréales comestibles pour l'élevage et de semences. Les résidus de végétaux sous forme de fruits, légumes, écales de noix et graines, huile, marc de café, produits céréaliers) ainsi que les produits non récoltés, invendus ou déclassés sont souvent compostés sur le même site (laissés au champ) lorsque possible (705 303 tonnes/an). Le reste de la matière organique est généré par le secteur de la fabrication/transformation (6 905 tonnes/an), les commerces (1 290 tonnes/an), les restaurants (857 tonnes/an) et les institutions (120 tonnes/an) qui, en majorité, la recyclent à l'externe (banques alimentaires, entreprises spécialisées), à l'interne, ou l'enfouissent. Les boues organiques (1 205 tonnes/an) et les matières putrescibles domestiques et industrielles collectées par les municipalités (biodéchets d'origine animale : poisson, viande, parures de viande, carcasses animales, os, coquilles d'œuf, lait, fromage etc.). La plupart de ces résidus proviennent des abattoirs (4 545 tonnes/an) et sont entièrement traitées par biométhanisation (1 022 tonnes/an) ou acheminées vers un système de traitement des eaux usées (réseau municipal, fosse septique).

Par ailleurs, d'après les données compilées dans le cadre de l'étude pour le CDBL, les matières organiques enfouies dans la région de Lanaudière représentent 1 199 tonnes par an et proviennent des commerces, des institutions (hôpitaux, écoles, etc.) producteurs et restaurants (CDBL, 2022). La majorité de ces matières enfouies n'est pas présentement utilisée et pourraient par conséquent être compostées et utilisée par des fermes avoisinantes (CDBL, 2022).

Tableau 2.3 : Gisements de résidus disponibles dans Lanaudière et leur teneur

Résidus	Quantité disponible tonne/an	Teneur	Commentaires
Boues de papetières	NA	Azote, phosphore et potassium	Pour fertilisation sols mais doit respecter MELCC (contaminants

Résidus	Quantité disponible tonne/an	Teneur	Commentaires
			chimiques, pathogènes, odeurs, corps étrangers, etc.).
Fruits et légumes (Glanage)	10 869	Plusieurs minéraux, Calorie, glucide, Carbone	Compostage (source d'engrais pour les agriculteurs, qui remplacent l'utilisation de fumiers ou de fertilisants synthétiques plus dispendieux)
Résidus de végétaux, fruits et légumes, produits non récoltés, invendus ou déclassés, gazon et les plants invendus	730730	Carbone, Azote, lignine et cellulose	Compostage
Restants de table et retailles de préparation de repas d'origine végétale et animale	20465	Azote, phosphore et potassium	Compostage
Drêche	678,5 à 1000	Riche en protéine Carbone, Azote,	Utilisable pour Épandage agricole ou Production de biogaz ;
Coquilles d'œufs	1,8	Calcium et magnésium	89% (1,6 t enfouie /an) Peuvent également être utilisées en agriculture comme amendement calcique et magnésien
Lactosérum	NA	Calcium	Production de biogaz Fertilisation des sols

Source : CDBL, 2022

2.4.3.1.2 Surplus alimentaires

Selon les données compilées par le CDBL dans la région de Lanaudière, les surplus alimentaires représentent 4 513 tonnes/an, soit 0,6% de tous les extrants recensés. Ils sont générés en majorité par les

producteurs agricoles (68%), le secteur de la fabrication/transformation (21%) et les commerces (10%). Parmi les réponses obtenues, les surplus alimentaires les plus abondants sont les légumes (3 110 tonnes/an, tous légumes confondus), les drêches de brasserie (678,5 tonnes/an), les résidus comestibles mixtes (invendus, surplus de mets préparés, etc.) et le lactosérum (267 tonnes/an). Les surplus sont principalement recyclés à l'externe (80%) sous forme de dons à des banques alimentaires ou pour l'alimentation animale, ou compostés (19%) in situ ou via les services municipaux (CDBL, 2022). Sous réserve des normes d'hygiène et de salubrité des aliments applicables et du rapport coûts/bénéfices engendrés, un tri à la source plus poussé permettrait d'isoler les surplus non utilisables par l'humain afin de les diriger vers d'autres débouchés comme le compostage (CDBL, 2022).

L'entreprise SPB Solutions récupère les sous-produits d'origine végétale des transformateurs alimentaires de Lanaudière et les convertit en produits pour l'alimentation animale et en résines de bioplastiques pour le moulage par injection. Les principaux résidus de transformation visés sont :

- Les produits de boulangerie ;
- Les levures sèches ;
- Les céréales et sous-produits céréaliers ;
- les pâtes alimentaires;
- les biscuits, gâteaux, craquelins et autres grignotines. (SPB Solutions, 2013).

2.4.3.1.3 Fruits et légumes laissés aux champs

Le gisement de fruits et légumes laissés aux champs ou déclassés est estimé à 10 869 tonnes/an dans Lanaudière, dont près de 2 935 tonnes/an seraient compostées in situ. Les fruits et légumes compostés sur place sont une source d'engrais pour les agriculteurs, qui remplace l'utilisation de fumiers ou de fertilisants synthétiques plus coûteux (CDBL, 2022).

Le glanage est une pratique en plein essor au Québec, qui consiste à ramasser ce qui reste dans les champs ou les arbres une fois que les producteurs ont terminé leurs récoltes. Les surplus récoltés et les quantités glanées sont ensuite redistribués entre les cueilleurs bénévoles, les producteurs et des partenaires communautaires locaux. Dans le processus du glanage et de distribution des fruits et légumes, il serait bénéfique de rediriger de façon circulaire, les produits non comestibles par l'humain vers les fermes pour le compostage. Certaines conditions sont à respecter selon le Gouvernement du Québec.

Des producteurs de la région accueillent déjà des glaneurs pour parcourir les champs après la récolte afin de récupérer les fruits et légumes non ramassés. Cette pratique permet de réduire le gaspillage alimentaire et de partager les récoltes avec la communauté. Deux groupes de glanage existent dans Lanaudière : Montcalm Récolte (MRC de Montcalm) et Solidaires Chez-Nous (MRC Les Moulins).

2.4.3.1.4 Drêche

Plusieurs entreprises de brassage de bière détournent leur drêche de l'enfouissement en la dirigeant vers l'alimentation animale. Ces synergies de proximité entre des entreprises de transformation alimentaire (brasseries, distilleries) et des producteurs agricoles locaux (éleveurs) permettent de valoriser des matières tout en limitant les distances de transport (CDBL, 2022). Les entreprises en retirent également des bénéfices économiques (diminution des coûts de gestion des matières résiduelles, réduction des coûts d'approvisionnement).

2.4.3.1.5 Boues de papetières

L'épandage agricole est le principal débouché actuellement au Québec pour les boues de papetières. Un producteur de la région s'approvisionne en boues de papetières pour fertiliser ses champs. Pour se conformer à cet usage, les boues doivent respecter un ensemble de critères stricts définis par le MELCC (contaminants chimiques, pathogènes, odeurs, corps étrangers, etc.) (Primeau, 2014).

Les boues de papetières sont riches en matières organiques, azote, phosphore et potassium. Elles peuvent se substituer en partie aux fertilisants synthétiques plus coûteux pour améliorer le rendement des terres agricoles (CDBL 2022). Ce mode de gestion ne nécessite aucune transformation des boues qui peuvent être épandues sous forme liquide, semi-solide ou solide après déshydratation (CDBL, 2022). Les boues de papetières sont une ressource pour laquelle il existe de nombreuses opportunités de valorisation (épandage agricole et sylvicole, bi séchage, biométhanisation, oxydation hydrothermale, cultures énergétiques, restauration de sites miniers, etc.) (Primeau, 2014).

2.4.3.1.6 Lactosérum

La production de lactosérum (ou « petit-lait ») est estimée à 4 450 tonnes/an dans Lanaudière. Selon l'étude du CDBL conduite en 2022, l'un des producteurs consultés épandrait entièrement son lactosérum qu'il produit, dans les champs.

Le CTTÉI, positionne dans quelques-uns de ses travaux antérieurs le lactosérum et ses différents constituants comme une ressource potentielle d'ÉC. Ainsi, le lactosérum non transformé pourrait alors être valorisé directement en :

- Alimentation animale ;
- Fertilisation des sols;
- Entomoculture (en remplacement de l'eau pour l'humidification du substrat de croissance des insectes);
- Production de biogaz ;
- Fermentation alcoolique;
- Biotechnologies diverses (produits biochimiques, etc.).

2.4.3.1.7 Valorisation des surplus énergétiques

Les études de caractérisation menées par CDBL (2022) montrent que des surplus énergétiques sont générés par les producteurs agricoles et le secteur de la fabrication/transformation de Lanaudière. Il s'agit essentiellement de chaleur, de vapeur et d'air chaud et sec provenant des activités de chauffage de serre et autres, des processus de transformation, chauffage immeubles institutionnels, cuisine aux restaurants et activités de commerces. CDBL (2022) note que ces surplus permettent aux producteurs agricoles de chauffer une partie de leurs installations (avec ou sans système de récupération de chaleur formel installé). Mais plusieurs de ces producteurs ont montré l'intérêt de recevoir une assistance technique afin d'optimiser la gestion de leurs surplus énergétiques, ce qui représente une piste d'ÉC qui permettrait la récupération de ces surplus d'énergie, potentiellement utilisables pour le séchage des grains.

2.4.3.1.8 L'ÉC et les déplacements potentiels d'impacts

De manière générale, la plupart des méthodologies utilisées dans la littérature en matière d'ÉC s'en tiennent de façon plus ou moins exclusive à des indices de circularité et de réduction de la consommation de ressources à tout prix, mais il a été démontré que ces approches entraînent occasionnellement des déplacements d'impacts indésirables ou d'effets rebonds. Ce phénomène aussi appelé « paradoxe de Jevons » révèle que l'ÉC comporte un potentiel de retombées négatives. Par exemple, quand l'épargne générée par une efficacité accrue de la production et de la consommation d'énergie engendre une hausse de

la production et de sa consommation de cette même ressource, il s'agit là de déplacements d'impacts indésirables ou d'effets rebonds. Aussi, ce même effet rebond s'observe quand le recyclage ou le reconditionnement d'une ressource a un impact moindre ou supérieur par unité comparativement à la production primaire avec laquelle elle est en concurrence sur le marché. La question est alors de savoir si la circularisation d'une ressource par exemple pousse à la hausse de sa production et de sa consommation ?

Selon les résultats de l'étude de (Yang, 2022), l'impact des stratégies d'ÉC en agriculture est généralement positif pour la plupart de leurs applications, à l'exception par exemple de l'utilisation des terres et de la couverture terrestre, qui peuvent connaître des effets négatifs. Aussi, les stratégies d'ÉC peuvent améliorer la qualité de l'air et de l'eau, réduire la consommation d'énergie, et réduire l'utilisation des ressources naturelles. Simultanément, les déchets solides et toxiques seront réduits grâce à une stratégie d'ÉC.

Cependant, l'utilisation de matériaux d'origine biologique dans la stratégie d'ÉC nécessitera davantage de terres pour cultiver des matériaux biosourcés. Pour les matériaux biosourcés, la recyclabilité, la dégradabilité et la compostabilité doivent également être considérée en termes d'utilisation du sol (Yang, 2022). Ce sont là des exemples de déplacement d'impacts.

Les conséquences environnementales reliées à différentes stratégies d'ÉC sont très contextuelles et dépendent de nombreux flux élémentaires² et intermédiaires³ du système de production (énergie nécessaire, contenu recyclé etc.). Si la maîtrise de la circularité des flux est généralement bénéfique pour l'environnement, elle a parfois des conséquences indésirables inattendues (déplacement d'impacts) et toutes les stratégies d'ÉC ne présentent pas le même intérêt en matière de performance environnementale. L'ACV, présentée de manière plus détaillée à la section 2.5, qui permet la quantification de la performance environnementale des stratégies envisagées, s'impose et devient donc indissociable d'une ÉC éclairée. Les outils de quantification des impacts de l'approche cycle de vie doivent être mis à profit quand on explore les pratiques d'ÉC en vue de réduire les impacts environnementaux de manière durable (Geoffrey et al.,

² Matière ou énergie entrant dans le système étudié, qui a été puisée dans l'environnement sans transformation humaine préalable, ou matière ou énergie sortant du système étudié, qui est rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure (ISO, 2006b).

³ Matière ou énergie entrant dans le système étudié, qui a été puisée dans l'environnement sans transformation humaine préalable, ou matière ou énergie sortant du système étudié, qui est rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure (ISO, 2006b).

2018). C'est vrai de manière générale, et c'est vrai plus particulièrement lors de l'utilisation de stratégies d'ÉC dans la production agricole.

(Dahiya *et al.*, 2020) ont démontré par l'analyse du cycle de vie que l'utilisation de produits biosourcés en ÉC a un excellent potentiel de réduction des impacts, mais que parfois cette pratique peut avoir, dans certaines conditions, d'autres répercussions environnementales moins avantageuses. Ces auteurs notent en conséquence que l'utilisation stratégique des produits biosourcés en ÉC nécessitera l'évaluation de leur durabilité ainsi que des moyens de surmonter les limites et les obstacles qui pourraient les rendre moins performants du point de vue de leurs impacts environnementaux. A ce titre, l'ACV est une approche qui semble pertinente pour guider la démarche d'ACV.

2.5 L'ACV, outil d'évaluation de la performance environnementale

2.5.1 L'analyse du cycle de vie

L'ACV est un outil méthodologique permettant la quantification d'impacts environnementaux potentiels associés à chaque étape du cycle de vie d'un produit ou d'un service. L'ACV permettra d'éviter le déplacement d'impact d'une étape du cycle de vie à l'autre ou d'une catégorie d'impact à l'autre (Jolliet *et al.*, 2005). L'ACV est une méthodologie scientifique normalisée (ISO 14 040–14 044 : 2006) qui permet d'évaluer les impacts associés au cycle de vie d'un produit ou d'un service. Lorsque l'ACV est appliquée avec un ensemble complet de catégories d'impacts, elle peut apporter une perspective plus globale à la prise de décision multicritères, contrairement à autres méthodologies qui ne permettent que des prises de décisions uni critère (Peña *et al.*, 2021). L'ACV est largement utilisée dans les études portant sur la gestion environnementale.

L'ACV est un outil d'évaluation normalisée selon ISO14044 permettant de réaliser un bilan environnemental sur le cycle de vie d'un produit, service, entreprise ou procédé, c.-à-d. depuis de l'acquisition des matières premières à la production, l'utilisation, le traitement en fin de vie, le recyclage et la mise au rebut (du berceau au tombeau). Les résultats d'une ACV prennent typiquement la forme d'une liste d'indicateurs qui peut être soit un inventaire des flux extraits depuis ou émis vers l'environnement (Inventaire du Cycle de Vie ou ICV) ou une forme agrégée de ces indicateurs témoignant des dommages causés sur des aires de protection (Analyse des Impacts du Cycle de Vie ou AICV).

2.5.2 L'ACV pour éclairer la circularité dans le secteur agricole en Lanaudière

Elle est particulièrement intéressante puisqu'elle met en évidence les processus à améliorer en priorité car si l'approche circulaire apparaît ci-vertueuse, elle n'est pas toujours automatiquement sans écueils. L'ÉC peut entraîner toute une série de conséquences indésirables comme le déplacement d'impacts d'une étape du cycle à l'autre. Elle peut aider à comprendre les performances environnementales des stratégies d'ÉC (Peña et al., 2021). L'ACV est par conséquent très utile pour améliorer les performances environnementales de la mise en œuvre de l'ÉC au sein des exploitations agricoles.

Ces dix dernières années, elle est de plus en plus utilisée pour évaluer et comparer la durabilité environnementale des produits agricoles (Fantin et al., 2017).

Beaucoup d'études ont utilisé l'ACV pour mesurer la performance environnementale de différents systèmes de production. Par exemple, les Producteurs de grains du Québec, qui représentent les intérêts des 11 000 productrices et producteurs de grains de la province, ont fait réaliser par le consortium de recherche CIRAIG, Groupe AGÉCO et Quantis des ACVs pour évaluer la performance environnementale et le portrait socioéconomique des six principaux grains produits au Québec à savoir : le maïs, le soya, le blé, l'avoine, l'orge et le canola (CIRAIG et al., 2015), tel que présenté à la section 2.3.3.

Les producteurs de céréales conçoivent que les résultats de ces ACVs permettront de mettre en place des stratégies socioéconomique et environnementale dans le secteur céréalier sur le marché national et international (CIRAIG et al., 2015). Ils estiment que les résultats de ces ACVs se veulent un portrait de la production de grains au Québec et peuvent par conséquent être utilisés comme feuille de route pour améliorer la performance du secteur céréalier, tant au plan socioéconomique qu'environnemental (CIRAIG et al., 2015).

L'analyse du cycle de vie (ACV) est vue comme un outil de quantification de la performance environnementale qui pourrait aider à identifier les meilleures opportunités en termes d'ÉC pour le secteur des productions céréalières et à en comprendre la performance économique et environnementale. L'ACV a déjà été utilisée dans plusieurs autres études pour évaluer la performance de stratégies d'ÉC (Geoffrey, 2021). L'ACV pourrait donc aussi être utilisée pour évaluer la performance des stratégies d'ÉC utilisées en agriculture.

L'ACV n'a jamais porté de regard critique sur l'ÉC dans le monde agricole notamment le secteur céréalier de Lanaudière. Elle peut permettre d'identifier en agriculture où dans le cycle de production des céréales focaliser les efforts de réduction de GES c'est-à-dire à quelles étapes correspondrait l'utilisation de quelles stratégies d'ÉC en priorité pour réduire les points chauds en termes d'émission de GES. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet où l'idée est d'arrimer l'ACV et l'ÉC pour éclairer la prise de décision dans

le secteur agricole, notamment dans la production céréalière dans Lanaudière pour garantir une réduction des GES de cette filière. Ce projet s'inscrit dans un programme financé par le MAPAQ intitulé : « Outiller les producteurs céréaliers dans la prise de décision vers une ÉC ». Ce programme vise à créer un outil pour informer les producteurs céréaliers en Lanaudière sur les stratégies circulaires les plus efficaces en termes de performances environnementale.

2.6 Mise en contexte du projet : Utilisation des métriques de la durabilité (ACV) pour évaluer la performance environnementale des stratégies circulaires pour la production céréalière

Le modèle conceptuel de l'ÉC est utilisé à l'échelle mondiale et dans de nombreux domaines de recherche (Peña et al., 2021). Il est basé sur le principe que les déchets d'un système peuvent être utilisés comme intrant dans un autre, augmentant ainsi l'efficacité de l'utilisation des ressources et réduisant l'impact environnemental (TóthSzita, 2017). Cependant, il n'existe pas de méthode uniforme pour déterminer si un modèle de développement d'ÉC particulier contribue à une consommation et une production réellement plus durable (Yang et. 2022). Par conséquent, lors de l'introduction du concept d'ÉC, la performance environnementale de solutions envisagées doit être prise en compte selon une perspective de cycle de vie.

Étant donné l'influence du contexte sur la performance environnementale des stratégies d'ÉC, il est essentiel de tenir compte des données de terrain précises pour établir cette performance environnementale de manière robuste, en tenant compte à la fois de la réalité de la pratique des producteurs agricoles, de leur situation géographique et des gisements de matières résiduelles disponibles.

Ce projet, réalisé en collaboration avec des partenaires de terrain (5 producteurs céréaliers en Lanaudière) vise à les éclairer pour l'adoption de stratégies circulaires réellement durables, permettant à la fois de détourner des matières résiduelles de l'enfouissement et de réduire l'exploitation des ressources, mais également d'améliorer la performance environnementale de la production de grains. Ce qui m'amène à la question de recherche et aux objectifs suivants de ce mémoire qui me permettront d'arrimer l'ACV et l'ÉC pour garantir une décision plus éclairée aux producteurs céréaliers de Lanaudière.

2.7 QUESTION GÉNÉRALE, OBJECTIFS ET HYPOTHESE DE RECHERCHE

QUESTION GÉNÉRALE : La question est : « *Comment l'adoption de stratégies d'utilisation circulaires des ressources disponibles dans Lanaudière pourrait contribuer à une réduction de l'impact* »

environnemental, notamment les GES, de la production céréalière et quels sont les écueils à éviter en matière de déplacement d'impact »?

OBJECTIF PRINCIPAL : *« Développer une approche itérative pour prioriser les stratégies d'économie circulaire (ÉC) pertinentes en matière de réduction des émissions de GES pour la production de grains en Lanaudière à l'aide de l'analyse du cycle de vie (ACV) ».*

SOUS-OBJECTIF 1 : *À la lumière des résultats du bilan environnemental initial de référence (CIRAIG et al., 2015) et des principaux contributeurs identifiés, le sous-objectif 1 est « d'identifier les stratégies de circularité de valorisation de déchets et de résidus disponibles sur les fermes, à l'échelle du territoire (municipalités et industries voisines) pour chacun des points chauds identifiés et retenus ».*

Ces stratégies circulaires seront paramétrisées en tenant compte des gisements disponibles de différentes matières résiduelles qui ont été répertoriés dans une étude parallèle à celle-ci (distances de transport, etc.) et en collaboration avec les producteurs partenaires du projet.

SOUS-OBJECTIF 2 : *le sous-objectif 2 vise à « réaliser l'ACV des stratégies proposées dans laquelle les paramètres influant le plus la performance environnementale des stratégies identifiées seront identifiés à l'aide d'analyses de sensibilité ».*

SOUS-OBJECTIF 3 : *le sous-objectif 3 vise à « Comparer les nouveaux scénarios circulaires et leurs performances environnementales au statu quo et faire des recommandations aux producteurs partenaires de ce projet ».*

HYPOTHESE GENERALE : *La mise en œuvre efficace de l'ÉC dans le secteur céréalière en Lanaudière implique d'une part une prise en compte des ressources secondaires et autres, disponibles dans Lanaudière sur le terrain et d'autre part une quantification des bénéfices et des risques des solutions envisagées (tant en termes des rendements, des coûts qu'en termes d'impact environnemental) pour guider la prise de décision des acteurs de cette filière.*

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS

3.1 ARTICLE SCIENTIFIQUE PUBLIÉ :L'économie circulaire dans la filière céréalière au Québec pour réduire les émissions de gaz à effet de serre selon une perspective cycle de vie : le cas du maïs grain

Note. Ce chapitre a été publié comme un article scientifique dans la Revue Organisations & Territoires, dans son numéro spécial « La gestion du changement et la transition vers l'ÉC : Une perspective territoire ». Ces auteurs sont : Samson Dazogbo¹, Pablo Tirado Seco², Dominique Maxime³, Nathalie Berthélemy⁴ et Cécile Bulle⁵

RÉSUMÉ. Cette étude présente une approche itérative de priorisation de stratégies d'économie circulaire (ÉC) pertinentes en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour la production de grains dans Lanaudière, au Québec, à l'aide de l'analyse du cycle de vie (ACV). Après une revue de la littérature des stratégies d'ÉC généralement utilisées dans le domaine de l'agriculture, nous avons identifié les principaux contributeurs (points chauds) aux émissions de GES le long du cycle de vie de la production de grains. En partant du principe que les acteurs céréaliers devraient concentrer leurs efforts sur ces principaux contributeurs pour réduire les émissions de GES de manière efficace, nous avons identifié des stratégies d'ÉC axées sur ces contributeurs. Les impacts et les bénéfices environnementaux de la mise en place de ces stratégies ont été quantifiés à l'aide d'une analyse du cycle de vie (ACV) qui a permis de mettre en lumière les conditions nécessaires pour que l'ÉC rime bien avec réduction d'impacts. Des recommandations concrètes ont ainsi pu être établies, puis des stratégies d'ÉC sur mesure pour chaque producteur dans son contexte territorial ont été proposées.

Mots clés : secteur céréalière, analyse de cycle de vie, économie circulaire, valorisation déchets, résidus, biogaz, boues, réduction de GES.

⁴CADET, Directrice générale, Centre d'accompagnement vers une durabilité économique territoriale ;

⁵ CIRAIG, Professeure, Institut des sciences de l'environnement et Département de stratégie et RSE, ESG, UQAM.

ABSTRACT. This study introduces an iterative approach for prioritizing circular economy (CE) strategies applicable to reducing greenhouse gas (GHG) emissions for grain production in Lanaudière, in the province of Quebec, Canada, using the life cycle analysis (LCA). After a literature review of CE strategies generally used in agriculture, we identified the main contributors (hotspots) to GHG emissions along the life cycle of grain production. Based on the principle that cereal producers should focus their efforts on these main contributors to reduce GHG emissions effectively, we have identified CE strategies focusing on these contributors. The environmental impacts and benefits of the implementation of these strategies were quantified using a life-cycle assessment (LCA), that enabled to highlight the conditions required for CE to rhyme well with impact reduction. It was thus possible to define concrete recommendations, and customized CE strategies were proposed for each producer in the respective territorial context.

3.1.1 Introduction

Les grandes cultures de maïs, de soya, de blé, d’avoine, d’orge et de canola couvrent plus d’un million d’hectares, au Québec. Puisque l’agriculture dépend beaucoup des conditions climatiques, le secteur des productions céréalières fait face à une augmentation des risques liés à l’urgence climatique (sécheresse, inondations, fortes variations des températures), qui le fragilisent.

Par ailleurs, l’agriculture intensive est un contributeur non négligeable aux impacts environnementaux et aux émissions de GES. En 2017, le secteur agricole québécois, incluant la production céréalière, a rejeté 9,8 % des émissions nationales de GES, soit 7,7 Mt éq. CO₂ (MELCC, 2019), et ce, sans compter les émissions liées aux dépenses énergétiques des équipements et des bâtiments des producteurs.

Adopter des pratiques plus durables, notamment celles de l’économie circulaire (ÉC), peut contribuer à répondre à ces enjeux et rendre le secteur céréalière plus résilient. Au Québec, de façon générale, plusieurs stratégies d’ÉC sont déjà pratiquées par certains producteurs céréalières, notamment celles basées sur l’utilisation des matières résiduelles fertilisantes (MRF) (voir section 1.1). Dans la région de Lanaudière, une étude récente du Centre de transfert de technologie en écologie industrielle (CTTÉI, 2022) met en lumière que les MRF d’origine organique suivantes sont déjà utilisées par certains producteurs agricoles : les surplus alimentaires, les fruits et légumes laissés aux champs, la drêche, les boues de papetières et le lactosérum. Cependant, certaines de ces stratégies d’ÉC ont parfois des effets rebonds et peuvent accroître les émissions de GES ou avoir d’autres conséquences environnementales néfastes inattendues.

Pour adopter de telles pratiques, les producteurs doivent pouvoir en comprendre la pertinence tant d’un point de vue opérationnel qu’environnemental. Il existe cependant très peu d’études permettant d’identifier les

opportunités d'ÉC pour le secteur de la production céréalière et d'en comprendre la performance environnementale.

Ce projet vise donc à déterminer dans quelle mesure l'adoption de stratégies d'utilisation circulaire des ressources disponibles pourrait contribuer à une réduction de l'empreinte carbone de la production céréalière dans Lanaudière et quels sont les écueils à éviter en matière de déplacement d'impacts.

La principale contribution de cette étude est d'apporter un éclairage quantitatif à la prise de décision en matière d'ÉC durable pour la production céréalière dans Lanaudière, puis de formuler des recommandations concrètes et contextualisées pour les producteurs agricoles.

Après une mise en contexte de l'ÉC dans le milieu agricole (et plus particulièrement dans Lanaudière) et de la pertinence de l'analyse du cycle de vie (ACV) pour accompagner la mise en œuvre de l'ÉC, l'objectif principal de l'étude et ses trois sous-objectifs spécifiques sont définis. Pour chacun de ces sous-objectifs, la méthodologie utilisée est décrite, puis les résultats sont présentés.

3.1.2 Mise en contexte

3.1.2.1 L'économie circulaire dans le secteur agricole

Plusieurs stratégies d'ÉC pour la production agricole sont mentionnées dans la littérature : l'irrigation, la fertilisation à l'aide des MRF, la valorisation des matières résiduelles agricoles par la bioéconomie et la réduction de l'utilisation des intrants par stratégie circulaire.

L'irrigation

L'agriculture représente 70 % de la consommation mondiale en eau douce (Alexandratos et Bruinsma, 2012). Dans de nombreuses régions du monde, la consommation d'eau pour l'irrigation agricole influence les débits des rivières ou la recharge des aquifères et des zones humides (Pedrero et *al.*, 2020). Il existe donc des opportunités importantes d'ÉC de l'eau pour la production agricole (Yang et collab., 2022). La récupération et le recyclage de l'eau, par exemple, sont des stratégies circulaires de gestion de la ressource en eau (Smol et *al.*, 2020). L'eau de pluie peut être collectée pour l'irrigation afin de réduire la consommation d'eau de surface et d'eau souterraine (Yannopoulos et *al.*, 2019). Les eaux usées municipales, agricoles et industrielles peuvent être aussi utilisées pour l'irrigation agricole après avoir subi, au besoin, des étapes de filtration et de traitement pour les rendre non toxiques (Pedrero et *al.*, 2020). Par ailleurs, ces eaux usées traitées contiennent des nutriments, notamment de l'azote, du phosphore et du potassium, ce qui

contribue à la fertilisation des terres agricoles et entraîne une réduction des quantités d'engrais chimiques à utiliser), donc a des effets environnementaux et économiques positifs additionnels (Chojnacka et al., 2020 ; Rossi et collab., 2021).

La fertilisation à l'aide des MRF

Les MRF sont définies ainsi : « Matières ou objets périmés, rebutés ou autrement rejetés dont l'emploi est destiné à entretenir ou à améliorer, séparément ou simultanément, la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques et chimiques et l'activité biologique des sols » (MDDELCC, 2016, p. 1). Les MRF peuvent être une source de fertilisants ou d'amendement du sol. La Politique québécoise de gestion des matières résiduelles préconise le recyclage et la valorisation des résidus, et vise le bannissement de l'élimination des résidus organiques putrescibles par enfouissement ou par incinération depuis 2020.

La valorisation des matières résiduelles agricoles par la bioéconomie

La bioéconomie vise à convertir des déchets forestiers et agricoles en des produits chimiques précieux et en énergie (Pedrero et al., 2020). Elle prône le recyclage, la réutilisation et la conversion des déchets biologiques destinés à l'élimination (Leong et collab. 2021). On pense ici notamment à l'exploitation des résidus agricoles comme option à des ressources non renouvelables ainsi qu'à la bioraffinerie, qui génère de la bioénergie (Kumar Sarangi et collab., 2022). Selon plusieurs sources, il est prévu que, d'ici 2030, le traitement des déchets solides génèrera un volume annuel de biogaz pouvant atteindre près de 9 millions de m³ (Al-Wahaibi et al., 2020) ; Rolewicz-Kalińska et al., 2020 ; Sharma et al., 2021); (Yang et al., 2023).

La réduction de l'utilisation des intrants par stratégie circulaire

Selon l'ONU, l'agriculture circulaire devrait se concentrer sur l'utilisation de quantités minimales d'intrants externes, de manière à régénérer les sols et à minimiser les impacts sur l'environnement (réduction de l'utilisation des terres, de l'utilisation d'engrais chimiques et de la production de déchets) (Ogle et al., 2019). Dans toute activité encadrée par l'ÉC, la réutilisation et le recyclage des matériaux sur place font partie des choix recommandés. Ainsi, la mise en œuvre en agriculture de l'ÉC par le biais du recyclage, de la valorisation ou de la réutilisation à l'échelle de la ferme est une stratégie qui permet de réduire les intrants externes et de limiter l'ensemble des impacts associés à leur production ou à la gestion des matières résiduelles qui les remplacent.

3.1.2.2 Matières résiduelles disponibles dans Lanaudière pour l'ÉC en agriculture

La récente étude de caractérisation de la filière bioalimentaire conduite dans la région de Lanaudière par le CTTÉI (2022) présente des données sur les gisements (intrants-extrants) recueillies auprès de 159 entreprises, tous secteurs confondus. Une synergie a été établie entre les deux projets et nous en avons eu le privilège de pouvoir prendre connaissance des résultats préliminaires de cette étude pour les valoriser dans nos travaux.

À la lumière de cette étude, les principaux gisements disponibles sont les suivants : les matières organiques (résidus verts, fruits et légumes, fumiers, carcasses, etc.) représentent 99,6 % des matières résiduelles générées par les entreprises sondées, soit 739 767 t/an. Ces matières organiques sont produites en majorité par le secteur de l'agriculture (730 594 t/an). Les résidus de végétaux, fruits et légumes ainsi que les produits non récoltés, invendus ou déclassés sont souvent compostés sur site (laissés au champ : 705 303 t/an). Le reste des matières organiques est généré par le secteur de la fabrication/transformation (6 905 t/an), les commerces (1 290 t/an), les restaurants (857 t/an) et les institutions (120 t/an) qui, en majorité, les recyclent à l'externe (banques alimentaires, entreprises spécialisées), à l'interne ou encore l'enfouissent. Les boues organiques (1 205 t/an), qui correspondent à un échantillon très limité d'entreprises dans l'étude, sont traitées par biométhanisation (1 022 t/an) ou acheminées vers un système de traitement des eaux usées (réseau municipal, fosse septique). D'après les données compilées dans le cadre de cette étude, les matières organiques enfouies représentent 1 199 t/an pour l'échantillon d'entreprises sondées (CTTÉI, 2022).

En extrapolant ces données à l'ensemble de la région, il semble y avoir un potentiel intéressant de mise en œuvre de stratégies d'ÉC permettant de détourner ces matières de l'enfouissement.

3.1.2.3 L'analyse de cycle de vie pour éclairer la circularité dans le secteur agricole en Lanaudière

La mise en œuvre de l'ÉC, si elle a une vocation vertueuse, n'aboutit pas de manière systématique à une réduction des impacts environnementaux (Janik et collab., 2020). Elle peut entraîner toute une série de conséquences indésirables, par exemple le déplacement d'impacts d'une étape du cycle à l'autre. Elle est une approche systémique endossée notamment par le Programme des Nations unies pour l'environnement (UNEP) et par l'Union européenne, l'ACV permet l'évaluation normalisée du bilan environnemental du cycle de vie d'un produit, service, entreprise ou procédé (ISO 14044), c'est-à-dire depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à la fin de vie, incluant la production, l'utilisation, etc. (du berceau au tombeau). L'ACV permet de quantifier la performance environnementale des stratégies d'ÉC (Peña et al., 2021) et elle a été de plus en plus utilisée au cours des années récentes pour évaluer et comparer la durabilité environnementale des produits agricoles (Fantin et al., 2017). Par exemple, les Producteurs de

grains du Québec ont fait évaluer la performance environnementale des six principaux grains produits au Québec (CIRAIG et Groupe AGÉCO, 2015). Par ailleurs, l'ACV a déjà été utilisée pour évaluer la performance environnementale de stratégies d'ÉC (Janik et *al.*, 2020). Elle pourrait donc être utilisée pour évaluer la performance environnementale des stratégies d'ÉC utilisées en agriculture au Québec, ce qui, à notre connaissance, n'a jamais été fait.

3.1.2.4 Objectifs

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet, dont l'objectif principal est de développer une approche itérative pour prioriser les stratégies d'ÉC pertinentes en matière de réduction des émissions de GES pour la production de grains dans Lanaudière à l'aide de l'ACV. Cet objectif s'articule en trois sous-objectifs :

- 1- À la lumière des résultats du bilan environnemental de la production céréalière au Québec (CIRAIG et Groupe AGÉCO, 2015), des principaux contributeurs identifiés (points chauds) et en collaboration avec les producteurs partenaires du projet, identifier des stratégies d'ÉC influençant potentiellement ces points chauds ;
- 2- Réaliser une ACV des stratégies identifiées et mettre en lumière les principaux déterminants des impacts de ces stratégies à l'aide d'analyses de sensibilité;
- 3- Comparer les nouveaux scénarios circulaires et leurs performances environnementales au statu quo, puis faire des recommandations aux producteurs et aux autres acteurs impliqués dans le système.

3.1.3 Méthodologie

3.1.3.1 Sous objectif 1 : Identification des stratégies pertinentes d'ÉC

3.1.3.1.1 Principaux contributeurs au changement climatique de la production céréalière dans Lanaudière

Afin de déterminer les stratégies d'ÉC potentiellement les plus pertinentes pour réduire l'empreinte carbone de la production de grains dans Lanaudière, nous avons, dans un premier temps, identifié les principaux contributeurs aux émissions de GES dans l'étude déjà réalisée sur la production de grains dans Lanaudière (CIRAIG et Groupe AGÉCO, 2015). Nous avons choisi de restreindre notre analyse au cas du maïs-grain¹.

3.1.3.1.2 Stratégies d'ÉC potentiellement pertinentes pour réduire l'empreinte carbone de la production de grains

À la lumière, d'une part, des points chauds du cycle de vie de la production du maïs-grain identifiés lors de l'étape précédente et, d'autre part, des gisements de matières résiduelles identifiés dans l'étude du CTTÉI

(2022) et des stratégies d'ÉC existantes identifiées dans la littérature pour l'agriculture, nous avons établi une série de stratégies potentielles d'ÉC qui nous semblent pertinentes pour réduire les impacts des points chauds, tout en tenant compte de la réalité de terrain en matière de disponibilité des ressources secondaires.

3.1.3.1.3 Stratégies les plus pertinentes pour les producteurs céréaliers partenaires du projet

Les stratégies d'ÉC élaborées à l'étape précédente ont servi de base à des échanges lors d'un des ateliers qui ont eu lieu les 15 et 16 décembre 2021 à Saint-Jacques, au Québec. Y ont participé l'équipe de recherche, trois membres de l'équipe du projet d'étude de caractérisation de la filière bioalimentaire conduite dans la région de Lanaudière pour le Conseil de développement bioalimentaire de Lanaudière (CDBL) (CTTÉI, 2022) et les producteurs céréaliers partenaires de terrain du projet, à savoir : 1) la Ferme N. J. Pagé inc., 2) les Entreprises Adam 2000 inc., 3) la Ferme Gross et fils inc., 4) la 9228-5063 Québec inc., et 5) la Ferme Théobald Brisson.

La série d'ateliers avait plusieurs objectifs, au-delà de ce projet de recherche : la restitution des résultats préliminaires de l'étude auprès des partenaires de terrain, la co-construction de l'outil, la collecte de données, etc. Nous avons eu l'opportunité d'y présenter les résultats préliminaires du projet et l'ACV d'une des stratégies d'ÉC identifiées à la fin de ces deux étapes afin que le type de livrable du projet soit clair pour les producteurs.

À la suite de cette présentation, plusieurs discussions ont eu lieu avec chacun des producteurs pour échanger sur les enjeux liés à l'application des principes d'ÉC et pour valider que les stratégies d'ÉC identifiées pouvaient être réalistes et pertinentes pour eux en tenant compte de leur réalité de terrain.

3.1.3.2 Sous objectif 2 : Analyse de la performance environnementale des stratégies d'EC identifiées

3.1.3.2.1 Modélisation du cycle de vie des stratégies d'EC identifiées

Les stratégies d'ÉC identifiées à la suite du sous-objectif 1 seront analysées grâce à l'étude de cas déjà réalisée (CIRAIG et Groupe AGÉCO, 2015), dans laquelle des modifications seront apportées pour tenir compte des nouveaux scénarios proposés. Les seules modifications apportées à cette étude ont été celles requises pour intégrer les modules d'approvisionnement de stratégies circulaires retenues pour fin d'analyse.

Étant donné que les stratégies seront seulement identifiées dans la section Résultats, la méthodologie concernant ces scénarios sera détaillée dans cette section.

3.1.3.2.2 Fonction et unité fonctionnelle

En ACV, les produits sont évalués/comparés sur la base de leurs fonctions. La fonction à l'étude est de « produire des grains de maïs prêts à être commercialisés » à fin d'alimentation animale ou humaine, voire d'usage industriel. L'unité fonctionnelle (UF) est quant à elle une représentation quantitative de la fonction. En ACV, les émissions émises et les ressources consommées, à la source des impacts environnementaux, sont rapportées à cette UF. L'UF définie est « la production de 1 kg de maïs-grain commercial, séché, à la ferme québécoise située dans la région de Lanaudière, en 2021 ».

Bien que l'année de référence choisie soit 2021, les différents paramètres du système de base (représentatifs de 2010-2013) n'ont pas été modifiés.

3.1.3.2.3 Traitement des fonctions secondaires et règles d'imputation

Le principe de l'ACV est d'analyser des systèmes sur la base de leurs fonctions. Cependant, un système de produit peut posséder plusieurs fonctions qui ne sont pas nécessaires à l'UF. Les systèmes ou processus multifonctionnels génèrent plus d'un produit ou participent au recyclage de produits intermédiaires. Ils doivent donc être considérés avec précaution.

Lorsqu'un processus génère plus d'un produit avec des fonctions différentes, soit ses impacts doivent être alloués entre les produits sortants, soit les frontières du système évalué doivent être étendues afin d'y inclure le cycle de vie de la/des fonction(s) supplémentaire(s). Les normes ISO stipulent que l'allocation devrait, dans la mesure du possible, être évitée soit en subdivisant le système afin de le rendre monofonctionnel (de préférence), soit en procédant à une extension des frontières (ISO, 2006b, article 4.3.4.2). Toutefois, cette dernière est une opération longue et complexe qui n'est pas toujours possible lorsque les données disponibles à cette fin et/ou les ressources du projet sont limitées. Une approche adéquate et rigoureuse est alors requise pour procéder à l'allocation des impacts.

Dans le cadre de cette étude, les fonctions secondaires identifiées sont les suivantes :

- 1) Certains bénéfices apportés pour la culture annuelle suivante dans un contexte de rotation des cultures (nutriments, services écosystémiques);
- 2) Le traitement de déchets associé à l'utilisation des matières organiques utilisées dans les stratégies de circularité.

Ces deux fonctions ne sont pas considérées dans les résultats de l'étude.

L'approche *cut-off* est utilisée. Elle considère que les matières recyclables (matières organiques utilisées dans les stratégies de circularité) sont disponibles sans contrainte pour les processus de recyclage, et que les matériaux secondaires (compost, fumier, biogaz) ne supportent que les impacts des processus de recyclage (compostage, digestion anaérobie). Étant donné l'objectif de cette étude de se pencher sur les impacts des stratégies de circularité, cette approche est testée dans les analyses de sensibilité par l'inclusion du traitement évité par l'implantation des stratégies de circularité.

3.1.3.2.4 Frontières du système

Les frontières du système servent à identifier les étapes, processus et flux élémentaires en ACV. Elles incluent toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude et, donc, nécessaires à la réalisation des fonctions étudiées. Les frontières du système générique considérées pour la production de maïs-grain incluent la production des entrants de matière (p. ex., fertilisants, pesticides, tracteurs et machinerie) et d'énergie (p. ex., diesel, propane pour le séchage), et toutes les étapes d'avant-plan ayant lieu sur la ferme (p. ex., opérations culturales) jusqu'à la sortie des grains séchés de la ferme.

Bien que l'unité fonctionnelle sélectionnée soit pour l'année 2021, l'étude sur laquelle elle se base constitue une ACV représentative du contexte québécois de la production de grains commerciaux sur la période 2010-2013. Il est estimé que la production n'a pas évolué significativement lors des dernières années.

De la même façon, la région de la Montérégie a été choisie dans l'étude d'origine pour faciliter la contextualisation géographique, car elle est la région où la culture de maïs est majoritairement localisée.

Cependant, dans cette étude, nous avons choisi la région de Lanaudière. Pour cet aspect-là, il est estimé aussi que la production est similaire dans les deux régions.

Le système de référence, qui consiste en la production moyenne de maïs-grain séché tel qu'il est modélisé dans l'étude du CIRAIQ et du Groupe AGÉCO (2015), est comparé avec des solutions de production qui adopteront des stratégies de circularité identifiées à l'étape 1.

Le système de référence se caractérise par un apport mixte d'engrais minéraux et organiques comme suit :

- *Apports* : mixtes d'engrais minéraux (84,4 % du N appliqué) et d'engrais organiques (15,6 % du N appliqué);
- *Engrais minéraux* : ammoniac anhydre (82-0-0), en N; DAP (18-46-0), en N; MAP (11-52-0), en N; nitrate d'ammonium (27,5-0-0), en N; solution azotée (32-0-0), en N; sulfate d'ammonium (21-0-0), en N; urée (46-0-0), en N.

- *Engrais organiques* : lisier de bovin de boucherie, en N; fumier de bovin de boucherie, en N; lisier de bovin laitier, en N; fumier de bovin laitier, en N; lisier de porc, en N; lisier et fumier de volaille, en N. Pour chaque stratégie, plusieurs scénarios d’approvisionnement et niveaux d’intensité sont testés en fonction de ce qui a été déterminé pour chaque stratégie d’ÉC.

3.1.3.2.5 Sources des données d’inventaire du cycle de vie (ICV)

Le détail des sources de données peut être consulté dans l’étude originale (CIRAIG et Groupe AGÉCO, 2015). La base de données d’arrière-plan a été mise à jour par rapport à l’étude originale, étant donné que ecoinvent v3.8 est la base de données utilisée. Les principales hypothèses utilisées pour modéliser les différents systèmes sont : a) Le rendement n’est pas affecté par la modification de la source en azote, la dose appliquée restant la même; b) Les résidus utilisés dans les différentes stratégies de circularité sont considérés comme enfouis.

3.1.3.2.6 Évaluation des impacts environnementaux

La méthodologie d’évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) IMPACT World+ 2.0 (Bulle *et al.*, 2019) sera utilisée pour cette étude en raison du caractère complet des catégories de problèmes incluses, de la mise à jour fréquente des facteurs de caractérisation et de l’agrégation des catégories de problèmes en aires de protection (ressources, qualité des écosystèmes et santé humaine). Cette agrégation simplifie la compréhension des résultats par des non-initiés à l’ACV, en plus de permettre une évaluation rapide des principaux enjeux environnementaux potentiels associés aux systèmes à l’étude, et facilite la communication des résultats et la prise de décision.

Étant donné que c’est sur la base de cette catégorie d’impact que les stratégies d’ÉC ont été identifiées, l’indicateur de *midpoint Changement climatique*, qui est normalement inclus dans les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*, est présenté séparément dans un second temps. À côté de ces résultats, les résultats pour les aires de protection sont présentés sans la contribution de cet indicateur.

3.1.3.2.7 Interprétation

Cette dernière phase de l’ACV permet de discuter les résultats obtenus à la suite de l’ÉICV et de les mettre en perspective. Les résultats présentés à la section 3 sont appuyés sur une analyse complète et approfondie des données d’inventaire et de l’ÉICV. Cela comprend notamment des analyses de la qualité des données

d'inventaire, de cohérence et de complétude, ainsi que de sensibilité et de scénarios. La méthodologie employée pour l'analyse et l'interprétation des données est résumée dans les sous-sections qui suivent. Mais, d'abord, une précision est donnée quant à l'analyse de l'inventaire.

Analyse de l'inventaire

En accord avec la norme ISO 14044 *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices*, l'ÉICV constitue une interprétation des résultats de l'inventaire du cycle de vie en ayant pour but de mieux en comprendre la portée environnementale. Une analyse de contribution permet également d'identifier les flux d'inventaire qui sont à la source des impacts prédominants.

Évaluation de la qualité des données d'inventaire

La fiabilité des résultats et des conclusions de l'ACV dépend de la qualité des données d'inventaire utilisées. Il est donc important de s'assurer que ces données respectent certaines exigences spécifiées en accord avec l'objectif de l'étude. Selon la norme ISO, les exigences relatives à la qualité des données devraient au minimum en assurer la validité, ce qui est équivalent ici à leur représentativité quant à l'âge, à la provenance géographique et à la performance technologique. Ainsi, les données utilisées devraient être représentatives de la période définie par l'unité fonctionnelle (2021) et du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les systèmes à l'étude (le Québec, plus précisément la région de Lanaudière).

La norme ISO 14044 stipule que les exigences relatives à la qualité des données doivent couvrir les éléments suivants : a) les facteurs temporels; b) la géographie; c) la technologie; d) la fidélité; e) la complétude; f) la représentativité; g) la cohérence; h) la reproductibilité; i) les sources et j) l'incertitude des informations.

Les éléments a), b), c), f) et i) sont couverts par les critères de fiabilité et de représentativité. Le critère relatif à la reproductibilité (h) est couvert par la transparence complète des choix effectués dans le cadre de l'étude. Les critères de fidélité (d) et d'incertitude (j) ont été traités par le biais des analyses d'incertitude. En ce qui a trait à la complétude (e), définie par la norme ISO (année) comme le « pourcentage des flux mesurés et estimés » (p. x), il est pratiquement impossible d'évaluer ce pourcentage puisque le nombre de flux totaux réels est inconnu. Finalement, pour le critère de cohérence (g), les méthodologies de construction/collecte des données employées dans le cas des données de la baseecoinvent peuvent être considérées comme cohérentes.

Analyse de sensibilité

Plusieurs paramètres utilisés lors de la modélisation des systèmes présentent une certaine incertitude, plus particulièrement liée aux hypothèses et aux modules de données génériques employés. Les résultats obtenus sont liés à ces paramètres et leur incertitude est transférée aux conclusions tirées. À partir des principaux

processus/paramètres contributeurs identifiés par l'analyse de qualité des données, une analyse de sensibilité a été effectuée sur les paramètres suivants :la méthode d'ÉICV; la distance d'approvisionnement des matières résiduelles impliquées dans les stratégies d'ÉC analysées; et l'inclusion du traitement évité par l'implantation des stratégies de circularité.

3.1.3.3 Sous-objectif 3 : Recommandations

À la lumière des principaux contributeurs aux impacts identifiés, des résultats de l'ACV, de l'influence des différents paramètres qui émergent à la suite de l'ACV et de la réalité de terrain (situation géographique, distance des différentes sources de matières secondaires, etc.),des recommandations concrètes ont été énoncées pour assurer un transfert des connaissances aux producteurs parce que les résultats bruts de l'ACV ne sont pas facilement interprétables tels quels par un non-expert.

3.1.4 Résultats

3.1.4.1 Sous-objectif 1 : Identification des stratégies pertinentes d'ÉC

3.1.4.1.1 Étape 1 : Principaux contributeurs au changement climatique de la production céréalière en Lanaudière

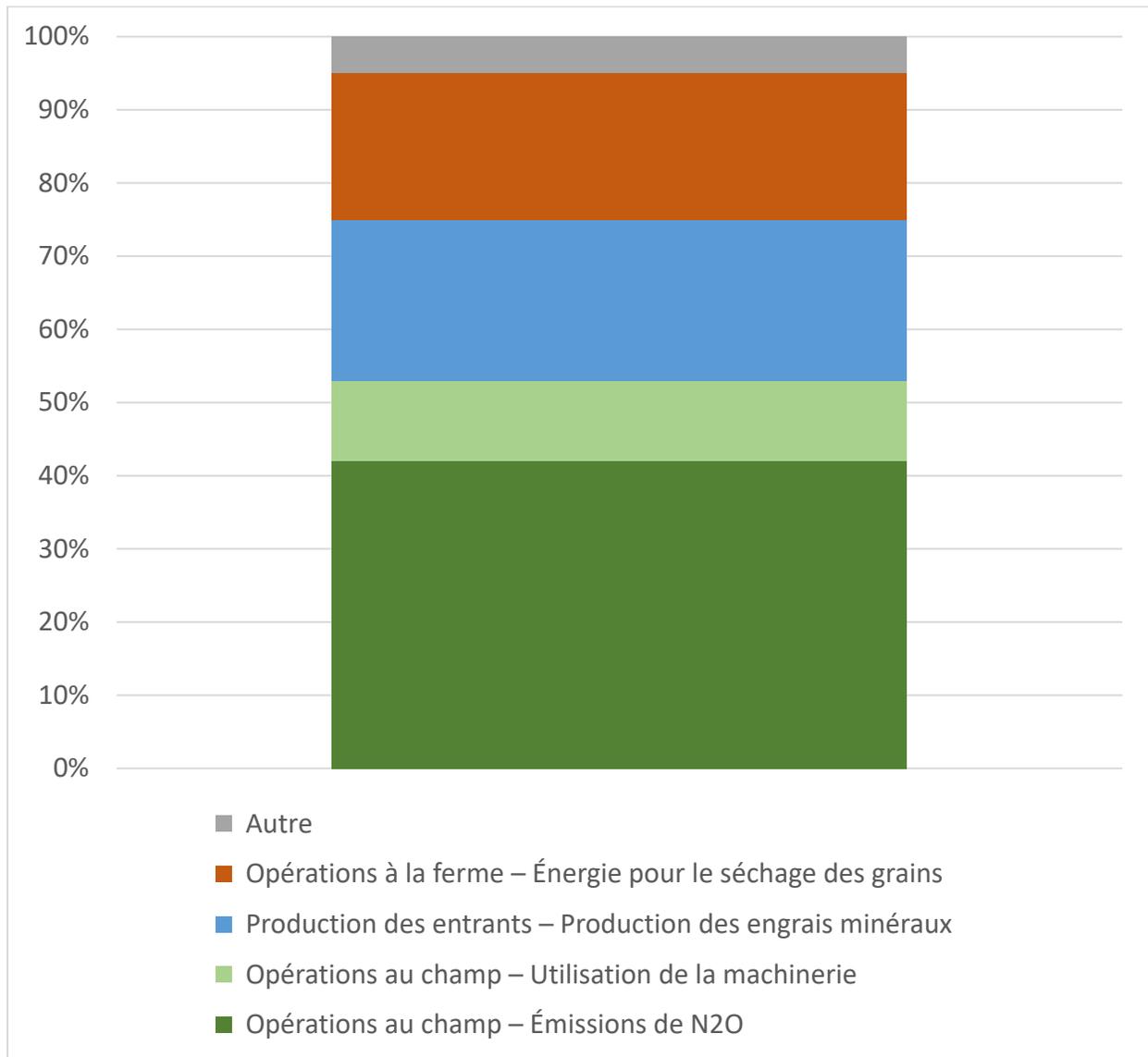
En ce qui concerne l'empreinte carbone du maïs grain, les points chauds qui émergent de l'étude (CIRAIG et Groupe AGÉCO, 2015) sont les suivants (voir figure 1) : a) les opérations au champ (53 %); b) la production des entrants (22 %); et c) les opérations à la ferme (20 %).

Les opérations au champ sont dominées par les émissions d'oxyde nitreux (N₂O) issues de la décomposition des engrais minéraux. Ces émissions représentent à elles seules 42 % des impacts totaux. Elles incluent également l'utilisation de la machinerie (travail du sol, semis, fertilisation et traitement phytosanitaire) et les autres émissions découlant de l'application des engrais minéraux et organiques et des pesticides qui, ensemble, totalisent 11 % des impacts. Concernant la production des entrants, la production d'engrais minéraux génère l'essentiel des impacts observés.

Enfin, les émissions de GES des opérations à la ferme sont principalement dues au séchage des grains et sont causées quasi uniquement par la combustion du gaz naturel utilisé pour le séchage.

Ces éléments pointent vers la nécessité de prioriser des stratégies innovantes pour la fertilisation et pour le séchage des grains.

Figure 3.1 : Principaux contributeurs au changement climatique de la production de maïs au Québec (adapté de CIRAIG et Groupe AGÉCO, 2015)



3.1.4.1.2 Étape 2 : Stratégies d'ÉC potentiellement pertinentes pour réduire l'empreinte carbone de la production de grains

À la lumière des stratégies existantes d'ÉC en agriculture et des données compilées dans le cadre de l'étude de caractérisation de la filière bioalimentaire dans Lanaudière réalisée par le CTTÉI (2022), les stratégies circulaires envisageables pour la fertilisation sont les suivantes : a) l'utilisation de fumiers et/ou lisiers d'animaux comme MRF; b) l'utilisation de résidus de végétaux comme fertilisants; c) la fertilisation des terres avec les eaux usées traitées; d) l'utilisation des déchets alimentaires comme MRF; e) l'utilisation des boues de papetières comme MRF; et f) l'utilisation du lactosérum pour fertilisation des champs.

Les stratégies circulaires possibles pour le séchage des grains sont les suivantes : a) la production de biogaz à partir de fumier et son utilisation pour le séchage des grains ; b) la production de biogaz à partir de boues de station d'épuration et son utilisation pour le séchage des grains ; et c) le recyclage et la réutilisation des surplus énergétiques à la ferme pour le séchage des grains.

3.1.4.1.3 Stratégies les plus pertinentes pour les producteurs céréaliers partenaires

D'une façon générale, les producteurs ayant participé aux consultations se méfient de certaines MRF : ils craignent de contaminer leur sol et leurs cultures. À titre d'exemple, un producteur a expérimenté l'utilisation des boues de papetières comme MRF pendant plusieurs années et a relaté, pendant l'atelier, qu'au fur et à mesure, ses productions céréalières se desséchaient et que ses rendements étaient très réduits. Une analyse détaillée des organismes vivants dans son sol a mis en lumière que les champignons n'y étaient présents qu'à 20 %, contre 80 % pour les bactéries (un ratio de 50-50 étant observé les années précédentes). Le producteur a donc stoppé l'utilisation des boues de papetières et tente depuis d'améliorer la santé de son sol.

Les producteurs sont très sensibles à de tels facteurs pouvant jouer sur la rentabilité de leurs cultures et sur la durabilité du système écologique, car leur santé financière en dépend : une mauvaise récolte a des répercussions très importantes.

D'autre part, ils nous ont fait part du fait qu'ils ne choisiront pas les mêmes pratiques selon que les céréales sont produites pour une alimentation humaine ou animale, et selon que leurs productions sont biologiques ou non. Ils ont donc chacun une « classification » des MRF en fonction de leur provenance, du secteur émetteur et du risque de contamination qu'ils estiment « a priori ». Certains producteurs ne veulent s'approvisionner qu'auprès d'autres producteurs agricoles (p. ex., avec les fumiers de poules). D'autres considèrent comme acceptable l'utilisation de compost issu de la filière résidentielle, voire industrielle, selon le type d'industrie. Les producteurs intéressés estiment que le compost étendu peut remplacer environ 10 % de fertilisants azotés et que son action est aussi bénéfique pour stabiliser le sol.

D'une façon générale, l'atelier a mis en lumière que de mauvaises expériences vécues par des producteurs avec l'utilisation de certaines MRF peuvent devenir un écueil à l'usage des autres MRF plus globalement.

Il y a eu moins de préoccupations en ce qui concerne la source des matières secondaires dans le cas de la production de biogaz pour le séchage puisque la santé du sol n'est pas en jeu.

À la lumière des échanges au cours de l'atelier, nous avons priorisé les stratégies suivantes, perçues comme plus sécuritaires et acceptables par les producteurs céréaliers :

- *Stratégie 1* : Épandage de MRF d'origine agricole pour remplacer les fertilisants azotés ;
- *Stratégie 2* : Utilisation de compost pour remplacer les fertilisants azotés ;
- *Stratégie 3* : Utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains.

3.1.4.2 Sous-objectif 2 : Analyse de la performance environnementale des stratégies d'ÉC identifiées

3.1.4.2.1 Définition des scénarios d'ACV correspondant aux trois stratégies d'ÉC identifiées

Dans cette section, les scénarios d'ACV correspondant aux trois stratégies pertinentes retenues sont définis, puis analysés et comparés au statu quo.

Stratégie 1 : Plus forte part d'engrais organiques (MRF) dans les apports fertilisants

Dans le cas des stratégies 1 et 2, différents scénarios de fertilisation sont étudiés :

Scénario d'agriculture biologique [Sc. 1 bio (N)] :

- Seuls les apports en N sont contraints;
- 100 % de la charge fertilisante en N de référence est appliquée au moyen des seuls engrais organiques de l'étude de référence (fumiers et lisiers) et dans les mêmes proportions entre eux que dans le scénario de référence;
- La distance d'approvisionnement est considérée la même (10 km – cas de fermes avoisinantes).

Scénario d'agriculture très raisonnée [Sc. 2 très raisonnée (N)] :

- Seuls les apports en N sont contraints;
- 80 % de la charge fertilisante de référence est appliquée au moyen des seuls engrais organiques de l'étude de référence;
- Les proportions entre engrais organiques sont les mêmes que celles du scénario de référence;
- Le complément (20 %) est apporté par les mêmes engrais minéraux et dans les mêmes proportions entre eux que le scénario de référence.

Scénario d'agriculture raisonnée [Sc. 3 raisonnée (N)] :

- Seuls les apports en N sont contraints;
- 50 % de la charge fertilisante de référence est appliquée au moyen des seuls engrais organiques de l'étude de référence;
- Les proportions entre engrais organiques sont les mêmes que celles du scénario de référence;

– Le complément (50 %) est apporté par les mêmes engrais minéraux et dans les mêmes proportions entre eux que le scénario de référence.

Scénario d'agriculture intensive [Sc. 4 intensive (N)] :

– Seuls les apports en N sont contraints;

– 100 % de la charge fertilisante de référence est appliquée au moyen des seuls engrais minéraux de l'étude de référence, et dans les mêmes proportions entre eux que le scénario de référence.

En ce qui concerne les sources de données d'inventaire, les principales hypothèses utilisées pour modéliser les scénarios de la stratégie 1 sont les suivantes :

- La distance d'approvisionnement des MRF reste la même, quelle que soit la quantité appliquée²;
- La part d'azote des différentes MRF disponible la première année n'est pas affectée par la dose appliquée;
- Le rendement n'est pas affecté par la modification de la source en N, la dose appliquée restant la même.

Stratégie 2 : Utilisation de compost dans les apports fertilisants

En ce qui concerne les sources de données d'inventaire, les principales hypothèses utilisées pour modéliser les scénarios de la stratégie 2 sont les suivantes :

- La distance d'approvisionnement des MRF reste la même, quelle que soit la quantité appliquée²;
- La part d'azote des différentes MRF disponible la première année n'est pas affectée par la dose appliquée;
- Le rendement n'est pas affecté par la modification de la source en N, la dose appliquée restant la même;
- Le compostage de matières résiduelles est fait de façon industrielle. La composition en NPK du compost résultats est de 1-1-1 et reste constante pour tous les cas. La quantité maximale de compost appliquée est de 30 t/ha (matière humide), avec un taux de conversion de matières organiques en compost de 0,5 kg compost par kg de matières organiques compostées. Puisque cette quantité n'est pas suffisante pour combler les besoins des plantes en nutriments, le reste est compensé par des MRF ou par des fertilisants chimiques.

Stratégie 3 : Utilisation de biogaz pour le séchage des grains

Dans le cas de la stratégie 3, quatre matières résiduelles pour la production du biogaz sont étudiées comme scénarios : a) des huiles usées; b) des boues de station d'épuration d'eaux usées; c) du fumier; et d) un mélange de déchets organiques incluant des déchets de table, des déchets agricoles et/ou des résidus de jardins et parcs.

En ce qui concerne les sources de données d'inventaire, les principales hypothèses utilisées pour modéliser les scénarios de la stratégie 3 sont les suivantes :

- Le biogaz n'est utilisé que pour le séchage du grain. Il est produit à partir de déchets hors ferme;
- Pour toutes les options étudiées, on utilise l'approche *cut-off*, ce qui implique l'utilisation de déchets sans charge environnementale associée, mais la charge associée au processus de production du biogaz (digestion anaérobie) y est incluse;

Le digestat résultant de la production de biogaz est considéré comme enfoui.

3.1.4.2.2 Évaluation de la performance environnementale des stratégies identifiées

Voici les principales conclusions de l'analyse de la performance environnementale des trois stratégies identifiées (voir annexe 1 pour une analyse détaillée).

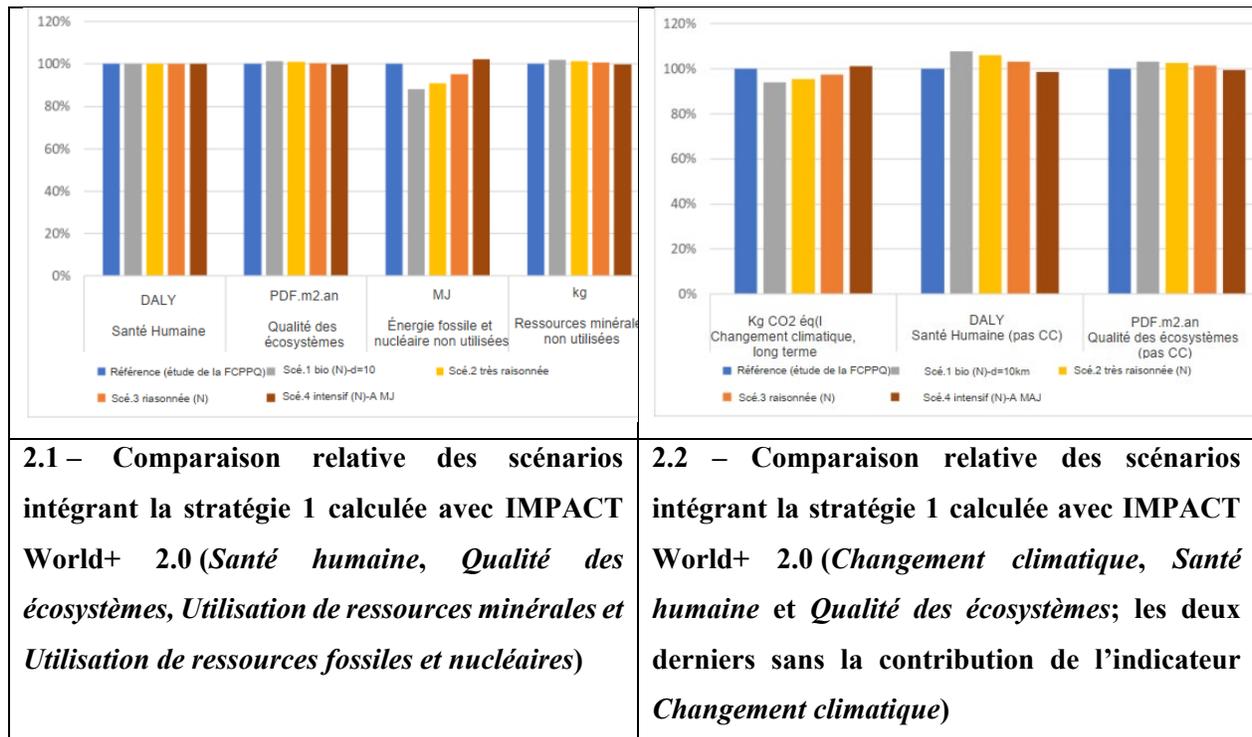
Stratégie 1

La figure 2 compare la performance environnementale des scénarios intégrant la stratégie 1 (remplacement des engrais par des MRF) avec celle du cas de référence.

L'indicateur *Changement climatique* considéré seul (voir figure 2.2) met en lumière une réduction d'impacts par rapport au scénario de référence de 2 % à 6 % pour les scénarios avec une utilisation accrue d'engrais organiques et de 6 % dans le cas où tout l'engrais appliqué est d'origine organique [Sc. 1 bio (N)]. Cette réduction est due essentiellement à la diminution des impacts de la production des engrais minéraux dans les scénarios où ils sont remplacés par des engrais organiques.

Cependant, quand on modélise les impacts de l'indicateur *Changement climatique* sur les dommages et qu'on l'intègre aux dommages sur la santé humaine et sur la qualité des écosystèmes (voir figure 2.1), cette performance intéressante de l'empreinte carbone est contrebalancée. D'une part, les émissions d'ammoniac augmentent – avec l'utilisation des MRF, ce qui contribue à la fois aux dommages sur la santé humaine (problèmes respiratoires) et sur la qualité des écosystèmes (acidification). D'autre part, le transport augmente. Bien que l'approvisionnement en MRF soit local, leur teneur en azote est plus faible que celle des engrais minéraux, donc le volume à transporter augmente. Il n'y a donc pas de réduction significative des dommages sur ces deux aires de protection

Figure 3.2 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 1 calculée avec IMPACT World+ 2.0



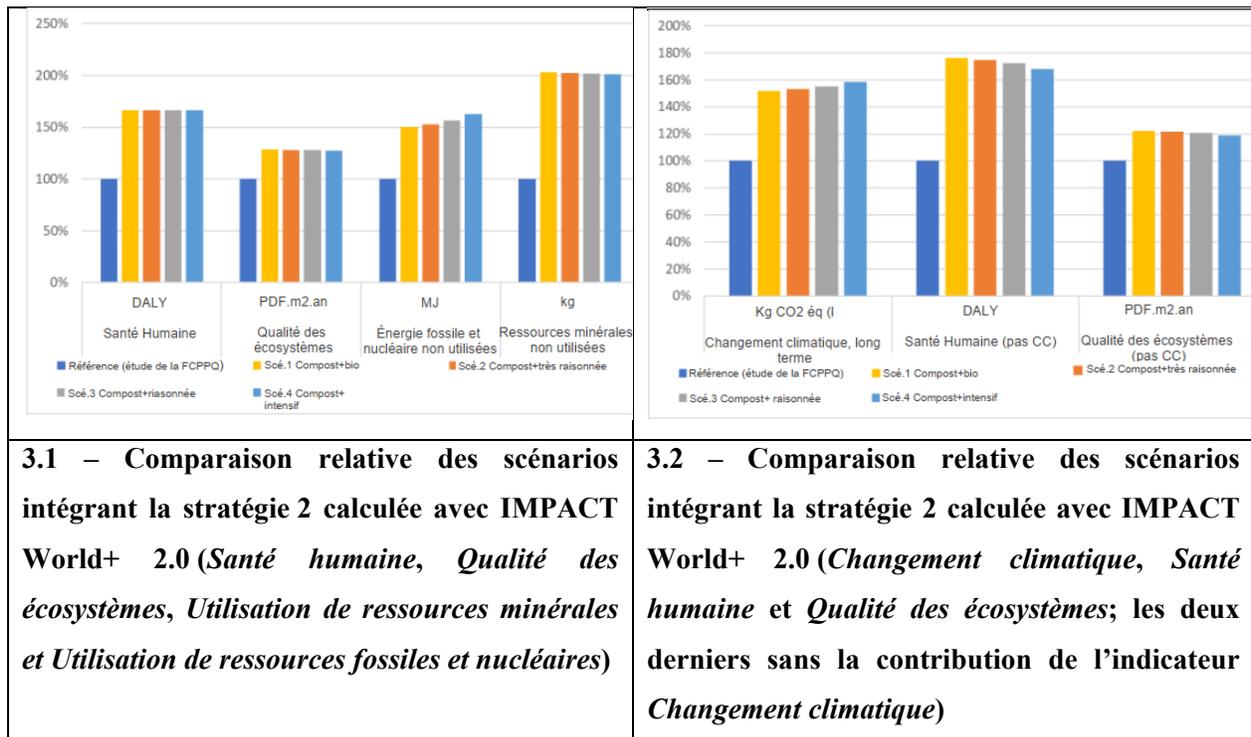
Stratégie 2

La figure 3 compare la performance environnementale des scénarios intégrant la stratégie 2 (utilisation de compost) avec celle du cas de référence.

L'indicateur *Changement climatique* considéré seul met en lumière une augmentation de 52 % à 58 % des impacts par rapport au scénario de référence. L'augmentation est due à la fois au processus de compostage lui-même (qui émet du méthane) et au transport accru de matières organiques. (Le compost a une teneur encore plus faible en azote que les MRF, donc deux transports sont à prévoir : un premier de la source vers le lieu de compostage, puis un second du lieu de compostage vers le champ.) La teneur en nutriments du compost étant très faible, les quantités d'engrais minéraux substituées (et la réduction des émissions de GES associées) sont très faibles et ne compensent pas les impacts générés par la production et par le transport du compost.

Cette augmentation des impacts pour la catégorie *Changement climatique* se répercute directement sur les dommages sur la *Santé humaine* et sur la *Qualité des écosystèmes*.

Figure 3.3 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 calculée avec IMPACT World+ 2.0

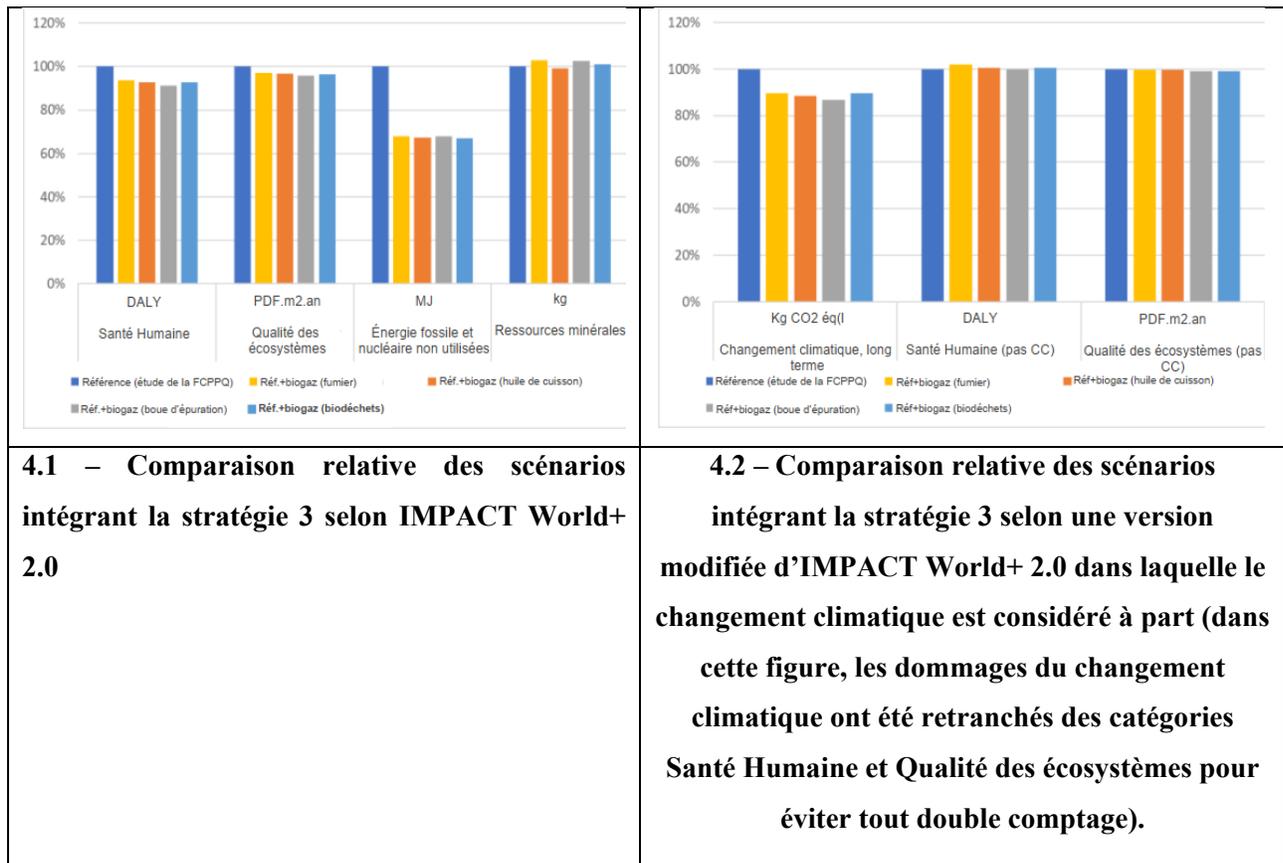


Stratégie 3

La figure 4 compare la performance environnementale des scénarios intégrant la stratégie 3 (utilisation de biogaz pour le séchage des grains) avec celle du cas de référence. Les scénarios représentent différents déchets utilisés pour la production du biogaz : fumiers et lisiers, huiles usées, boues de station d'épuration d'eaux usées et déchets verts.

L'indicateur *Changement climatique* considéré seul met en lumière une réduction de 10 % à 13 % des impacts par rapport au scénario de référence, ce qui est principalement dû aux émissions de CO₂ biogénique à la place du CO₂ fossile. Les émissions de GES lors de la digestion anaérobie et la quantité de matières nécessaire pour la production du biogaz sont les paramètres différenciateurs entre les différents scénarios avec biogaz. Les boues de station d'épuration constituent la ressource avec le score d'impact le plus faible. Cette diminution des impacts pour la catégorie *Changement climatique* se répercute directement sur les dommages sur la *Santé humaine* et sur la *Qualité des écosystèmes*.

Figure 3.4 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 3 calculée avec IMPACT World+ 2.0



3.1.4.2.3 Qualité des données d'inventaire

La qualité des données d'inventaire a été évaluée de façon qualitative en considérant deux critères : la fiabilité (niveau de confiance dans les quantités des flux de matière, d'énergie et d'émissions utilisés pour la modélisation des systèmes) et la représentativité (niveau de confiance dans les processus utilisés pour la modélisation). L'évaluation de chaque élément des systèmes étudiés a été comparée à la contribution aux impacts desdits éléments.

À partir de ces analyses, il a été possible de constater qu'advenant qu'une ACV détaillée soit effectuée, certaines données jugées comme étant de qualité moyenne ou faible ne devront pas faire l'objet d'effort supplémentaire de collecte puisque leur influence sur le système serait faible et que l'effort prodigué ne modifierait pas les résultats.

Les principales données à améliorer pour augmenter la robustesse des résultats sont liées aux processus/paramètres suivants :

- les processus de compostage et leurs émissions associées;
- la prise en compte des voies de gestion/valorisation déplacées pour les déchets utilisés dans les différentes stratégies.

Certains de ces processus, jugés particulièrement influents sur les résultats, ont été testés en analyse de sensibilité.

3.1.4.2.4 Analyses de sensibilité

Les limites de ces analyses sont essentiellement liées au caractère incomplet et plus ou moins valide de l'inventaire et des hypothèses liées aux frontières du système. En effet, certains processus initialement inclus dans le cycle de vie ont dû être estimés, principalement par manque d'informations primaires les concernant. L'inclusion et/ou l'augmentation de la validité de certains processus dans l'inventaire modifierait assurément les résultats de l'analyse. Il est donc important d'évaluer dans quelle mesure ces modifications pourraient inverser les conclusions obtenues, en particulier si les processus exclus ou estimés sont différents pour les options comparées et/ou concernent des éléments qui semblent avoir le plus d'influence sur les résultats. Aussi, lors de l'établissement des frontières et de l'inclusion de la multifonctionnalité, certains choix peuvent affecter les conclusions de l'étude.

Trois analyses de sensibilité ont été effectuées pour vérifier l'influence des hypothèses de modélisation sur les conclusions de l'étude. Nous résumons ici les principales conclusions de ces analyses (voir annexe 2 pour des analyses de sensibilité détaillées).

Analyse de sensibilité 1 : méthode d'évaluation des impacts de cycle de vie (méthode ReCiPe)

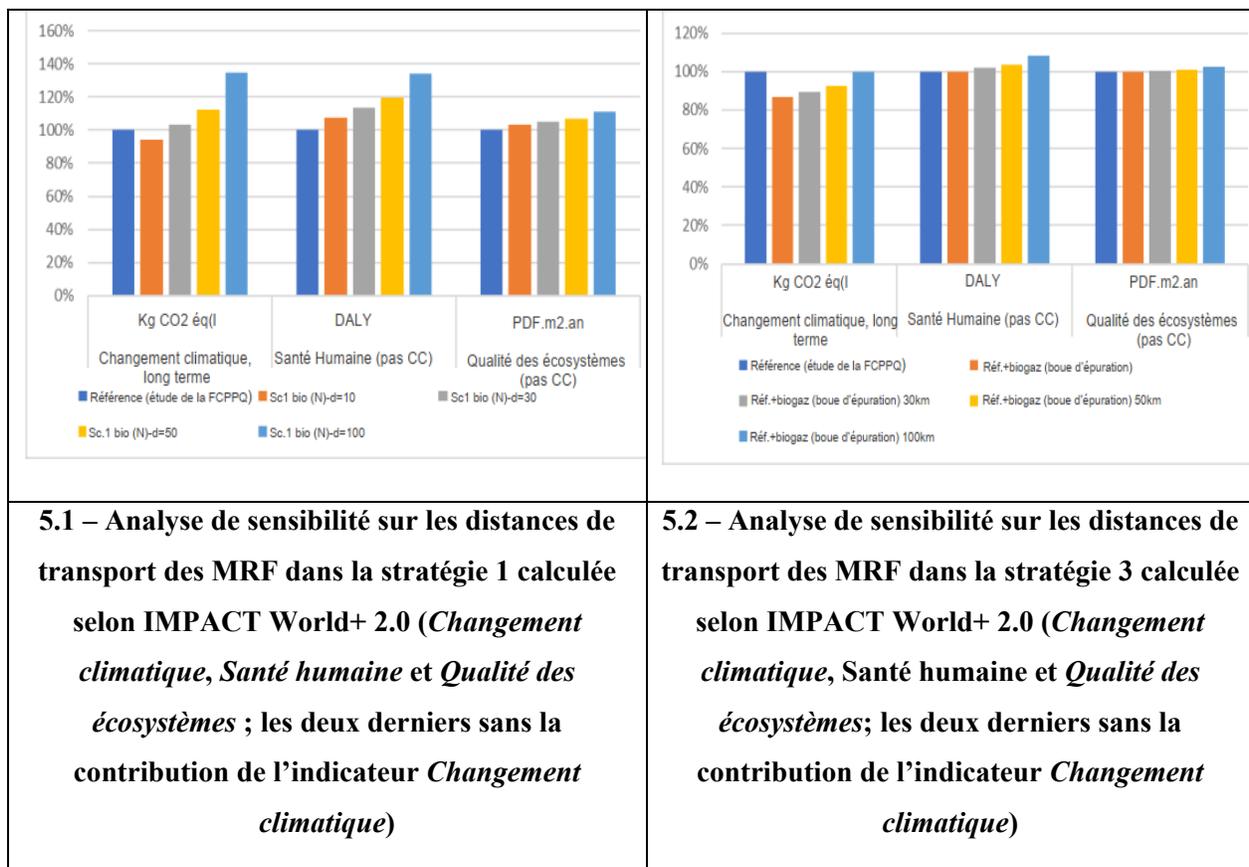
Les résultats obtenus par la méthode ReCiPe confirment généralement ceux obtenus avec IMPACT World+ 2.0 et attestent de leur robustesse.

Analyse de sensibilité 2 : distance d'approvisionnement des déchets (stratégies 1 et 3)

Deux des données clés lors de l'utilisation des MRF ainsi que de la production de compost et de biogaz sont l'origine des déchets et la distance parcourue jusqu'au lieu de transformation et du lieu de transformation jusqu'au champ. Afin de tester la sensibilité de ces paramètres sur les conclusions, plusieurs distances (30, 50 et 100 km, au lieu de 10 km) ont été testées pour les stratégies 1 et 3. (La stratégie 2 a été exclue puisque les conclusions ne changeront pas avec une augmentation de la distance.)

La figure 5.1 montre les résultats de l'analyse de sensibilité pour le scénario 1 (en se concentrant sur le scénario d'agriculture biologique, qui a la meilleure performance environnementale) quand la distance de transport augmente. À partir de 30 km, le score du scénario d'agriculture biologique égalise celui du scénario de référence pour l'indicateur *Changement climatique* (qui était le seul – hormis l'indicateur *Utilisation de ressources minérales et Utilisation de ressources fossiles et nucléaires*– pour lequel le scénario 1 performait mieux que le scénario de référence). Pour la stratégie 3 (scénario avec biogaz à partir de boues de station d'épuration), la figure 5.2 montre qu'à partir de 100 km, le score égalise celui du scénario de référence pour l'indicateur *Changement climatique*. Cette analyse de sensibilité permet de montrer l'importance d'un approvisionnement le plus local possible.

Figure 3.5 : Analyse de sensibilité sur les distances de transport des MRF dans les stratégies 1 et 3



Analyse de sensibilité 3 : inclusion du traitement évité par l'implantation des stratégies de circularité

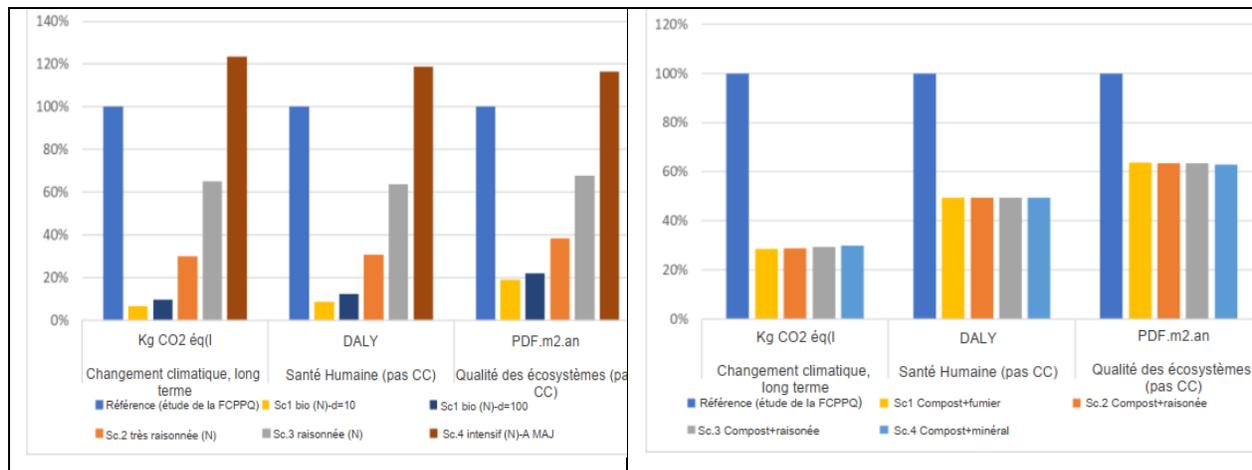
Étant donné le contexte d'ÉC de cette étude, il faut considérer que les déchets qui entrent dans des boucles de circularité vont éviter d'être enfouis ou stockés. L'hypothèse initiale considère les déchets sans impacts et ne tient donc pas compte des impacts de traitement en fin de vie évités.

Dans cette analyse de sensibilité, nous incluons dans le système la fonction de traitement de déchets évités. (Par exemple, dans la stratégie 3, le scénario de référence n'inclut pas seulement la production de 1 kg de maïs, mais aussi la gestion des déchets utilisés dans la production de biogaz, gestion qui sera évitée grâce à la stratégie de circularité.)

Dans tous les cas, la pire situation est choisie pour modéliser la gestion des déchets, c'est-à-dire que les déchets sont considérés comme gérés en fin de vie sans valorisation (enfouis ou stockés). Dans le cas des MRF valorisées dans la stratégie 1, on considère que les fumiers et lisiers sont stockés par lagunage ou dans des puits secs. Les données utilisées pour la modélisation ainsi que les technologies utilisées proviennent de la World Food Database (Nemecek et collab., 2015). Celles utilisées pour la modélisation de la gestion des déchets organiques dans le cas du scénario 2 ainsi que les technologies utilisées proviennent de la base ecoinvent.

La figure 6 montre les résultats de l'analyse de sensibilité pour les trois scénarios. La prise en compte du traitement des déchets évités grâce aux stratégies de circularité modifie complètement les conclusions de l'étude et rend l'ensemble des stratégies de circularité bien plus performantes, par rapport à ce qui a été présenté dans la section 3.2.2. Cette analyse illustre l'importance d'inclure la fonction secondaire de gestion de déchets lors de l'analyse des stratégies de circularité et de bien comprendre quel était le sort initial des déchets avant la mise en place de la stratégie. Par exemple, le bénéfice environnemental associé à l'utilisation d'un lisier qui aurait dû être stocké par lagunage aura une meilleure performance environnementale que s'il était destiné à être utilisé comme MRF dans un autre champ.

Figure 3.6 : Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant les stratégies 1, 2 et 3 avec l'inclusion de la fonction de gestion des déchets



<p>6.1 – Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 1 avec l’inclusion de la fonction de gestion des déchets calculée selon IMPACT World+ 2.0 (Changement climatique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes ; les deux derniers sans la contribution de l’indicateur Changement climatique)</p>	<p>6.2 – Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 avec l’inclusion de la fonction de gestion des déchets calculée selon IMPACT World+ 2.0 (Changement climatique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes ; les deux derniers sans la contribution de l’indicateur Changement climatique)</p>																								
<table border="1"> <caption>Data from the bar chart (approximate values)</caption> <thead> <tr> <th>Indicateur</th> <th>Référence (étude de la FCPPQ)</th> <th>Réf+biogaz (fumier)</th> <th>Réf+biogaz (huile de cuisson)</th> <th>Réf+biogaz (boue d'épuration)</th> <th>Réf+biogaz (biodéchets)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Kg CO2 eq/l</td> <td>100%</td> <td>48%</td> <td>95%</td> <td>82%</td> <td>88%</td> </tr> <tr> <td>DALY</td> <td>100%</td> <td>40%</td> <td>95%</td> <td>90%</td> <td>92%</td> </tr> <tr> <td>PDF.m2.an</td> <td>100%</td> <td>55%</td> <td>95%</td> <td>92%</td> <td>92%</td> </tr> </tbody> </table>		Indicateur	Référence (étude de la FCPPQ)	Réf+biogaz (fumier)	Réf+biogaz (huile de cuisson)	Réf+biogaz (boue d'épuration)	Réf+biogaz (biodéchets)	Kg CO2 eq/l	100%	48%	95%	82%	88%	DALY	100%	40%	95%	90%	92%	PDF.m2.an	100%	55%	95%	92%	92%
Indicateur	Référence (étude de la FCPPQ)	Réf+biogaz (fumier)	Réf+biogaz (huile de cuisson)	Réf+biogaz (boue d'épuration)	Réf+biogaz (biodéchets)																				
Kg CO2 eq/l	100%	48%	95%	82%	88%																				
DALY	100%	40%	95%	90%	92%																				
PDF.m2.an	100%	55%	95%	92%	92%																				
<p>6.3 – Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 3 avec l’inclusion de la fonction de gestion des déchets calculée selon IMPACT World+ 2.0 (Changement climatique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes ; les deux derniers sans la contribution de l’indicateur Changement climatique)</p>																									

3.1.4.2.5 Applications et limites de l’ACV

Cette ACV vise à étudier les impacts de l’implantation de différentes stratégies de circularité dans la production de maïs-grain afin de pouvoir donner des recommandations à l’échelle régionale (Lanaudière). Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent être évitées.

Applications

Les résultats pourront être utilisés pour : a) cibler les forces et les faiblesses de chacune des stratégies et identifier les conditions pour lesquelles l’une semble préférable à l’autre; et/ou b) établir les paramètres clés de chaque stratégie.

Limites

Les principales limites pouvant être soulevées concernent :

- La validité des hypothèses relatives au cycle de vie des systèmes étudiés, notamment en ce qui concerne :
 - les quantités et les ratios de compost utilisables comme option aux engrais minéraux;
 - le traitement de la multifonctionnalité des stratégies de circularité;
- La complétude et la validité des données d'inventaire, en particulier :
 - l'utilisation de données secondaires pour modéliser l'implantation des stratégies et la modélisation des moyens de gestion de fin de vie des déchets lors de l'analyse de sensibilité;
 - l'exclusion de certaines émissions associées à l'utilisation de MRF et de compost, notamment de métaux et autres substances répandus dans le sol lors de l'épandage;
 - la complétude et la validité de la méthode d'évaluation des impacts utilisée, entre autres parce qu'elle ne couvre pas toutes les substances inventoriées, ni tous les impacts environnementaux associés aux activités humaines. Notamment, l'interprétation des résultats de la caractérisation ne peut se baser que sur les résultats obtenus, c'est-à-dire sur les substances pour lesquelles il existe, dans la base de données des méthodes, des facteurs de caractérisation qui convertissent les flux élémentaires inventoriés en unités d'indicateurs d'impact et de dommage. Or, plusieurs flux élémentaires n'ont pu être convertis en scores d'impact puisqu'aucun facteur de caractérisation n'était disponible. Ils n'ont donc pas été considérés lors de la phase d'évaluation des impacts potentiels.

Contrairement à l'analyse de risque environnemental conduite dans un contexte réglementaire et qui utilise une approche basée sur le principe de précaution, l'ACV tente de fournir la meilleure estimation possible (Udo de Haes et collab., 2002). En effet, l'ÉICV tente de représenter le cas le plus probable, c'est-à-dire que les modèles utilisés, soient les modèles de transport et de devenir des contaminants dans l'environnement et d'effet toxique sur les récepteurs biologiques, ne tentent pas de maximiser l'exposition et le dommage environnemental (approche du scénario catastrophe), mais bien d'en représenter un cas moyen. Enfin, il convient de rappeler que les résultats de l'ACV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels.

3.1.4.3 Sous-objectif 3 : Recommandations pour les producteurs partenaires du projet

3.1.4.3.1 Éléments clefs à prendre en compte dans la mise en œuvre des stratégies d'ÉC

Ce projet a permis d'identifier les principaux contributeurs aux émissions de GES du cycle de vie de la production des céréales : a) les opérations au champ (émissions de N₂O issues de la fertilisation : 53 %); b) la production des intrants (engrais minéraux : 22 %); et 3) les opérations à la ferme (énergie pour séchage :

20 %). Nous avons proposé des stratégies d'ÉC pour réduire ces émissions. Lors de l'analyse de ces stratégies, certaines conditions importantes ont été mises en lumière pour s'assurer qu'elles constituent une réelle diminution des émissions de GES et des autres impacts environnementaux.

Pour la stratégie 1 : épandage de MRF pour remplacer les fertilisants azotés

Un des déterminants les plus importants de la performance environnementale de cette stratégie de circularité est la distance sur laquelle il faut transporter les MRF. Au-delà d'une certaine distance (qui dépend du type d'engrais organique), tout le bénéfice environnemental de chacune de ces stratégies est perdu. Avec l'hypothèse d'une distance de 10 km, accroître la valorisation d'engrais organiques provenant de fermes environnantes comme matières fertilisantes au détriment des engrais minéraux de synthèse permet une diminution de l'empreinte carbone de 2 % à 6 %, selon le scénario, par rapport au scénario de référence. La réduction d'impacts la plus élevée est observée dans le cas où tout l'engrais appliqué est d'origine organique et provient d'un producteur biologique. A contrario, une production intensive basée sur des apports 100 % minéraux représente une augmentation de l'empreinte carbone de 1 % par rapport au scénario de référence (puisque, dans la situation moyenne actuelle, il y a déjà une certaine proportion d'engrais organiques utilisés). Pour un engrais organique – celui qui a la meilleure performance environnementale –, la distance limite au-delà de laquelle le transport annule tous les bénéfices de l'utilisation de l'engrais organique est de 50 km. Cette distance diminue pour des fertilisants organiques de moindre performance environnementale. Si un producteur choisit cette stratégie, il sera important de choisir une source d'approvisionnement en MRF la plus proche possible de la ferme.

Pour la stratégie 2 : utilisation de compost pour remplacer les fertilisants azotés

Les résultats montrent que les scénarios de compostage présentent de manière générale un score d'impact plus élevé que le scénario de référence. Cela est dû, d'une part, aux émissions de méthane lors du compostage, mais également au fait qu'il faut une quantité très importante d'amendement pour remplacer une petite quantité d'engrais minéraux. Par contre, si on tient compte des impacts évités de la gestion des déchets compostés, la stratégie devient bénéfique pour l'environnement. Cependant, puisqu'il faut des quantités bien plus importantes de compost que d'engrais organiques pour remplacer la même quantité d'engrais synthétique, le transport du compost est un déterminant encore plus important ici. Si un producteur choisit d'adopter cette stratégie, il sera non seulement essentiel de s'approvisionner en compost le plus près possible de la ferme, mais de trouver un fournisseur qui assure la meilleure gestion possible de son procédé de compostage pour limiter les émissions de méthane.

Pour la stratégie 3 : utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains

L'utilisation des boues de station d'épuration ou de fumier et leur digestion anaérobie pour la récupération et l'utilisation du biogaz comme substitut du gaz naturel lors du séchage des grains et du digestat pour l'amendement agricole semblent une stratégie prometteuse afin de réduire l'empreinte carbone de la production de grains. Les résultats indiquent une réduction respective de 13 % et 10 % des GES pour ces deux scénarios. (Les boues de station d'épuration représentent le scénario le plus avantageux). Dans ce cas-là également, la distance à parcourir entre le gisement et la ferme a une influence importante sur la performance environnementale de la stratégie de circularité, mais il faut parcourir une distance plus grande pour annuler le bénéfice environnemental de cette stratégie : plus de 100 km pour le scénario avec du biogaz produit à partir de fumier.

Remarque : Le choix par le producteur d'une stratégie ne l'empêche pas d'en adopter une autre en parallèle. Par exemple, un scénario combinant l'utilisation de fumier et de biogaz à partir de boues de station d'épuration obtenus tous deux dans un rayon de 10 km autour de la ferme réduirait l'empreinte carbone de la production de grains de 25 %.

3.1.4.3.2 Nos recommandations pour la ferme N. J. Pagé Inc.

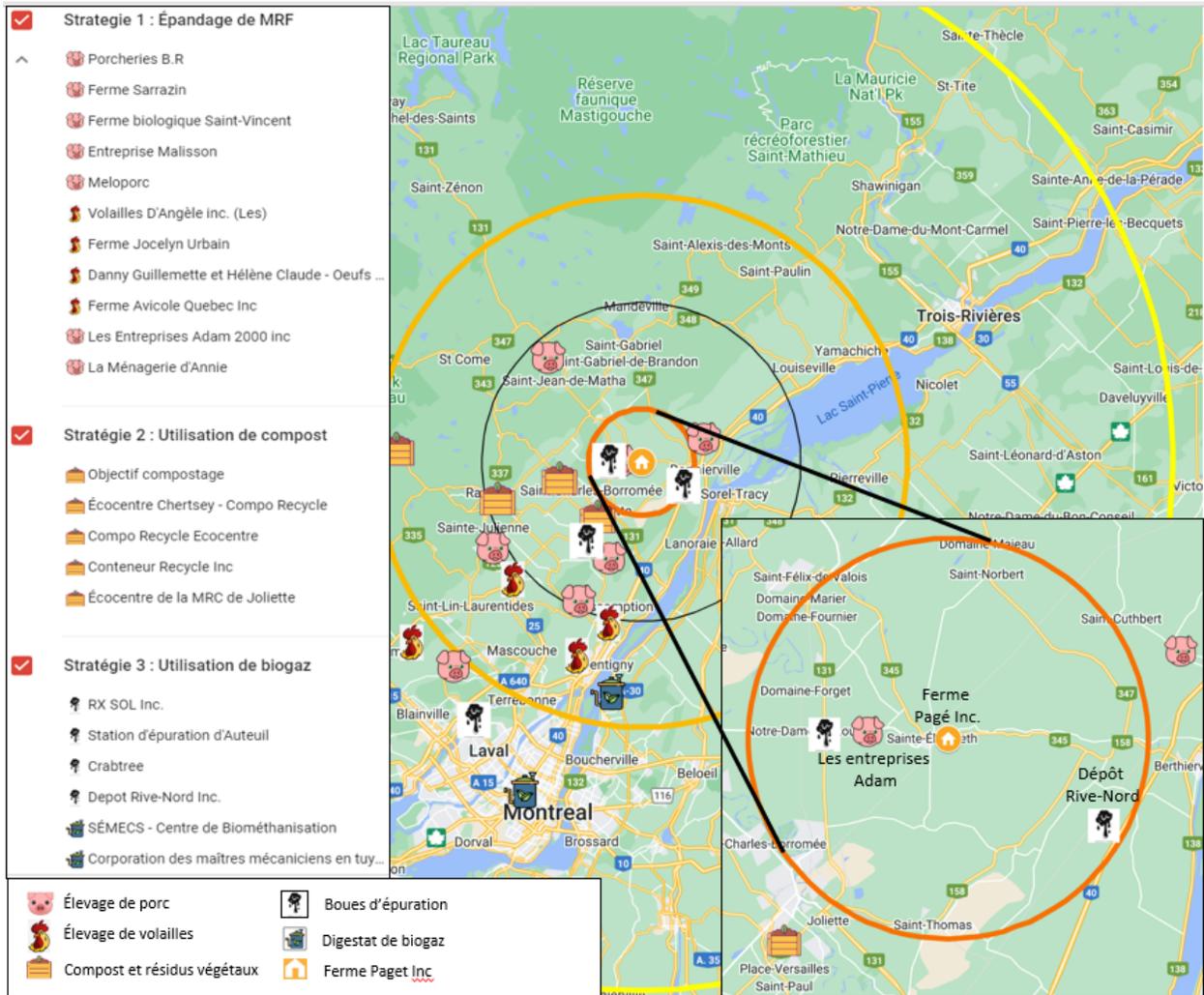
À la lumière de ces résultats, nous proposons en guise d'exemple quelques recommandations à la Ferme N. J. Pagé inc., un des partenaires du projet, en tenant compte de sa situation géographique et des gisements de matières résiduelles autour de la ferme.

Étant donné l'importance clé de la distance des gisements de matières résiduelles à la ferme, nous avons procédé dans un premier temps à l'identification de ces gisements et à leur positionnement sur une carte (voir figure 7 et carte interactive en suivant [ce lien](#)). Sur cette carte, nous avons positionné les sources potentielles de fumiers, de boues de station d'épuration, de résidus végétaux, de digestats et de matières organiques potentiellement enfouies. Selon l'étude du CTTÉI (2022), « les résidus non comestibles à l'humain d'origine mixte (principalement des restants de table et retailles de préparation de repas d'origine végétale et animale) représentent 92 % de toutes les matières organiques enfouies » (p. 49). Nous avons donc considéré les restaurants à proximité de la ferme comme des sources potentielles de matières organiques enfouies.

Remarque : Tous les gisements identifiés sur la figure 7 sont des gisements potentiels. Il faudrait vérifier auprès de chacun la disponibilité et la quantité de matières résiduelles. Par ailleurs, il serait important de

connaître le sort actuel des matières résiduelles identifiées pour pouvoir modéliser convenablement les impacts évités lorsque ces matières résiduelles sont détournées de leur traitement en fin de vie.

Figure 3.7 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la Ferme N. J. Pagé inc.



Note : Les cercles concentriques correspondent à des distances de 10 km, 30 km, 50 km et 100 km.

Par exemple, si la ferme N. J. Pagé décide de mettre en pratique l'ÉC avec l'idée de réduire les émissions de GES de sa production de maïs, on pourrait lui recommander de combiner : l'utilisation de MRF (fumier, etc.) provenant d'un voisin éleveur aussi proche que possible (stratégie 1); l'utilisation de compost provenant de sources de matières organiques qui seront ainsi détournées de l'enfouissement (stratégie 2); et l'utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains (stratégie 3) provenant de sources les plus proches possibles de la ferme.

Les gisements les plus pertinents pour la Ferme N. J. Pagé sont :

- Sa voisine, les Entreprises Adam inc. : Située à 4 km, elle a un élevage de porc et serait donc une source potentielle de lisier à utiliser comme MRF;
- Les restaurants de Joliette : Il en existe deux proches : Bâton Rouge Grill house & Bar à 10,2 km et Restaurant Chez Henri à 10,4 km, qui sont une bonne source potentielle pour produire du compost, à condition que ceux-ci enfouissent leurs déchets de table et retailles de nourriture, et que cette stratégie permette de détourner ces matières organiques de l'enfouissement ;
- L'écocentre Dépôt Rive-Nord : Situé à 9,5 km, ce grand dépôt et centre de transformation de boues et autres déchets de Lanaudière est un candidat potentiel pertinent pour la production de biogaz.

Avec ce scénario, étant donné que les sources de fumier, de compost et de biogaz sont respectivement situées à 4 km, à 10,2 km et à 9,5 km (soit ≤ 10 km de la ferme), la combinaison permettrait potentiellement à la Ferme N. J. Pagé de réduire significativement les émissions de GES de sa production de maïs (de l'ordre de 25 % et plus), à condition qu'elle arrive à obtenir de ces fournisseurs les quantités nécessaires et suffisantes de fumier, de compost (qui remplirait le pourcentage d'engrais minéral requis) et de boues (en quantité suffisante pour produire son biogaz).

Cependant, s'il n'y a pas suffisamment de lisier disponible chez la ferme voisine (les Entreprises Adam inc.), les bénéfices environnementaux s'amenuiseront, s'il faut aller en chercher auprès d'autres fermes plus éloignées (p. ex., la Ferme biologique Saint-Vincent à 12 km, Meloporc à 18,5 km ou la Ferme Sarrazin à 26 km). La ferme N. J. Pagé perdrait alors progressivement les bénéfices environnementaux de sa stratégie circulaire, mais les bénéfices dépasseraient encore les impacts environnementaux du transport, donc ces solutions demeureraient recommandables.

Par contre, l'ACV a montré qu'à partir de 30 km, le score du scénario d'agriculture biologique égalise celui du scénario de référence pour l'indicateur *Changement climatique*. (Les impacts du transport deviennent alors égaux aux bénéfices de la stratégie.) À cet effet, si la Ferme N. J. Pagé doit aller jusqu'aux Porcheres B. R. (30 km), à l'Entreprise Malisson (32 km) ou à La Ménagerie d'Annie (51 km) pour s'approvisionner en MRF, ses impacts environnementaux et ses émissions de GES deviendront pires qu'avant la mise en œuvre de cette stratégie d'ÉC. Nous recommandons d'éviter d'aller aussi loin pour s'approvisionner en MRF.

Pour ce qui est de la production de biogaz, si la quantité de boues nécessaire n'est pas couverte par l'écocentre Dépôt Rive-Nord (situé à 9,5 km), la Ferme N. J. Pagé pourrait recourir à RX SOL inc., à

Crabtree ou à la Station d'épuration d'Auteuil, situées respectivement à 6 km, à 17 km et à 57,5 km. Ces sources de boues sont toutes à l'intérieur d'un rayon de 100 km, rayon qui, selon l'ACV, permet de procurer des bénéfices environnementaux et climatiques.

Conclusion

La quantification de l'empreinte carbone de la production céréalière selon une perspective cycle de vie en amont de l'élaboration des stratégies d'ÉC a permis d'explorer certaines stratégies innovantes non identifiées dans la littérature concernant les stratégies de circularité traditionnellement appliquées dans le secteur agricole (p. ex., l'utilisation de biogaz pour le séchage des grains).

La quantification de l'empreinte environnementale du cycle de vie des trois stratégies sélectionnées a mis en lumière que l'ÉC ne rime pas toujours avec réduction d'impacts et qu'il est absolument essentiel de quantifier les potentiels bénéfiques environnementaux (ou le potentiel déplacement d'impacts) quand on souhaite mettre en œuvre de telles stratégies d'ÉC. Les bénéfices environnementaux des trois stratégies analysées dans le cadre de cet article sont conditionnels principalement à la distance de transport des matières résiduelles et au sort original dont elles ont été détournées (procédé de traitement en fin de vie évité).

Les résultats de cette étude seront complétés par des études de cas similaires pour les autres céréales produites dans Lanaudière. Le tout sera intégré dans un outil d'aide à la décision pour les producteurs céréaliers de la région afin de les aider à identifier et à mieux choisir les gisements parmi ceux disponibles dans leur région.

6 REMERCIEMENTS

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un programme financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) intitulé *Outils pour les producteurs céréaliers dans la prise de décision vers une économie circulaire (Projet IA120656)*, qui vise à créer un outil pour informer les producteurs céréaliers de la région de Lanaudière sur les stratégies circulaires les plus efficaces en performance environnementale. Nous remercions le MAPAQ pour le soutien financier de ce projet, les producteurs agricoles partenaires du projet (la Ferme N. J. Pagé inc., les Entreprises Adam 2000 inc., la Ferme Gross et fils inc., la 9228-5063 Québec inc. et la Ferme Théobald Brisson) pour leur participation très enrichissante à ce projet de recherche ainsi que le Conseil de développement bioalimentaire de Lanaudière pour un accès en primeur à son étude de caractérisation de la filière bioalimentaire dans Lanaudière. Nous remercions également Jolène Gadoury pour sa relecture et ses conseils.

6 NOTES :

- 1 Une approche similaire sera appliquée par la suite pour les autres catégories d'impacts et pour les autres céréales, mais ce n'est pas l'objet du présent article.
- 2 Cette hypothèse est valable dans un contexte de gisement local en excès, mais une analyse de sensibilité sur ce paramètre est effectuée ultérieurement.

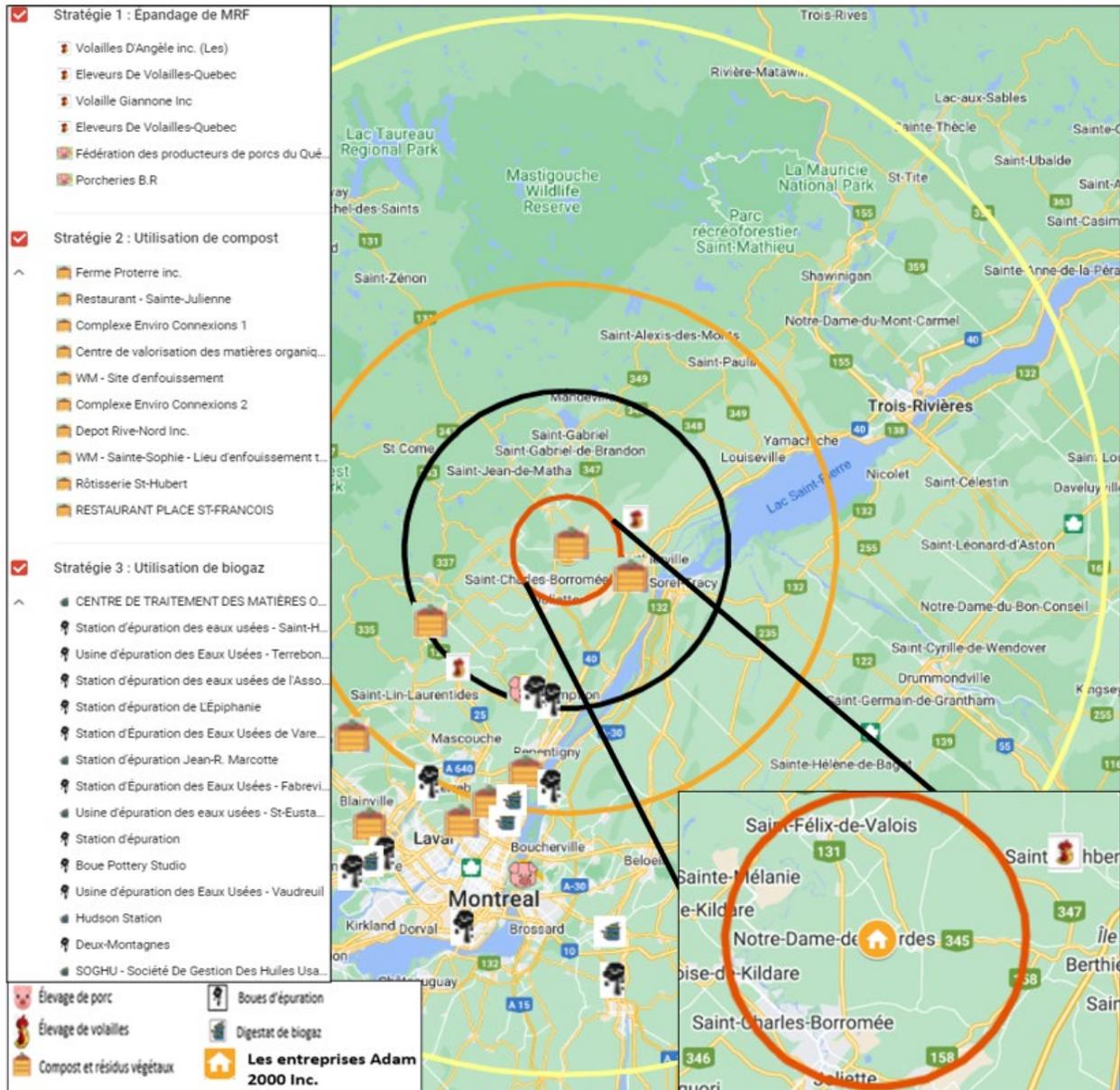
3.1.5 RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES À L'ARTICLE : RECOMMANDATIONS POUR LES QUATRE AUTRES FERMES

À la lumière des résultats de l'ACV, nous proposons aussi des recommandations aux quatre autres producteurs partenaires du projet : les Entreprises Adam 2000 Inc, la Ferme Gross et fils Inc., la Ferme 9228-5063 Québec Inc., et la ferme Anc. Ferme Théobald Brisson. Nos recommandations se basent sur les mêmes critères décrits précédemment à la section 3.1.4.3.1. Elles considèrent les positionnements géographiques respectifs de chacune des quatre fermes par rapport aux gisements de matières résiduelles potentiellement disponibles autour d'elle. Et considérant toujours l'importance capitale de la distance des gisements de matières résiduelles à chacune de ces fermes, nous avons procédé dans un premier temps à l'identification des sources de ces gisements et à leurs positionnements sur des cartes interactives avec leurs liens correspondants dans les sections suivantes. Sur chacune de ces cartes, nous avons positionné, les sources potentielles de fumiers, de boues de station d'épuration, de résidus végétaux, de digestats et de matières organiques potentiellement enfouies. Selon l'étude du CTTÉI (2022), « les résidus non comestibles à l'humain d'origine mixte (principalement des restants de table et retailles de préparation de repas d'origine végétale et animale) représentent 92 % de toutes les matières organiques enfouies » (p. 49). Nous avons donc considéré les restaurants à proximité de la ferme comme des sources potentielles de matières organiques enfouies.

Remarque : Tous les gisements identifiés sur les figures illustrant chaque ferme et sa réalité de positionnement géographique sont des gisements potentiels. Il faudrait vérifier auprès de chacun la disponibilité et la quantité de matières résiduelles. Par ailleurs, il serait important de connaître le sort actuel des matières résiduelles identifiées pour pouvoir modéliser convenablement les impacts évités lorsque ces matières résiduelles sont détournées de leur traitement en fin de vie.

3.1.5.1 Recommandations pour la ferme Les Entreprises Adam 2000 Inc. (Voir carte de positionnement de la ferme par rapport aux sources potentielles de gisements à ce [lien](#))

Figure 3.8 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la ferme Les Entreprises Adam 2000 Inc.



Note : Les cercles concentriques correspondent à des distances de 10 km, 30 km, 50 km et 100 km.

Si la ferme Les Entreprises Adam 2000 Inc. décide de mettre en pratique l'ÉC avec l'idée de réduire les émissions de GES de leur production de maïs, on pourrait leur recommander de combiner : l'utilisation de MRF (fumier, etc.) provenant d'un voisin éleveur aussi proche que possible (stratégie 1); l'utilisation de compost provenant de sources de matières organiques qui seront ainsi détournées de l'enfouissement

(stratégie 2); et l'utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains (stratégie 3) provenant de sources les plus proches possibles de la ferme.

Les gisements disponibles autour de la ferme Les Entreprises Adam 2000 Inc. sont :

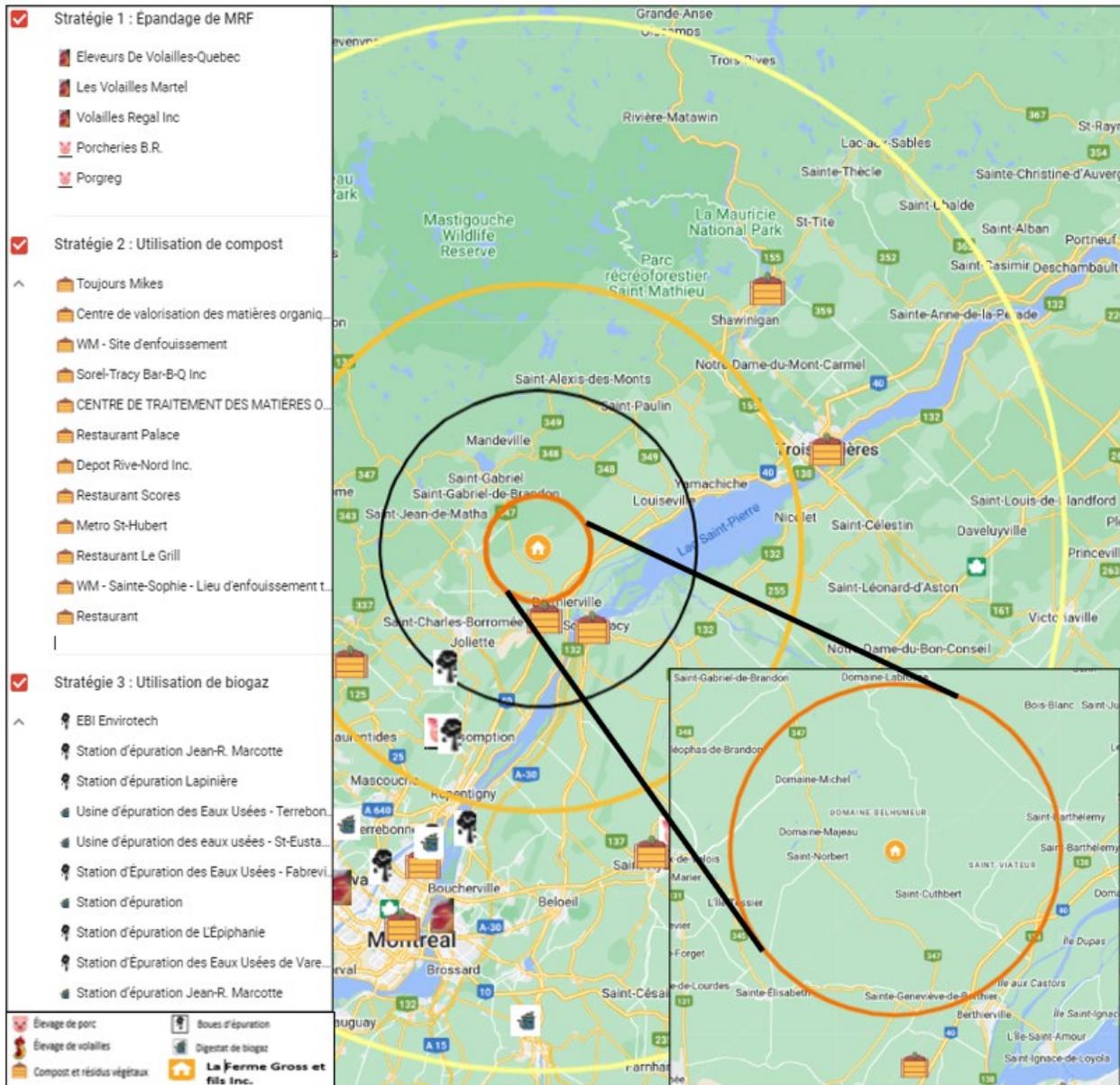
- La Volaille Giannoneinc., (14km >10km), est la seule voisine plus proche de la ferme Les Entreprises Adam 2000 inc. pouvant lui fournir du fumier à utiliser comme MRF.
- La Ferme Proterre inc., située à 1,7 km à Ste-Élisabeth, une entreprise de cultures légumières de transformation biologiques et le restaurant de Sainte-Julienne situé à 14 km des entreprises Adam 2000 inc., avec ses déchets de table et retailles de nourriture pourraient tous être de sources potentielles pour produire du compost pour Les Entreprises Adam 2000 inc., à condition bien sûr que ceux-ci enfouissent leurs déchets, et que cette stratégie permette de détourner leurs matières organiques de l'enfouissement vers le compostage.
- La station d'épuration de L'Épiphanie, située à 27,6 km et la station des eaux usées de l'Assomption située à 27,7 km, de la ferme Les Entreprises Adam 2000 inc. Ces deux grandes stations d'épurations peuvent fournir les quantités nécessaires de boues et autres déchets de leur localité à transformer pour la production de biogaz.

Avec ce scénario, les sources de fumier, de compost et de biogaz sont respectivement situées à 14km (soit un peu >10km de la ferme), à (entre 1,7 km et 14 km, soit <30 km de la ferme) et à (entre 27,6 km et 27.7 km, soit <100 km de la ferme). Selon les résultats de l'ACV, la ferme Les Entreprises Adam 2000 inc. peut déjà commencer par adopter la stratégie 3 c'est-à-dire l'utilisation des boues de station d'épuration ou de fumier et leur digestion anaérobie pour la récupération et l'utilisation du biogaz comme substitut du gaz naturel lors du séchage des grains et du digestat pour l'amendement agricole afin de réduire leur empreinte carbone de la production de grains respectivement de 13 % et 10 % des GES pour ces deux scénarios.

Mais selon les résultats de l'ACV, l'hypothèse de distance pour accroître la valorisation d'engrais organiques provenant de fermes environnantes comme MRF au détriment des engrais minéraux de synthèse devrait être de 10 km de rayon pour permettre une diminution de l'empreinte carbone de 1 % à 6 %, selon le scénario, par rapport au scénario de référence. Considérant alors les résultats de l'ACV, on pourrait commencer par conclure que la Volaille Giannone inc., ne constituerait pas une source très pertinente pour les Entreprises Adam 2000 inc., en matière de fumier car celle-ci est située à 14 km d'elle, soit 4 km plus loin que le rayon recommandé par l'ACV. Par conséquent, je ne recommande aux Entreprises Adam 2000 inc. d'utiliser des MRF car ses sources de ravitaillement en fumiers sont trop loin pour que ça représente le moindre bénéfice environnemental de mettre en place cette stratégie de circularité

3.1.5.2 **Recommandations pour la Ferme Gros et Fils**(Voir carte de positionnement de la ferme par rapport aux sources potentielles de gisements à [ce lien](#))

Figure 3.9 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la Ferme Gros et fils inc.



Note : Les cercles concentriques correspondent à des distances de 10 km, 30 km, 50 km et 100 km.

Si la Ferme Gros et fils inc. décide de mettre en pratique l'ÉC avec l'objectif de réduire les émissions de GES de sa production de maïs, et s'intéresse par exemple, aux modèles circulaires précédents c'est-à-dire :

l'utilisation de MRF (fumier, etc.) provenant d'un voisin éleveur aussi proche d'elle que possible (stratégie 1); l'utilisation de compost provenant de sources de matières organiques qui seront ainsi détournées de l'enfouissement (stratégie 2); et l'utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains (stratégie 3) provenant de sources plus proches possibles de la ferme. Nous lui présenterons les options disponibles pour elles.

Les gisements disponibles autour de la Ferme Gross et fils inc. sont :

- Les Volailles Martel (à 70,5 km >10km), les Eleveurs De Volailles-Québec(à 71,5 km) Les Volailles Régal Inc. (à 74,7 km >10km) et la Porcherie B.R. (à 39,4 km > 10 km) ;
- L'écocentre Dépôt Rive-Nord Inc. (à 12,5 km), sa source la plus proche, ou le bar restaurant Sorel-Tracy Bar-B-Q Inc. (à 18,1 km) ou chez l'un des restaurants de Sainte Julienne (à 41,9 km) ;
- EBI Envirotech (28 km), Station d'épuration de L'Épiphanie (37,1 km) et la Station d'Épuration des Eaux Usées de Varennes (53,1 km). Plusieurs autres stations d'épuration de boues disponibles pour la Ferme Gross et fils inc., sont : la Station d'épuration Jean-R. Marcotte (57.8 km), l'Usine d'épuration des Eaux Usées - Terrebonne (62.5 km), la Station d'épuration Lapinière (66.2 km) et la Station d'épuration des eaux usées – Fabreville (79 km) et l'Usine d'épuration des eaux usées - St-Eustache (à 82 km) de la ferme etc.

En nous basant sur les mêmes critères de distance et de positionnement géographique précédemment utilisés pour les fermes N.J. Pagé et Les Entreprises Adam 2000 Inc. par rapport aux sources de gisements potentiels, on déconseillerait à la Ferme Gross et fils inc. de penser utiliser l'épandage de MRF (fumier, etc.) comme stratégie circulaire, car les seuls éleveurs plus proches de volailles qui lui serviront de sources de fumier sont les Volailles Martel (70,5 km >10km) et les Volailles Regal Inc. (74,7 km >10km). L'élevage de porc le plus proche de la Ferme Gross et fils inc. est la Porcherie B.R. (situé à 39,4 km > 10 km). La stratégie 1 : Épandage de MRF ne semble pas du tout être une option de stratégie circulaire avantageuse pour la Ferme Gross et fils inc. du point de vue environnemental et réduction des émissions de GES car les résultats de l'ACV montrent clairement que les sources de MFR (fumier, etc.) de volailles et/ou de porc doivent être dans un rayon de 10 km maximum pour avoir des bénéfices.

Par contre, l'utilisation de compost provenant de sources de matières organiques qui seront détournées de l'enfouissement (stratégie 2) et l'utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains (stratégie 3) provenant de sources plus proches possibles de la Ferme Gross et fils inc. pourraient être de bonnes options de stratégies circulaires pour la Ferme Gross et fils inc.

Par exemple, pour l'utilisation du compost, la Ferme Gross et fils inc., pourrait aller chercher ses matières organiques compostables chez l'écocentre Dépôt Rive-Nord Inc. (à 12,5 km), sa source la plus proche, ou chez le bar restaurant Sorel-Tracy Bar-B-Q Inc., à 18,1 km (stratégie 2).

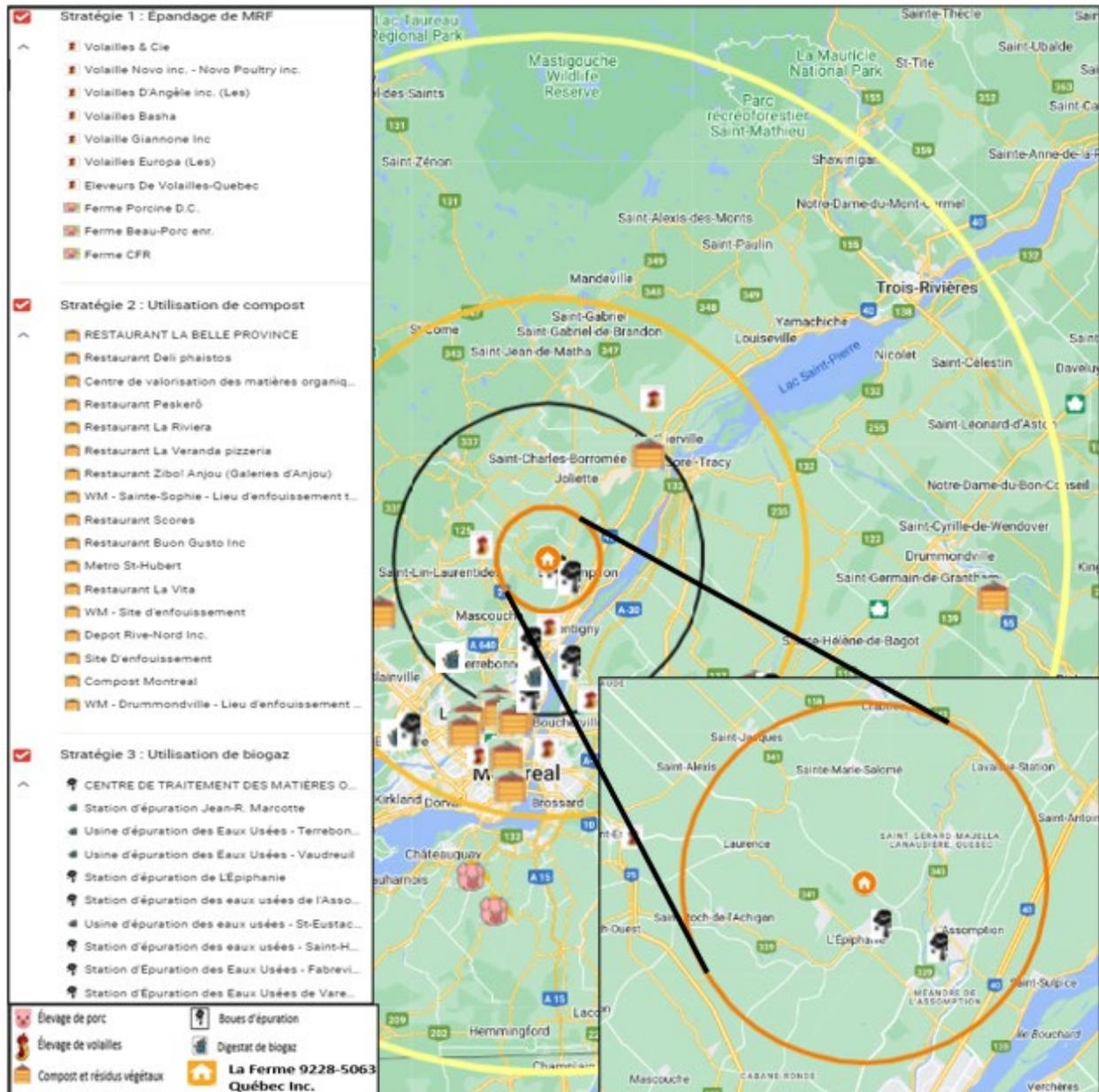
Pour l'utilisation du biogaz pour séchage à partir des sources (stations) de boues d'épuration plus proches et utilisables par la Ferme Gross et fils inc., EBI Envirotech (à 28 km), la Station d'épuration de L'Épiphanie (à 37,1 km) et la station d'épuration des Eaux Usées de Varennes (à 53,1 km) (la stratégie 3) sont toutes de sources potentielles. Plusieurs autres stations d'épuration sont disponibles pour la Ferme Gross et fils inc. dans un rayon de 100 km (critère de l'ACV) et peuvent par conséquent toutes fournir de boues d'épuration et autres déchets, à Ferme Gross et fils inc. Celles sont : la Station d'épuration Jean-R. Marcotte (57.8 km), l'Usine d'épuration des eaux usées - Terrebonne (à 62.5 km), la Station d'épuration Lapinière (à 64.8 km), la Station d'épuration des eaux usées – Fabreville (79 km) et l'Usine d'épuration des eaux usées - St-Eustache (à 82 km) etc. Ces grandes stations d'épuration peuvent fournir les quantités nécessaires de boues et autres déchets de leur localité à transformer pour la production de biogaz, amendements, etc.

Avec un scénario, qui recourt à des matières organiques pour compostage provenant de chez l'écocentre Dépôt Rive-Nord Inc. (à 12,5 km), et de boues pour biogaz provenant de EBI Envirotech (à 28 km), la Ferme Gross et fils, aurait une combinaison qui lui permettrait potentiellement de réduire les émissions de GES de sa production de maïs (au moins de l'ordre de 10% à 13%), à condition bien sûr qu'elle arrive à obtenir de ces fournisseurs les quantités nécessaires et suffisantes, de compost (qui remplirait le pourcentage d'engrais minéral requis) et de boues (en quantité suffisante pour produire son biogaz).

Cependant, s'il n'y a pas suffisamment de matières compostables chez l'écocentre Dépôt Rive-Nord Inc. (à 12,5 km) et de boues pour biogaz provenant de EBI Envirotech (à 28 km), et que la Ferme Gross et fils doit aller chercher respectivement ses résidus compostables au Restaurant Sainte-Julienne (à 41,9 km) et de boues disponibles pour biogaz à la Station d'épuration de L'Épiphanie (37,1 km) ou à la Station d'Épuration des Eaux Usées de Varennes (à 53,1 km) ou autres plus loin (la stratégie 3), ainsi, la Ferme Gross et fils, perdrait progressivement et au fur et à mesure les bénéfices environnementaux de sa stratégie circulaire. Les impacts environnementaux du transport pourraient même dépasser à un niveau donné les bénéfices environnementaux si l'on va plus loin que 100 km. D'autres ACV pourraient servir à vérifier ces scénarios. Ces scénarios pourraient être recommandés dans des conditions et contextes bien définis car la présente ACV a montré qu'à partir de 30 km, le score du scénario d'agriculture biologique égalise celui du scénario de référence pour l'indicateur Changement climatique.

3.1.5.3 Recommandations pour la Ferme 9228-5063 Québec Inc. (Voir carte de positionnement de la ferme par rapport aux sources potentielles de gisements à ce [lien](#))

Figure 3.10 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la Ferme 9228-5063 Québec Inc.



Note : Les cercles concentriques correspondent à des distances de 10 km, 30 km, 50 km et 100 km.

Si la Ferme 9228-5063 Québec Inc. décide de pratiquer l'ÉC et selon les mêmes critères de positionnement géographique et de distance entre elle et les sources potentielles de gisements, voici les situations possibles qu'on pourrait lui présenter.

À la Ferme 9228-5063 Québec Inc., on pourrait recommander deux scénarios : S1) de combiner : l'utilisation de MRF (fumier, etc.) provenant de ses deux voisins éleveurs de volailles (stratégie 1); l'utilisation de compost provenant de sources de matières organiques (Restaurant La Riviera et/ou le Dépôt Rive-Nord inc.), qui seront ainsi détournées de l'enfouissement (stratégie 2) et l'utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains (stratégie 3) provenant de sources les plus proches possibles de la ferme telles que les Stations d'épuration de L'Épiphanie et la Station des eaux usées de l'Assomption ou S2) l'utilisation des boues de stations d'épuration (Stations d'épuration de L'Épiphanie et/ou la Station des eaux usées de l'Assomption) ou de fumier et leur digestion anaérobie pour la récupération et l'utilisation du biogaz comme substitut du gaz naturel lors du séchage des grains et du digestat pour l'amendement agricole.

Les gisements disponibles autour de la Ferme 9228-5063 Québec Inc. sont :

- Les Volailles d'Angèle inc. (Les) (à 12,2 km), les Volailles & Cie (à 13 km), La Volaille Novo inc. - Novo Poultry inc. (à 28 km) et les Volaille Giannone Inc. (à 36,8 km). Il n'y a aucun élevage de porc proche de la Ferme 9228-5063 Québec Inc. Les seuls identifiés sont : La Ferme Porcine D.C. (à 62,7 km), la Ferme Beau-Porc enr. (à 70,6 km) et la Ferme CFR (à 69 km).
- Le Restaurant La Riviera (à 29,1 km), le Depot Rive-Nord Inc. (à 27,6 Km), le WM - Sainte-Sophie - Lieu d'enfouissement technique et division de collecte et transport des matières résiduelles (à 33,5 km), le Restaurant La Veranda pizzeria (à 31,2 km), le Restaurant Zibo! Anjou (Galeries d'Anjou) (à 31,3 Km), le Restaurant La belle province (à 31,3 Km), le Restaurant Deli phaistos (à 31,7) et le Restaurant Buon Gusto Inc. (à 34 km).
- La Station d'épuration de L'Épiphanie (à 2,1 km), la Station d'épuration des eaux usées de l'Assomption (à 5,1 km), la Station d'épuration des Eaux Usées de Varennes (à 19,7 km), la Station d'épuration Jean-R. Marcotte (à 22 km), le Centre de traitement des matières organiques par biométhanisation (chantier best) (à 25, 7 km), l'Usine d'épuration des Eaux Usées – Terrebonne (à 26 km) et l'écocentre Dépôt Rive-Nord (à 27,3 km). Ces grands dépôts, usines et centres de transformation de boues et autres déchets sont des candidats potentiels pertinents pour la production de biogaz.

Avec le premier scénario S1, les sources immédiates de fumier, de compost et de biogaz pour la Ferme 9228-5063 Québec Inc. seraient respectivement situées (entre 12 km et 13 km, soit légèrement > 10 km

chacune d'elle), (entre 16 km et 30 km, soit ≤ 30 km) et les Stations d'épuration des eaux usées (entre 2,1 Km et 5,1 Km, soit $\ll 100$ km) de la ferme.

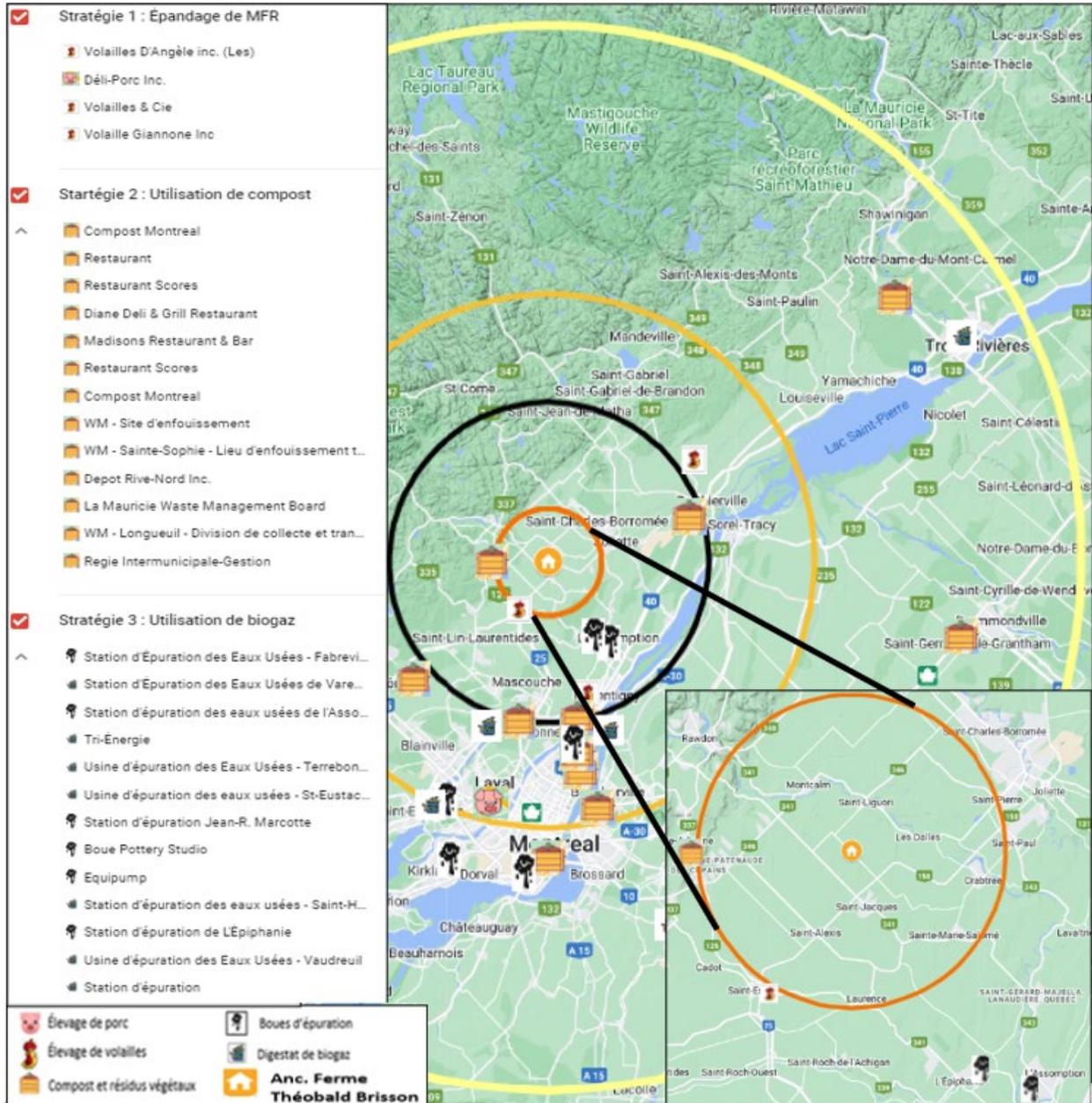
Avec ce scénario, aller chaque fois de la Ferme 9228-5063 Québec Inc. chercher du fumier de volaille et y revenir ajouteraient une distance additionnelle de $5 \text{ km} * 2$ de plus que les 10 km de rayon recommandés par l'ACV. Je ne recommande pas à cette ferme d'utiliser des MRF car toutes les sources autour de la ferme sont trop loin pour que ça représente le moindre bénéfice environnemental de mettre en place cette stratégie de circularité.

Avec le deuxième scénario **S2**, la Ferme 9228-5063 Québec Inc. pourrait utiliser de MRF (fumier, etc.) provenant de ses deux voisins éleveurs de volailles (stratégie 1) et utiliser des boues de station d'épuration ou de fumier et leur digestion anaérobie pour la récupération et l'utilisation du biogaz comme substitut du gaz naturel lors du séchage des grains et du digestat pour l'amendement agricole (stratégie 3). Selon les résultats de l'ACV, l'utilisation des boues de station d'épuration ou de fumier et leur digestion anaérobie pour la récupération et l'utilisation du biogaz comme substitut du gaz naturel lors du séchage des grains et du digestat pour l'amendement agricole semblent une stratégie prometteuse afin de réduire l'empreinte carbone de la production de grains. Selon les résultats de l'ACV, une réduction respective de 13 % et 10 % des GES pour ces deux scénarios serait possible, les boues de station d'épuration représentant le scénario le plus avantageux.

La Ferme 9228-5063 Québec Inc., irait alors aux deux Stations d'épuration de boues plus proches d'elle, la Station d'épuration de L'Épiphanie et la Station des eaux usées de l'Assomption, pour se ravitailler en boues ou en fumier et leur digestion anaérobie pour la récupération et l'utilisation du biogaz comme substitut du gaz naturel lors du séchage des grains et du digestat pour l'amendement agricole. Ce scénario pourrait permettre à la Ferme 9228-5063 Québec Inc., de réduire son empreinte carbone de la production de grains respectivement de 13 % et 10 % des GES pour ces deux alternatives. Dans ce cas aussi, la distance à parcourir entre le gisement et la ferme a une influence importante sur la performance environnementale de la stratégie de circularité, mais il faut parcourir une distance plus grande pour annuler le bénéfice environnemental de cette stratégie : plus de 100 km pour le scénario avec du biogaz produit à partir de fumier.

3.1.5.4 **Recommandations pour Anc. Ferme Théobald Brisson**(Voir carte de positionnement de la ferme par rapport aux sources potentielles de gisements à ce [lien](#))

Figure 3.11 : Cartographie des gisements de matières résiduelles disponibles à proximité de la Ferme Théobald Brisson



Note : Les cercles concentriques correspondent à des distances de 10 km, 30 km, 50 km et 100 km.

Si Anc. Ferme Théobald Brisson décide de pratiquer l'ÉC avec l'objectif de réduire les émissions de GES de sa production de maïs, on pourrait lui recommander de combiner : l'utilisation de MRF (fumier, etc.) provenant d'un voisin éleveur aussi proche que possible (stratégie 1); l'utilisation de compost provenant de

sources de matières organiques qui seront ainsi détournées de l'enfouissement (stratégie 2); et l'utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains (stratégie 3) provenant de sources les plus proches possibles de la ferme.

Les gisements disponibles autour d'Anc. Ferme Théobald Brisson sont :

- Les Volailles d'Angèle inc.(Les) (à 10,5 km), les Volailles & Cie (à 26,1 km) et la Volaille Giannone Inc.(à 33,7 Km). Il y a aussi la Volaille Novo inc. - Novo Poultry inc. (à 41,7 km >10 km), l'Éleveurs De Volailles-Québec (à 48,3 km), les Volailles Basha (à 47,7 km) et les Volailles Europa (Les) (à 50 km) qui sont autour de cette ferme mais qui ne figurent pas sur la carte car elles ne sont en réalité pas pertinentes pour cette stratégie par conséquent encombraient inutilement la carte et réduisait sa clarté et sa netteté. Mais, par souci d'information, j'ai jugé bon de les mentionner ici. Aussi, le seul éleveur de porc proche de Anc. Ferme Théobald Brisson est Déli-Porc Inc. situé à 46 km – non plus aussi pertinent.
- Le Restaurant(l'un des restaurants) de Sainte Julienne situé à 10,3 km, le Dépôt Rive-Nord Inc. (à 27,2 km), le Restaurant Scores (à 29,7 km), le Madisons Restaurant & Bar (à 29.7 km) et le WM - Sainte-Sophie - Lieu d'enfouissement technique et division de collecte et transport des matières résiduelles (à 33 km).
- La Station d'épuration de L'Épiphanie (à 16,1 Km), la Station d'épuration des eaux usées de l'Assomption (à 17,7 km), l'Usine d'épuration des Eaux Usées – Terrebonne (à 32,8 km), la Station d'épuration Jean-R. Marcotte (à 34 km) et la Station d'Épuration des Eaux Usées de Varennes (à 33,3 Km).

Avec ce scénario, les sources de fumier, de compost et de biogaz pour Anc. Ferme Théobald Brisson seraient respectivement situées à 10,5 km (soit légèrement > 10 km), le Restaurant de Sainte Julienne (à 10,3 km trois fois <30 km) ou le Dépôt Rive Nord (à 27,2 km, soit < 30 km) et la Station d'épuration des eaux usées l'Épiphanie (à 16,1 km soit six fois au moins < 100km) ou la Station d'épuration des eaux usées de l'Assomption (à 17,7 km soit cinq fois au moins < 100km). Cette combinaison permettrait potentiellement à Anc. Ferme Théobald Brisson de réduire significativement les émissions de GES de sa production de maïs (de l'ordre de 25 % et plus), à condition qu'elle arrive à obtenir de ces fournisseurs les quantités nécessaires et suffisantes de fumier, de compost (qui remplirait le pourcentage d'engrais minéral requis) et de boues (en quantité suffisante pour produire son biogaz). Ceci si et seulement si Anc. Ferme Théobald Brisson arrive à trouver assez de fumiers chez les Volailles D'Angèle inc. (Les). Autrement, pour trouver du fumier, elle sera obligée d'aller soit à la ferme d'élevage de volailles les Volailles & Cie (à 26,1 km) ou à la ferme les Volaille Giannone inc (à 33,7 Km). Étant donné que ces deux derniers sont à trois fois plus loin que le rayon

de 10 km recommandé par l'ACV, elles ne représentent pas pour cette ferme des sources pertinentes d'un point de vue environnemental.

Cependant, s'il n'y a pas suffisamment de lisier de disponible chez la ferme voisine (les Volaille D'Angèle (les) inc.) pour Anc. Ferme Théobald Brisson, les bénéfices environnementaux de cette stratégie s'amenuiseront, s'il faut qu'elle aille en chercher auprès d'autres fermes plus éloignées comme par exemple, les Volailles & Cie (à 26,1 km), la Volaille Giannone inc à 33,7 Km, Volaille Novo inc. - Novo Poultry inc. (à 41,7 km >10 km), les Éleveurs De Volailles-Québec (à 48,3 km), les Volailles Basha (à 47,7 km), les Volailles Europa (Les) à 50 km. Je ne recommande pas à cette ferme d'utiliser des MRF car toutes ces sources sont trop loin d'elle pour représenter le moindre bénéfice environnemental de mettre en place cette stratégie de circularité.

Le seul éleveur de porc proche d'Anc. Ferme Théobald Brisson est Déli-Porc Inc. situé à 46 Km. La ferme Anc. Ferme Théobald Brisson risque de perdre rapidement les bénéfices environnementaux de sa stratégie circulaire s'il pousse les limites des rayons recommandés par l'ACV à la recherche de sources éventuelles de gisements.

CHAPITRE 4

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis d'analyser de manière itérative des stratégies d'ÉC en focalisant sur les principaux enjeux environnementaux auxquels fait face l'industrie céréalière à Lanaudière. Ce travail ne prétend pas être exhaustif car il s'est limité à trois stratégies identifiées en collaboration avec les partenaires agricoles du terrain à l'étude. Dans le cas où on voudrait l'élargir, il serait important d'aller analyser d'autres scénarios qui seraient potentiellement possibles et de faire une analyse plus exhaustive.

À la lumière des résultats, ce projet a identifié les principaux contributeurs d'impacts (points chauds) à considérer le long du cycle de vie de la production des céréales et sur lesquels des efforts stratégiques circulaires devraient se concentrer pour la réduction des impacts environnementaux, notamment la réduction des GES. Ces points chauds sont : 1) les opérations à la ferme - énergie pour séchage (20%) des émissions totales, 2) les opérations au champ - émissions de NO₂ issues de la fertilisation (53%) et la 3) production des intrants - engrais minéraux (22%). Principalement, il y a des déplacements potentiels d'impacts vers le transport et vers les émissions de méthane. Ces résultats sont à nuancer car selon (RECYC-QUÉBEC, 2021), le compostage est un mode de traitement avec oxygène et ne produit donc pas de méthane, mais du CO₂ biogénique. Les émissions fugitives de méthane associées à l'enfouissement sont donc évitées, ce qui contribue à réduire les GES. L'utilisation de compost comme amendement de sol contribue à la séquestration du carbone au sol, ce qui représente une réduction additionnelle de GES et si le compost est substitué à un engrais chimique, une réduction additionnelle est obtenue puisqu'on évite alors la production d'engrais, une activité émettrice de GES (RECYC-QUÉBEC, 2021). En plus, le gain net du compostage sur l'enfouissement est d'autant plus élevé que les biogaz ne sont pas captés au lieu d'enfouissement. Cette situation est observée pour les lieux d'enfouissement de petite envergure en région éloignée, justifiant davantage l'importante contribution de la collecte des matières organiques avec compostage (RECYC-QUÉBEC, 2021). La biométhanisation permet un gain supplémentaire de réduction de GES lorsque l'énergie produite sert à remplacer des combustibles fossiles (RECYC-QUÉBEC, 2021) comme cette étude propose aux producteurs partenaires de ce projet pour leur séchage.

Cette étude a une portée qui est très concrète et limitée de s'adresser à des partenaires de terrain qui sont des agriculteurs de production céréalière dans Lanaudière. Cependant une démarche similaire pourrait tout à fait être appliquée à d'autres stratégies d'ÉC. Pour d'autres types d'acteurs, les résultats de cette étude pourraient être utilisés pour donner d'autres types de recommandations par exemple, à l'échelle du territoire,

à l'échelle des acteurs municipaux ou des acteurs industriels pour savoir quels sont leurs débouchés pour leurs matières résiduelles.

Les résultats des analyses démontrent que c'est nécessaire de quantifier l'impact pour ne pas avoir des déplacements d'impacts. Ils prouvent que c'est aussi nécessaire de tenir compte des ressources disponibles dans Lanaudière sur le terrain pour avoir des quantités précises sur des distances précises pour pouvoir atteindre les objectifs visés par les stratégies circulaires retenues.

Comme mentionné précédemment dans cette section, plusieurs autres stratégies circulaires sont possibles telles que l'utilisation des eaux usées traitées pour des fins d'irrigation des terres agricoles. Ce projet aurait pu procéder à l'analyse de cette stratégie mais les distances entre les sites municipaux (usines de traitement des eaux usées) et les fermes sont très importantes et ne pourraient pas favoriser une réduction d'impacts environnementaux.

Les trois stratégies circulaires scénarisées dans le cadre de cette étude pour la réduction des impacts sont :

- Stratégie 1 : Épandage de matières résiduelles fertilisantes (MRF) pour remplacer les fertilisants azotés;
- Stratégie 2 : Utilisation de compost pour remplacer les fertilisants azotés; et
- Stratégie 3 : Utilisation de biogaz pour remplacer le gaz naturel lors du séchage des grains.

L'étude a montré qu'un scénario qui combine l'utilisation de fumier (stratégie 1) et de biogaz à partir de boues (stratégie 3) obtenus dans un rayon de 10 km autour de la ferme réduirait le score pour l'indicateur Changement climatique de 25%. Il se pourrait que cette réduction soit beaucoup plus importante avec d'autres scénarios que des études futures pourraient vérifier avec l'analyse additionnelle d'autres stratégies circulaires.

Les analyses montrent qu'un scénario avec Utilisation de digestat résultant de la production de biogaz, au lieu d'être considéré enfoui pourrait aussi faire l'objet d'une stratégie de fertilisation des sols agricoles. Alors des études futures pourraient analyser selon une approche cycle de vie la stratégie d'Utilisation circulaire du digestat issu de la production du biogaz comme fertilisant des sols agricoles.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

L'agriculture est un contributeur d'impacts environnementaux, de stress climatiques en même temps qu'elle subit des enjeux climatiques mais avec mon travail, j'ai pu mettre en lumière qu'il est possible d'éclairer des stratégies d'ÉC de manière concrète à réduire ces enjeux environnementaux. On voit cependant qu'il est essentiel pour éviter le déplacement d'impacts puis accroître d'avantage les problèmes, il est important d'éclairer la démarche d'ÉC par une quantification des impacts et de tenir compte des réalités du terrain quand on veut mettre en œuvre des stratégies d'ÉC.

L'ACV réalisée dans cette étude vise à étudier les impacts de l'implantation de différentes stratégies de circularité dans la production de maïs-grain afin de pouvoir donner des recommandations à l'échelle régionale (Lanaudière). Trois stratégies sont étudiées, l'utilisation de MRF en substitution des engrais minéraux, l'utilisation de compost issu de déchets organiques de la région et l'utilisation de biogaz issu de la digestion anaérobie de déchets de la région pour le séchage du grain.

Les résultats montrent des gains pour certains indicateurs lors de l'implantation des stratégies. Notamment les stratégies 1 et 3 montrent des réductions jusqu'à 10% par rapport au scénario de référence pour les indicateurs Changement climatique et Utilisation des ressources fossiles. Pour les autres indicateurs étudiés, la stratégie 1 augmentait légèrement les scores alors que ça ne changeait pas pour la stratégie 3.

Les impacts associés à la production de compost, dus principalement aux émissions de GES et ammoniac lors du compostage de la matière, et la faible teneur en nutriments du compost résultent en une augmentation des scores par rapport au scénario de référence lors de l'implantation de la stratégie 2.

Les analyses de sensibilité montrent l'importance de l'approvisionnement local mais surtout l'importance d'inclure la fonction secondaire de gestion de déchets et montre que l'implantation de la stratégie de circularité et donc la diminution des modes gestion avec perte de circularité diminue les scores du système pour tous les indicateurs étudiés. En effet, avec cette inclusion, toutes les stratégies deviennent plus intéressantes que le scénario de référence, et ce, pour tous les indicateurs étudiés. Cependant, les hypothèses utilisées concernant la gestion des déchets pour calculer le scénario de référence représentent le pire cas et probablement ne sont pas représentatives de la réalité de la région de Lanaudière. Une implantation des stratégies devrait considérer les facteurs tels que la quantité de matière disponible, son utilisation actuelle, les distances de transport, les technologies pour mettre en place les différentes stratégies (disponibilité et

types de technologie). Une fois ces aspects concrétisés, une évaluation plus détaillée pourrait être effectuée pour améliorer la représentativité des résultats et la robustesse des conclusions.

Comme perspective d'avenir, les travaux réalisés dans ce projet vont être valorisés dans le contexte du grand projet MAPAQ qui a une portée plus large. Ainsi par la suite, les résultats de ce projet seront intégrés dans les outils d'aide à la décision pour les producteurs céréaliers en Lanaudière.

ANNEXE 1 – ANALYSE DÉTAILLÉE DE LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DES TROIS STRATÉGIES D'ÉC IDENTIFIÉES

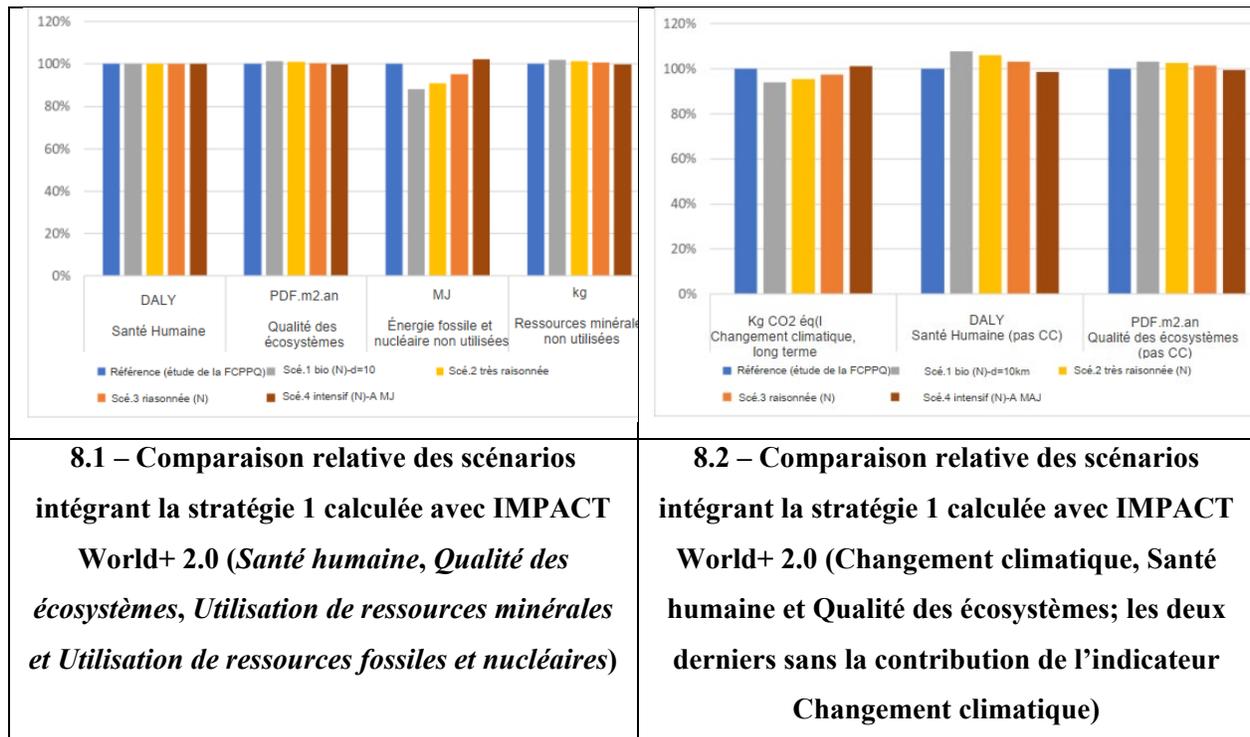
Stratégie 1

La figure 8.1 montre la comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 1 avec le cas de référence pour les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* et les indicateurs de *midpoint* touchant les ressources (*Ressources minérales* et *Ressources fossiles et nucléaires*). Les différences entre les scénarios sont très faibles pour les deux aires de protection et l'indicateur *Utilisation de ressources minérales* : moins de 3 % d'augmentation par rapport au scénario de référence. L'indicateur *Ressources fossiles et nucléaires* présente des réductions plus significatives : plus de 10 % dans le cas du scénario d'agriculture biologique.

Les principaux contributeurs restent la consommation d'énergie de séchage, les émissions liées à l'utilisation d'engrais ainsi que la production d'engrais pour l'aire de protection *Santé humaine* et les deux indicateurs de consommation de ressources (mais les émissions associées à l'utilisation d'engrais varient entre les scénarios). Dans le cas de l'aire de protection *Qualité des écosystèmes*, l'utilisation de terres pour la culture est le principal contributeur dans tous les scénarios. Les impacts de la production des engrais minéraux diminuent notablement dans les scénarios alternatifs, à part dans le scénario d'agriculture intensive, car moins d'engrais minéraux sont requis lorsqu'on recourt à des engrais organiques. La MRF appliquée comme engrais organique vient sans impacts en amont de sa collecte pour le transport à la ferme (impacts qui reviennent au cycle de vie précédent de la MRF). Cependant, la réduction d'impacts associée à cette absence de production de la matière première est compensée par une augmentation des impacts liés aux émissions d'acide azotique (NH_3), qui augmentent avec l'utilisation de MRF, et à l'augmentation du transport de matières. En effet, bien que le transport des MRF soit local et sur une courte distance (10 km par défaut, mais ce paramètre est traité dans les analyses de sensibilité), la teneur en nutriment N des engrais organiques est plus faible que celle des engrais minéraux, donc le volume à transporter augmente avec la part des engrais organiques requis à la ferme.

La figure 8.2 montre la comparaison des scénarios intégrant la stratégie 1 avec le cas de référence pour l'indicateur *Changement climatique* et les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* une fois la contribution de l'indicateur *Changement climatique* enlevée. La contribution de l'indicateur *Changement climatique* au score total des deux aires de protection varie selon le scénario : entre 44 % et 49 % pour la *Santé humaine* et entre 17 % et 19 % pour la *Qualité des écosystèmes*.

Figure 3.1 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 1 calculée avec IMPACT World+ 2.0



L'indicateur *Changement climatique* considéré seul met en lumière des réductions d'impacts de 2 % à 6 % pour les scénarios avec une utilisation accrue d'engrais organiques, avec un maximum de réduction de 6 % dans le cas où tout l'engrais appliqué est d'origine organique [Sc. 1 bio (N)]. Dans le cas où les apports sont 100 % minéraux [Sc. 4 intensive (N)], on observe une augmentation du score de 1 % par rapport au scénario de référence. Le N₂O émis au champ par les engrais appliqués est seulement marginalement augmenté. Avec plus d'engrais organiques, moins d'urée est appliquée, donc moins de CO₂ est émis au champ à cause de cet engrais spécifique. Seul reste le CO₂ issu de l'application de chaux (non affectée par les engrais utilisés). Pour l'indicateur *Santé humaine*, le principal contributeur aux scores est les émissions causant des problèmes respiratoires, notamment les émissions d'ammoniac. Ces émissions sont plus importantes dans les scénarios avec plus d'utilisation de MRF, ce qui explique les scores plus élevés pour cette aire de protection dans les scénarios d'agriculture biologique et d'agriculture très raisonnée.

Comme mentionné précédemment, le principal contributeur au score de l'indicateur *Qualité des écosystèmes* est l'utilisation de terres pour la production du maïs. Les différences entre scénarios proviennent des émissions d'ammoniac causant de l'acidification terrestre. Ces émissions sont plus importantes dans les scénarios avec plus d'utilisation de MRF, ce qui explique les scores plus élevés pour cette aire de protection dans le scénario bio et le scénario d'agriculture très raisonnée.

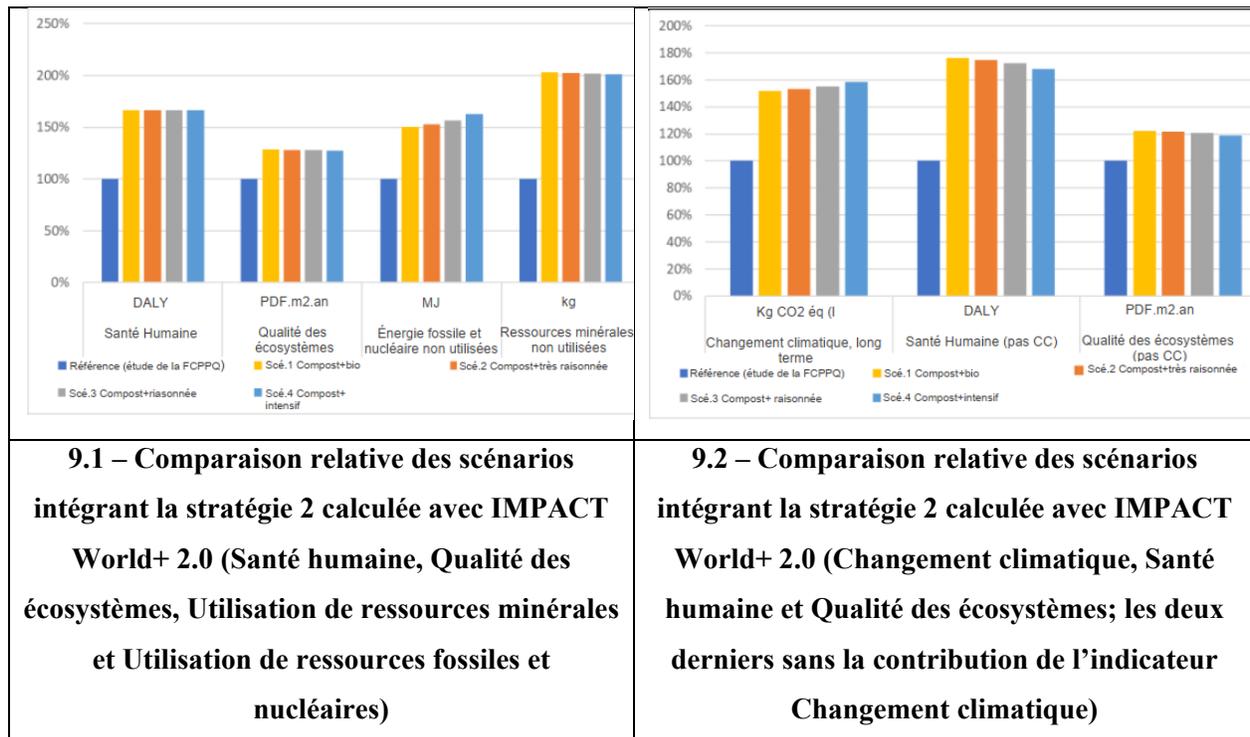
Stratégie 2

La figure 9.1 montre la comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 (utilisation de compost) avec le cas de référence pour les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* et pour les indicateurs de *midpoint* touchant les ressources (*ressources minérales et ressources fossiles et nucléaires*). On observe une augmentation des scores pour tous les scénarios qui incluent l'utilisation de compost, et ce, pour tous les indicateurs étudiés. Les augmentations sont similaires pour tous les scénarios d'application pour les deux aires de protection et l'indicateur *Ressources minérales*, avec des augmentations par rapport au scénario de référence de 67 % pour *Santé humaine*, 28 % pour *Qualité des écosystèmes* et 100 % pour *Utilisation de ressources minérales*. L'indicateur *Utilisation de ressources fossiles et nucléaires* présente des augmentations progressives qui varient entre 50 % et 63 % par rapport au scénario de référence.

Les principaux contributeurs aux scores de l'aire de protection *Santé humaine* et des deux indicateurs de consommation de ressources pour scénarios incluant l'utilisation de compost sont la production du compost, avec des contributions entre 40 % et 45 % selon l'indicateur, la consommation d'énergie de séchage et les émissions liées à l'utilisation d'engrais. Ces contributeurs sont semblables pour les quatre scénarios, la principale différence étant la quantité d'engrais minéraux utilisée.

Dans le cas de l'aire de protection *Qualité des écosystèmes*, l'utilisation de terres pour la culture reste le principal contributeur (43 % du score total), suivie par la production de compost (22 %), l'énergie de séchage (11 %) et les émissions de NH₃ issues de l'utilisation de fertilisants (9 %). Le processus de compostage engendre des émissions de méthane, de N₂O et d'ammoniac, qui sont les principaux responsables de la contribution de cet élément au score total des scénarios. Un paramètre clé de cette contribution est la quantité de compost épandu par hectare. En effet, la teneur en nutriments du compost est très faible et la réduction des quantités d'engrais minéraux et de MRF substituées est très faible et ne compense pas les impacts générés par la production du compost. De plus, comme dans le cas des MRF, la contribution aux scores d'impact du transport augmente vite dû aux quantités de compost utilisées. (Dans cette stratégie, le transport est considéré aussi comme local et sur une courte distance.) Enfin, dans le cas du compost, deux transports sont à prévoir : un premier de la matière avant le compostage vers le lieu de compostage et un second du compost vers le champ.

Figure 3.2 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 calculée avec IMPACT World+ 2.0



La figure 9.2 montre la comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 avec le cas de référence pour l'indicateur *Changement climatique* et pour les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* une fois la contribution de l'indicateur *Changement climatique* enlevée. La contribution de l'indicateur *Changement climatique* au score total des deux aires de protection varie selon le scénario : entre 48 % et 80 % pour la *Santé humaine* et entre 18 % et 30 % pour la *Qualité des écosystèmes*, donc les indicateurs présentés dans la figure ne montrent que 20-52 % et 70-82 % du score total respectivement.

L'indicateur *Changement climatique* isolé présente aussi des augmentations de score par rapport au scénario de référence, hausses qui varient entre 52 % et 58 % selon le scénario. Les principales observations concernant cet indicateur sont :

- Le transport de matières organiques et le processus de compostage contribuent à plus de 40 % du score total, dans le cas où tout l'engrais appliqué est d'origine organique [Sc. 1 bio (N)];
- Le N₂O émis au champ par les engrais appliqués est seulement marginalement modifié;
- Comme dans le cas de la stratégie 1, dans les scénarios avec plus d'engrais organiques, moins d'urée est appliquée, donc moins de CO₂ est émis au champ à cause de cet engrais spécifique. Seul reste le CO₂ issu de l'application de chaux (non affectée par les engrais utilisés).

Les principaux contributeurs au score pour l'indicateur *Santé humaine* sont les émissions d'ammoniac causant des problèmes respiratoires liées à la production de compost et, comme dans le cas de la stratégie 1, à l'utilisation de MRF.

Pour l'indicateur *Qualité des écosystèmes*, l'utilisation de terres pour la production du maïs reste le principal contributeur aux scores des différents scénarios. L'augmentation entre les scénarios intégrant la stratégie 2 et le scénario de référence proviennent des émissions d'ammoniac causant de l'acidification terrestre. La production de compost et l'utilisation de MRF sont encore une fois les sources principales de ces émissions.

Stratégie 3

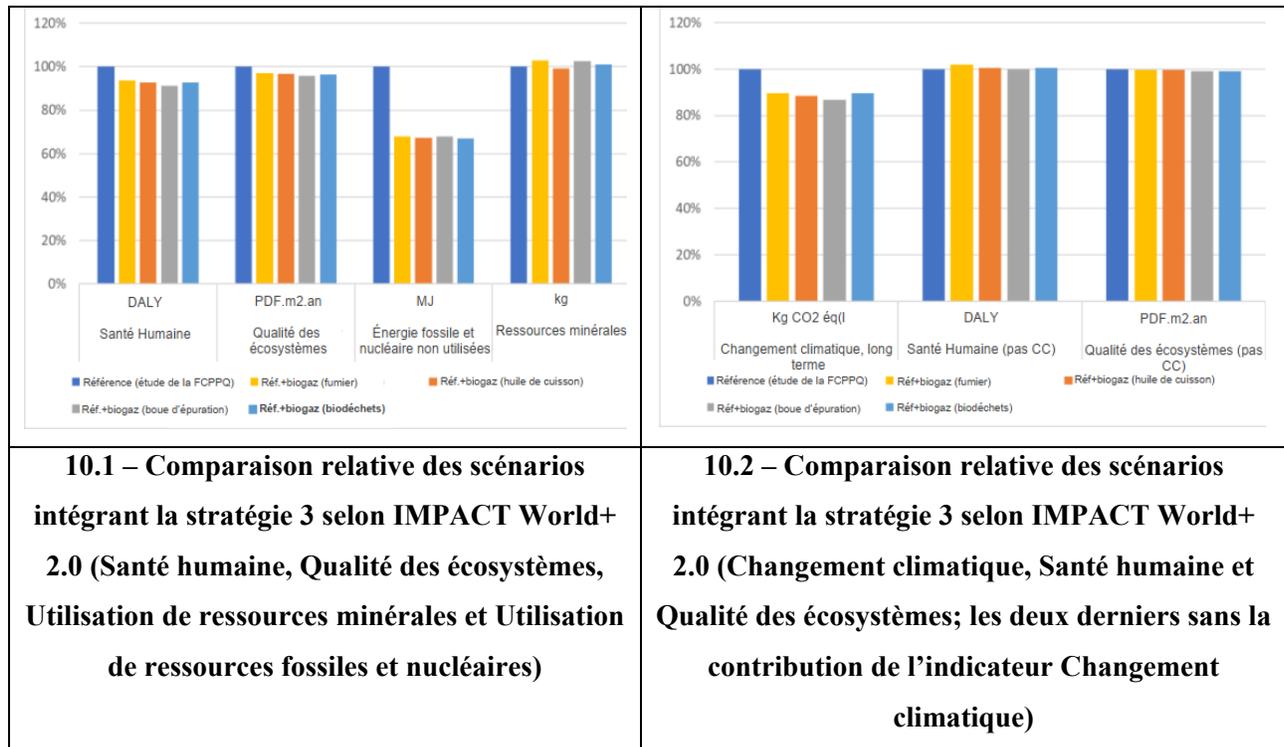
La figure 10.1 montre la comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 3 (utilisation de biogaz pour le séchage des grains) avec le cas de référence pour les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* et pour les indicateurs de *midpoint* touchant les ressources (*ressources minérales* et *ressources fossiles et nucléaires*). Les scénarios représentent différents déchets utilisés pour la production du biogaz : fumiers et lisiers, huiles usées, boues de station d'épuration d'eaux usées et déchets verts.

On observe une diminution des scores pour tous les scénarios qui incluent l'utilisation de biogaz pour les indicateurs *Santé humaine* (entre 6 % et 9 %) et *Utilisation de ressources fossiles et nucléaires* (32 %-33 %). Pour l'indicateur *Qualité des écosystèmes*, le score pour les scénarios avec biogaz reste similaire à celui du scénario de référence (diminutions de 2 % à 3 % par rapport au scénario de référence). Également, l'indicateur *Utilisation de ressources minérales* présente des valeurs similaires pour tous les scénarios comparés, avec des variations de -1 % à +3 % par rapport au scénario de référence selon le scénario observé.

Les principaux contributeurs au score pour l'indicateur *Santé humaine* sont les émissions d'ammoniac causant des problèmes respiratoires liées à l'épandage d'engrais minéraux et organiques. Le changement de source de gaz pour le séchage n'a presque pas d'influence sur cet indicateur une fois la contribution des GES enlevée.

On trouve les mêmes tendances que dans les stratégies précédentes pour l'indicateur *Qualité des écosystèmes*, où l'utilisation de terres pour la production du maïs reste le principal contributeur aux scores des différents scénarios, mais la variation de source de gaz de séchage n'a pas d'influence sur le score final.

Figure 3.3 : Comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 3 selon IMPACT World+ 2.0



La figure 10.2 montre la comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 3 avec le cas de référence pour l'indicateur *Changement climatique* et pour les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* une fois la contribution de l'indicateur *Changement climatique* enlevée.

La contribution de l'indicateur *Changement climatique* au score total des deux aires de protection varie selon le scénario, entre 52 % et 60 % pour la *Santé humaine* et entre 15 % et 18 % pour la *Qualité des écosystèmes*, donc les indicateurs présentés dans la figure ne montrent que 40-48 % et 82-85 % du score total respectivement.

L'indicateur *Changement climatique* isolé présente aussi des réductions de scores par rapport au scénario de référence qui varient entre 10 % et 13 % selon le scénario. Les principales observations concernant cet indicateur sont :

- L'utilisation de matières organiques et les émissions de CO₂ biogénique font en sorte que les scénarios avec biogaz présentent un score plus faible que le scénario de référence;
- Les émissions de GES lors de la digestion anaérobie et la quantité de matière nécessaire pour la production du biogaz sont les paramètres différenciateurs entre les scénarios avec biogaz puisque les boues de station d'épuration de la ressource ont le score le plus faible.

ANNEXE 2 : ANALYSES DE SENSIBILITÉ DÉTAILLÉES

Analyse de sensibilité 1 : méthode d'évaluation des impacts de cycle de vie (méthode ReCiPe)

L'ÉICV a été réalisée avec une seconde méthode, la méthode ReCiPe (Goedkoop et *al.*, 2008), afin de vérifier si la variabilité des modèles de caractérisation avait une influence significative sur les conclusions et, donc, de tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT World+ 2.0. En ce qui concerne les principaux contributeurs, les résultats obtenus par la méthode ReCiPe confirment généralement ceux obtenus avec la méthode IMPACT World+ 2.0, les tendances étant les mêmes pour les différents indicateurs évalués. Globalement, l'analyse de sensibilité avec la méthode d'ÉICV ReCiPe confirme les résultats de l'étude et atteste de leur robustesse.

Analyse de sensibilité 2 : distance d'approvisionnement des déchets (stratégies 1 et 3)

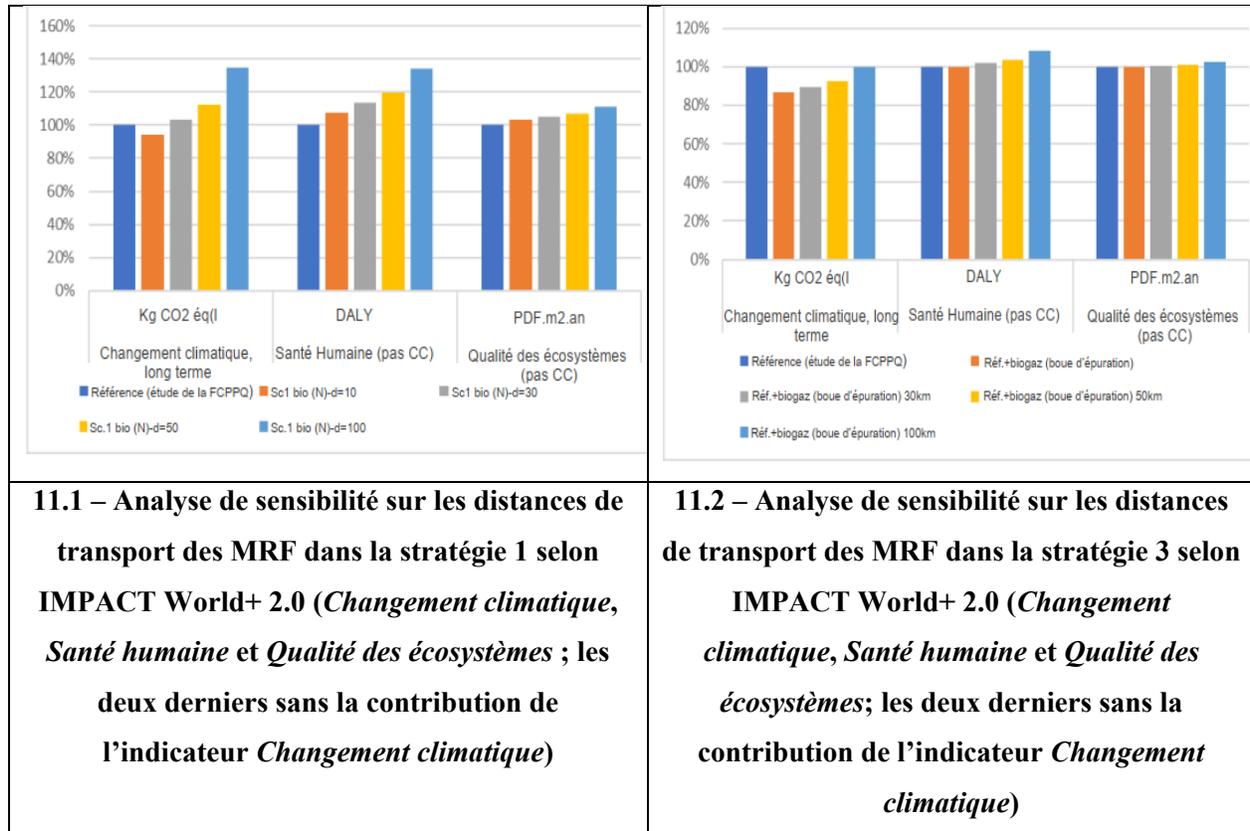
Deux des données clés lors de l'utilisation des MRF et de la production de compost et biogaz sont l'origine des déchets et la distance parcourue jusqu'au lieu de transformation et du lieu de transformation jusqu'au champ. L'hypothèse utilisée pour les trois stratégies est que l'approvisionnement se fait de façon locale, avec une distance par défaut de 10 km. Afin de tester la sensibilité de ce paramètre sur les conclusions, plusieurs distances ont été testées pour les stratégies 1 et 3. La stratégie 2 a été exclue puisque les conclusions ne changeront pas avec une augmentation de la distance.

Les résultats pour la stratégie 1 montrent une augmentation des scores avec l'augmentation de la distance de transport. En effet, la quantité de MRF étant très importante, la contribution aux scores du transport devient un des contributeurs principaux et compense rapidement les réductions de scores faites par la moindre utilisation d'engrais minéraux. La figure 11.1 montre les résultats de l'analyse de sensibilité pour le scénario d'agriculture biologique quand la distance de transport augmente à 30, 50 et 100 km. On observe qu'à partir de 30 km, le score du scénario d'agriculture biologique égalise celui du scénario de référence pour l'indicateur *Changement climatique*, qui était le seul, avec *Utilisation de ressources fossiles*, qui présentait une réduction de scores dans les résultats principaux de l'étude.

Les résultats pour la stratégie 3 montrent une augmentation des scores avec l'augmentation remarquable de la distance de transport principalement pour la catégorie *Changement climatique*. La figure 11.2 montre les résultats de l'analyse de sensibilité pour le scénario avec biogaz à partir de boues de station d'épuration quand la distance de transport augmente à 30, 50 et 100 km. On observe qu'à partir de 100 km, le score égalise celui du scénario de référence pour l'indicateur *Changement climatique* et devient 10 % plus haut pour l'indicateur *Santé humaine*.

Globalement, cette analyse de sensibilité permet de montrer l'importance du paramètre sur les avantages des différentes stratégies et d'un approvisionnement le plus local possible.

Figure 3.4 : Analyse de sensibilité sur les distances de transport des MRF dans les stratégies 1 et 3



Analyse de sensibilité 3 : inclusion du traitement évité par l'implantation des stratégies de circularité

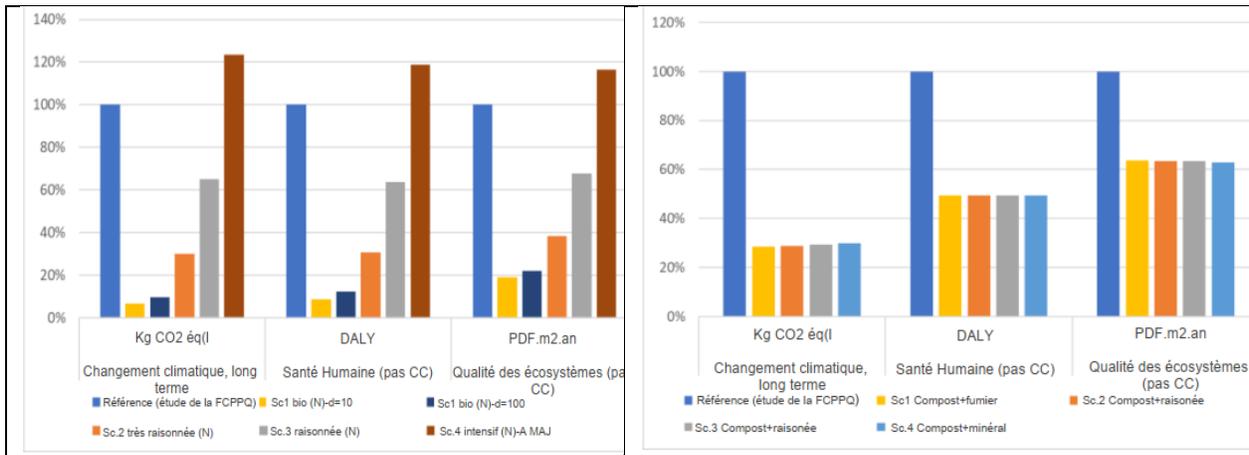
Étant donné le contexte d'ÉC de cette étude, il faut considérer que les déchets qui entrent dans des boucles de circularité vont permettre d'éviter des pratiques moins circulaires (enfouissement, stockage, etc.).

L'hypothèse initiale, qui considère les déchets sans impacts et ne tient pas compte de la fonction secondaire de traitement dans le système, est testée dans cette analyse de sensibilité. Pour ce faire, on inclut dans le système la fonction de traitement de déchets et, dans la stratégie 3, le scénario de référence n'inclut pas seulement la production de 1 kg de maïs, mais aussi la gestion des déchets utilisés dans la production de biogaz des scénarios intégrant la stratégie de circularité.

Dans tous les cas, la pire situation est choisie pour modéliser la gestion des déchets, c'est-à-dire que les déchets sont considérés comme gérés en fin de vie sans valorisation (enfouis ou stockés). Dans le cas des

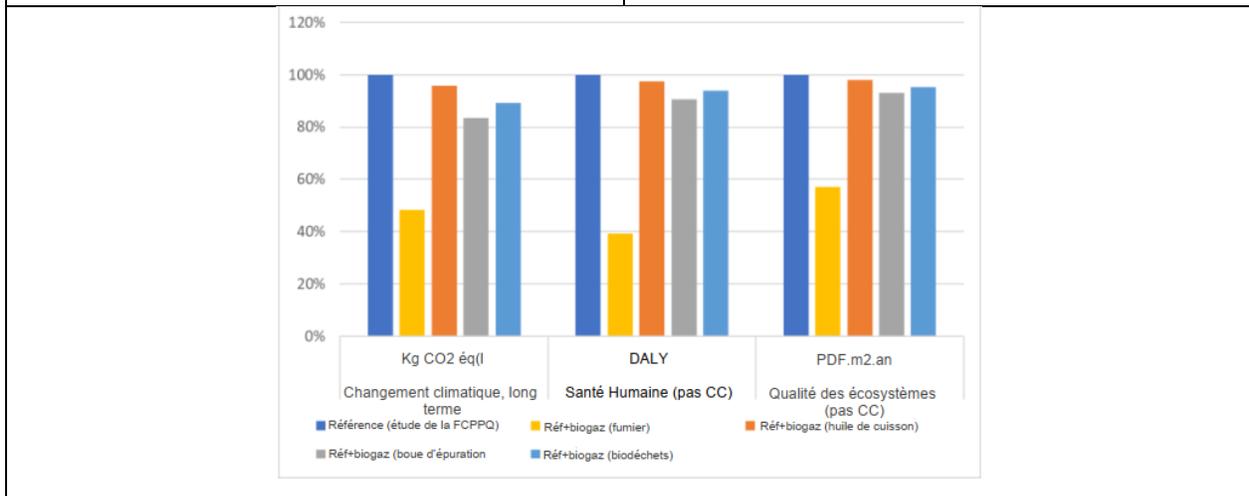
MRF valorisées dans la stratégie 1, on considère que les fumiers et lisiers sont stockés par lagunage ou dans des puits secs. Les données utilisées pour la modélisation ainsi que les technologies utilisées proviennent de la World Food Database (Nemecek et al., 2015).

Figure 3.5 : Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant les stratégies 1, 2 et 3 avec l'inclusion de la fonction de gestion des déchets



12.1 – Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 1 avec l'inclusion de la fonction de gestion des déchets selon IMPACT World+ 2.0 (Changement climatique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes ; les deux derniers sans la contribution de l'indicateur *Changement climatique*)

12.2 – Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 avec l'inclusion de la fonction de gestion des déchets selon IMPACT World+ 2.0 (Changement climatique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes ; les deux derniers sans la contribution de l'indicateur *Changement climatique*)



12.3 – Analyse de sensibilité : comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 3 avec l’inclusion de la fonction de gestion des déchets selon IMPACT World+ 2.0 (*Changement climatique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes*; les deux derniers sans la contribution de l’indicateur *Changement climatique*)

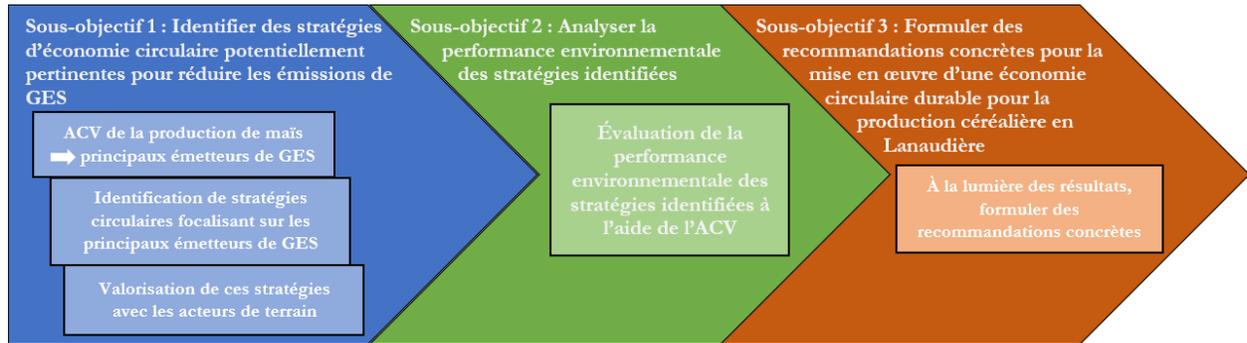
La figure 12.1 montre la comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 1 avec le cas de référence pour l’indicateur *Changement climatique* et pour les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* une fois la contribution de l’indicateur *Changement climatique* enlevée. On observe que les scénarios intégrant la stratégie 1 présentent des scores plus faibles que le scénario de référence ou le scénario d’agriculture intensive (qui n’utilise que des engrais minéraux). En effet, les émissions liées à la gestion des quantités de MRF utilisées dans le scénario d’agriculture biologique font augmenter le score pour tous les autres scénarios. La figure inclut aussi un scénario d’agriculture biologique avec un approvisionnement en MRF à 100 km qui apparaît comme le deuxième score le plus bas.

Dans le cas de déchets organiques compostés dans la stratégie 2, on considère qu’ils sont enfouis. Les données utilisées pour la modélisation ainsi que les technologies utilisées proviennent d’ecoinvent. La figure 12.2 montre la comparaison relative des scénarios intégrant la stratégie 2 avec le cas de référence pour l’indicateur *Changement climatique* et pour les aires de protection *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* une fois la contribution de l’indicateur *Changement climatique* enlevée. Comme dans la stratégie 1, les scénarios intégrant la stratégie 2 présentent des scores plus faibles que le scénario de référence. En effet, les émissions liées à la gestion des quantités de déchets organiques utilisées pour produire le compost font augmenter le score pour tous les autres scénarios.

Pour la stratégie 3, les boues, les huiles usées et les déchets organiques sont considérés comme enfouis alors que le fumier est considéré comme stocké en lagunes de décantation ou en puits secs. Afin de faire tous les scénarios fonctionnellement équivalents, chaque scénario avec du biogaz gère aussi les matières utilisées pour la production de biogaz des autres scénarios. (Par exemple, le scénario qui utilise le fumier pour produire le biogaz gère par lagunage et par puits sec le fumier et lisier, et par enfouissement les huiles usées et les déchets organiques.) Les résultats montrent des tendances similaires aux deux autres stratégies, avec une diminution des scores par rapport au scénario de référence, et ce, pour tous les scénarios et indicateurs (figure 12.3). Dans ce cas, les différences avec le scénario de référence sont moins marquées en raison de l’inclusion de la gestion des autres déchets.

Cette analyse de sensibilité illustre l'importance d'inclure la fonction secondaire de gestion de déchets et montre que l'implantation de la stratégie de circularité et, donc, la diminution des modes de gestion avec perte de circularité diminuent les scores du système pour tous les indicateurs étudiés.

ANNEXE 3 : Figure 3.6 - Diagramme récapitulatif de la méthodologie



ANNEXE 4 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE LA PRODUCTION DES SIX GRAINS

Figure 4.7 : CONTRIBUTION DES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE DE LA PRODUCTION DES SIX GRAINS ET PRINCIPAUX CONTRIBUTEURS

RÉSULTATS POUR LE BLÉ FOURRAGER

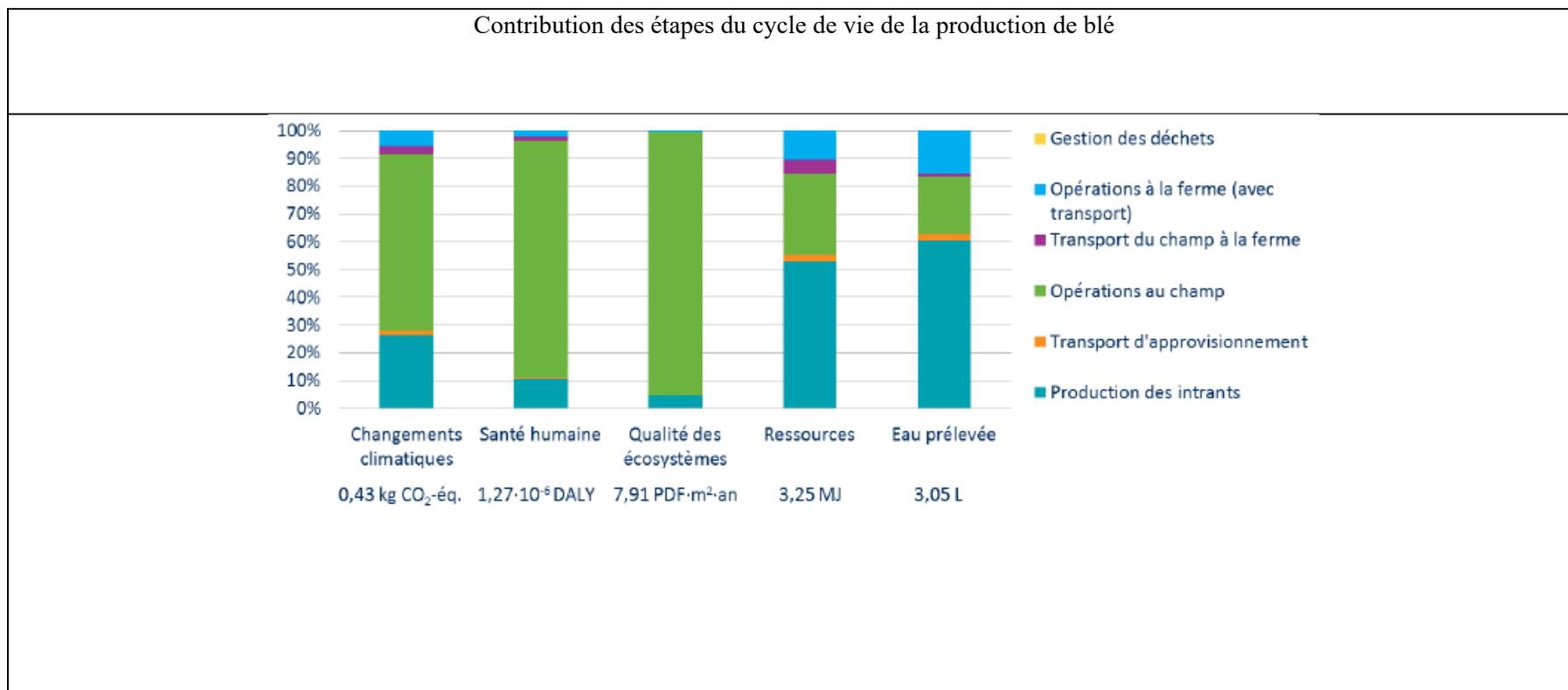
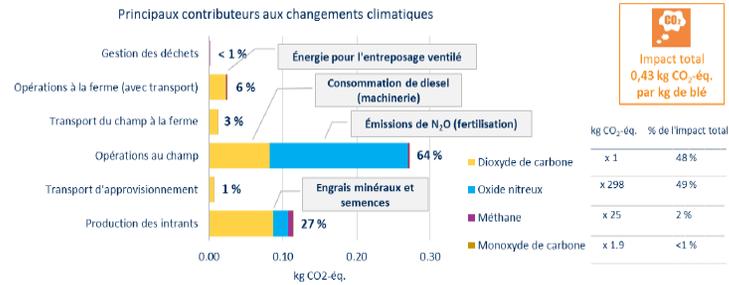


Figure A-1 : Bilan environnemental de la production de 1 kg de blé fourrager au Québec

Principaux contributeurs aux changements climatiques



Principaux contributeurs à la santé humaines

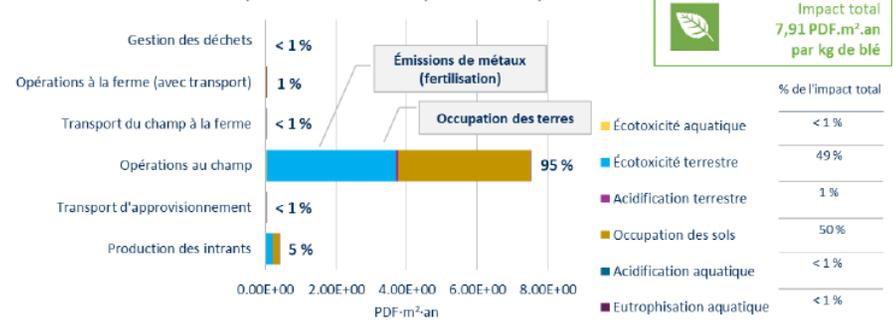


Figure A-2 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de blé au Québec aux changements climatiques

Figure A-3 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de blé au Québec à l'impact sur la santé humaine

Principaux contributeurs à l'écosystème

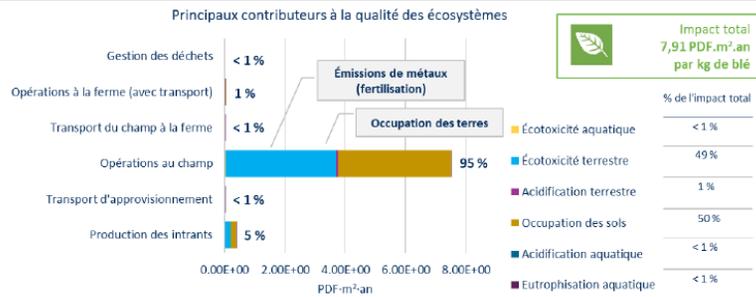


Figure A-4 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de blé au Québec à l'impact sur la qualité des écosystèmes

Principaux contributeurs aux ressources

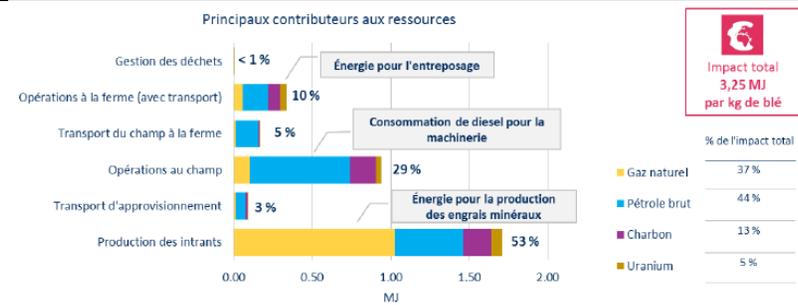


Figure A-5 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de blé au Québec à l'impact sur la qualité des écosystèmes

Principaux contributeurs à l'eau prélevée

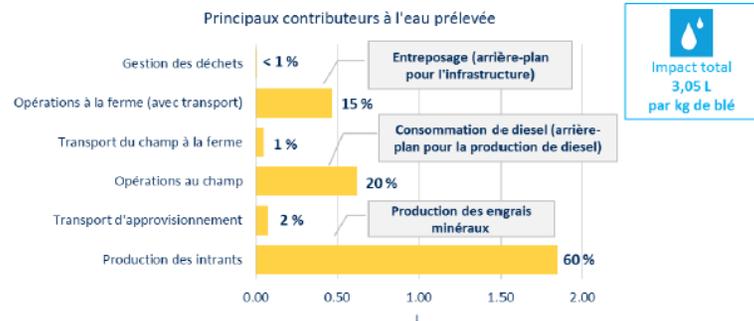
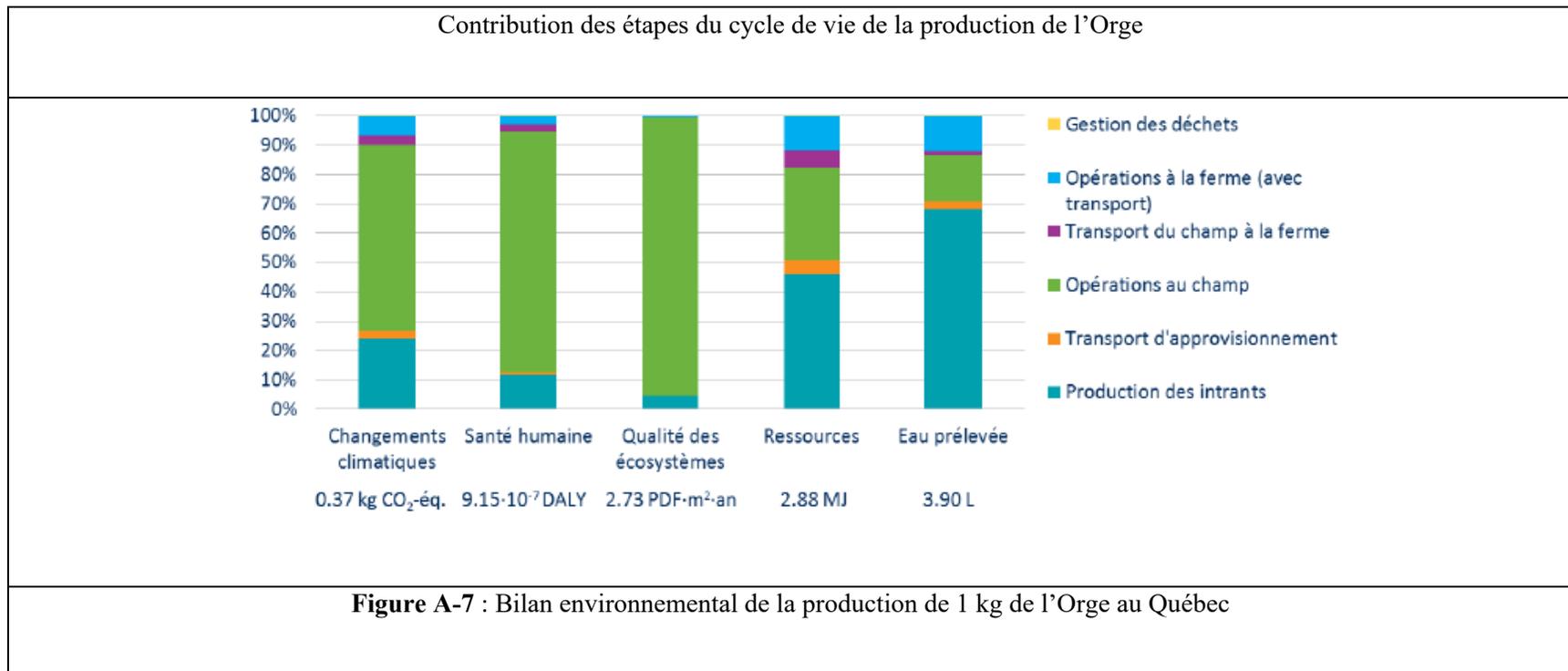


Figure A-6 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de blé au Québec à l'impact sur l'eau prélevée

RÉSULTATS POUR L'ORGE



Principaux contributeurs aux changements climatiques

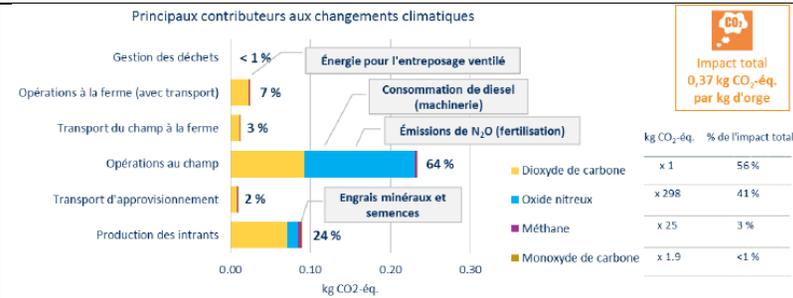


Figure A-8 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'Orge au Québec aux changements climatiques

Principaux contributeurs à la santé humaine

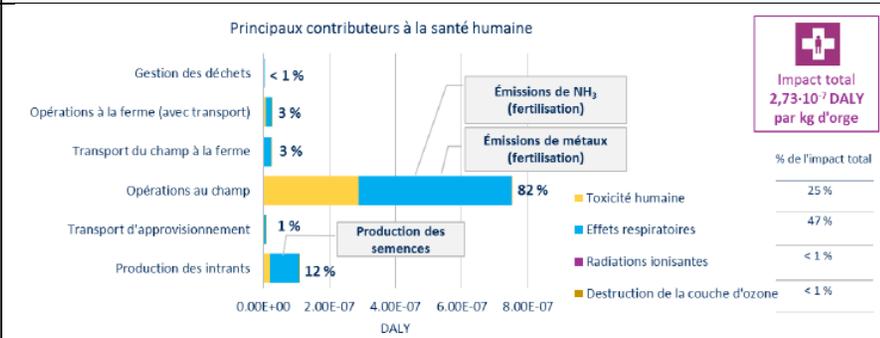


Figure A-9 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'Orge au Québec à l'impact sur la santé humaine

Principaux contributeurs à l'écosystème

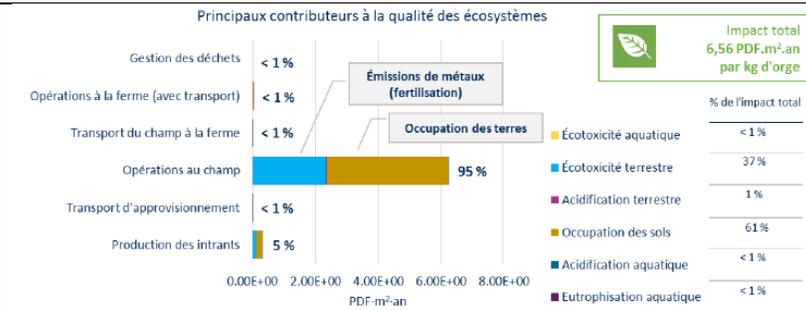


Figure A-10 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'Orge au Québec à l'impact sur la qualité des écosystèmes.

Principaux contributeurs aux ressources

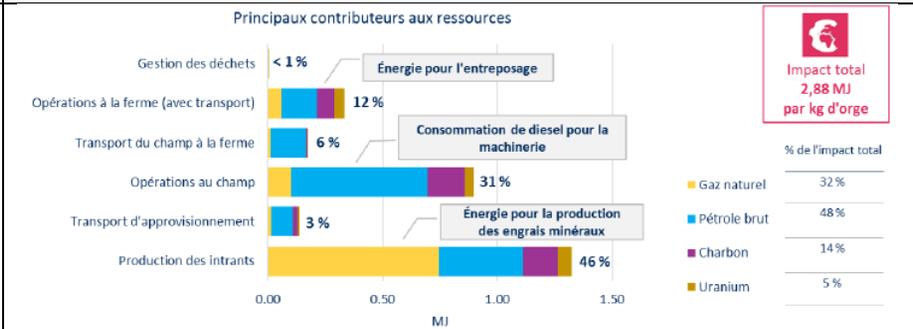


Figure A-11 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'Orge au Québec à l'impact sur la qualité des écosystèmes.

Principaux contributeurs à l'eau prélevée

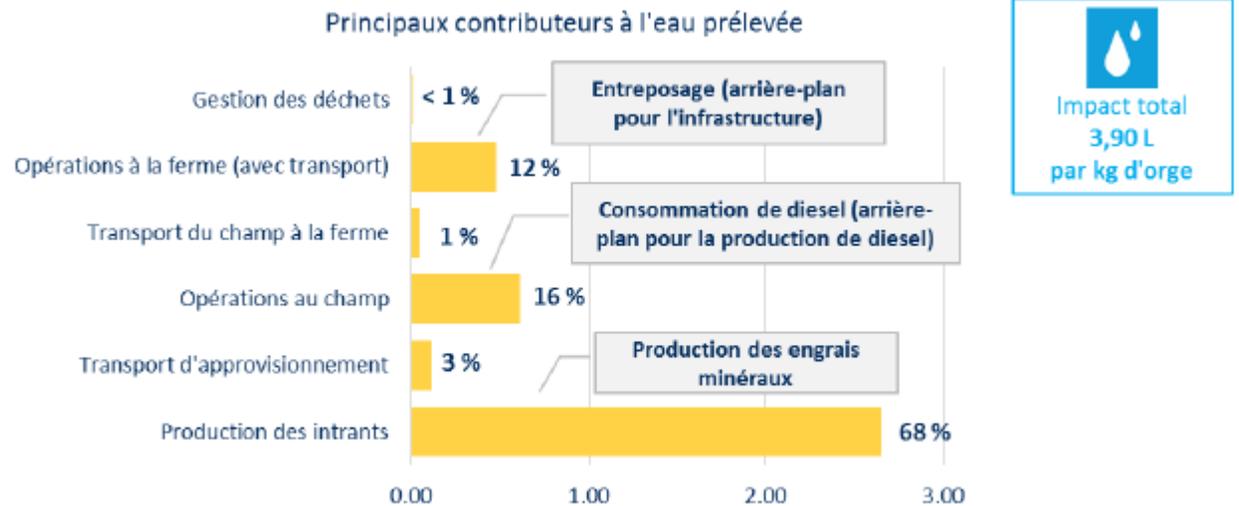
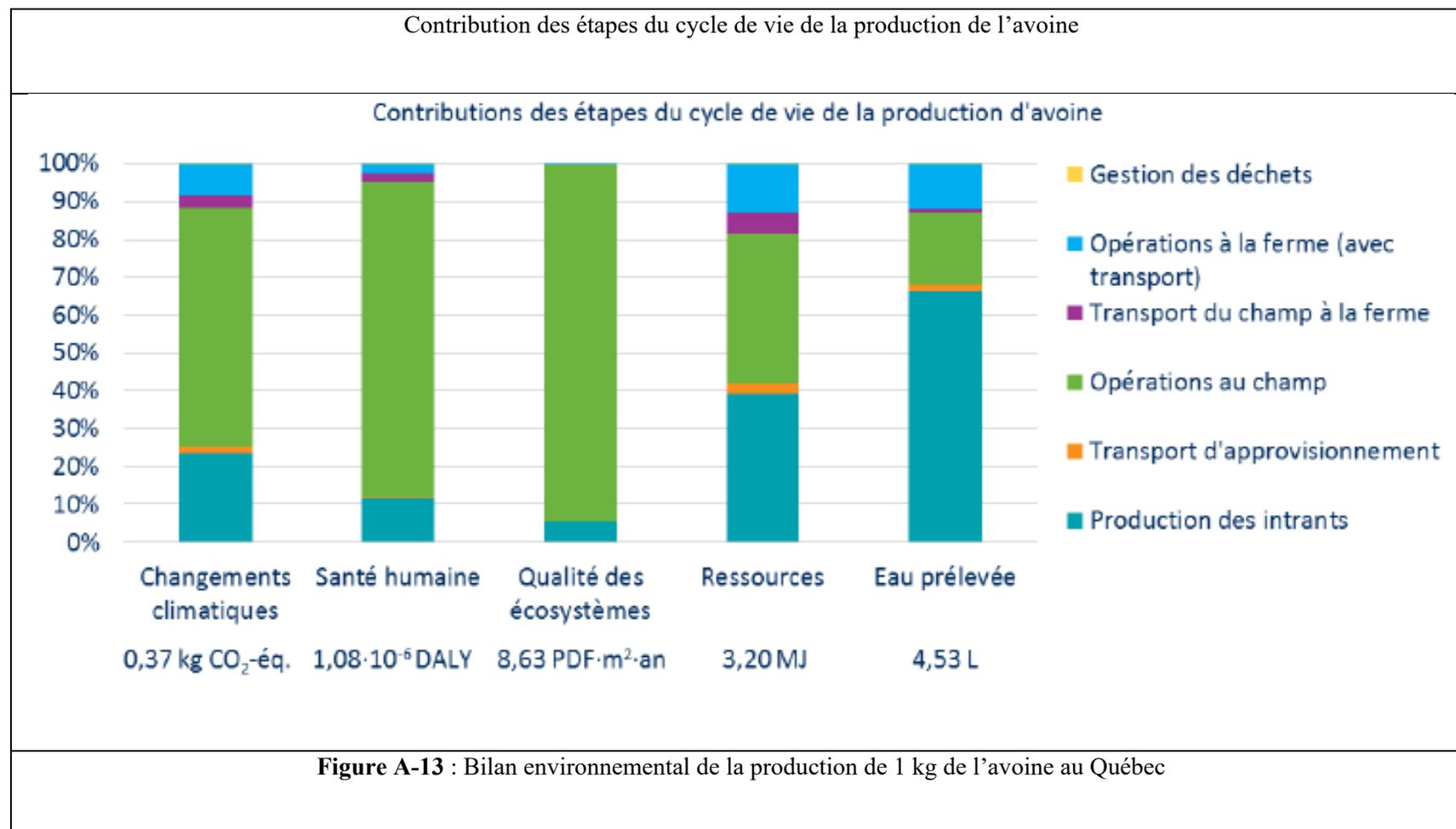


Figure A-12 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'Orge au Québec à l'impact sur l'eau prélevée

RÉSULTATS POUR L'AVOINE



Principaux contributeurs aux changements climatiques

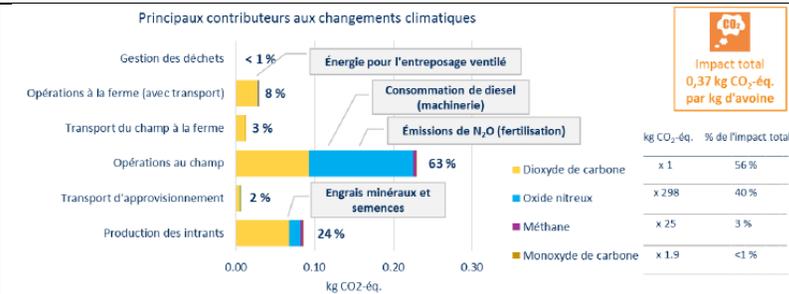


Figure A-14 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'avoine au Québec aux changements climatiques

Principaux contributeurs à la santé humaine

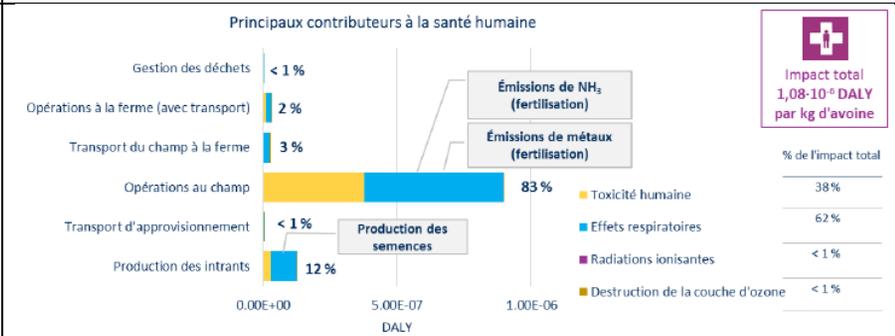


Figure A-15 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'avoine au Québec à l'impact sur la santé humaine

Principaux contributeurs à l'écosystème

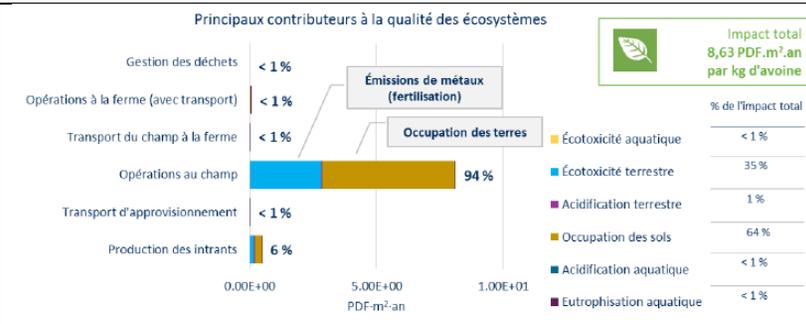


Figure A-16 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'avoine au Québec à l'impact sur la qualité des écosystèmes.

Principaux contributeurs aux ressources

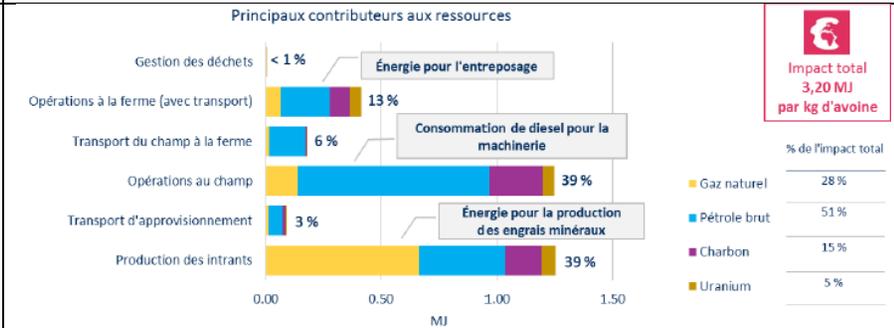


Figure A-17 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'avoine au Québec à l'impact sur la qualité des écosystèmes.

Principaux contributeurs à l'eau prélevée

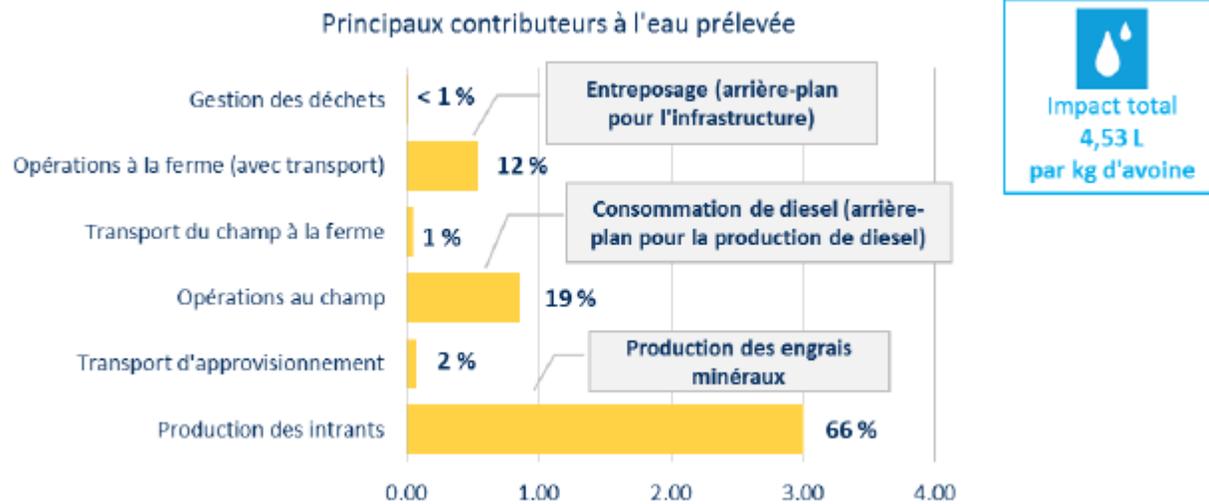
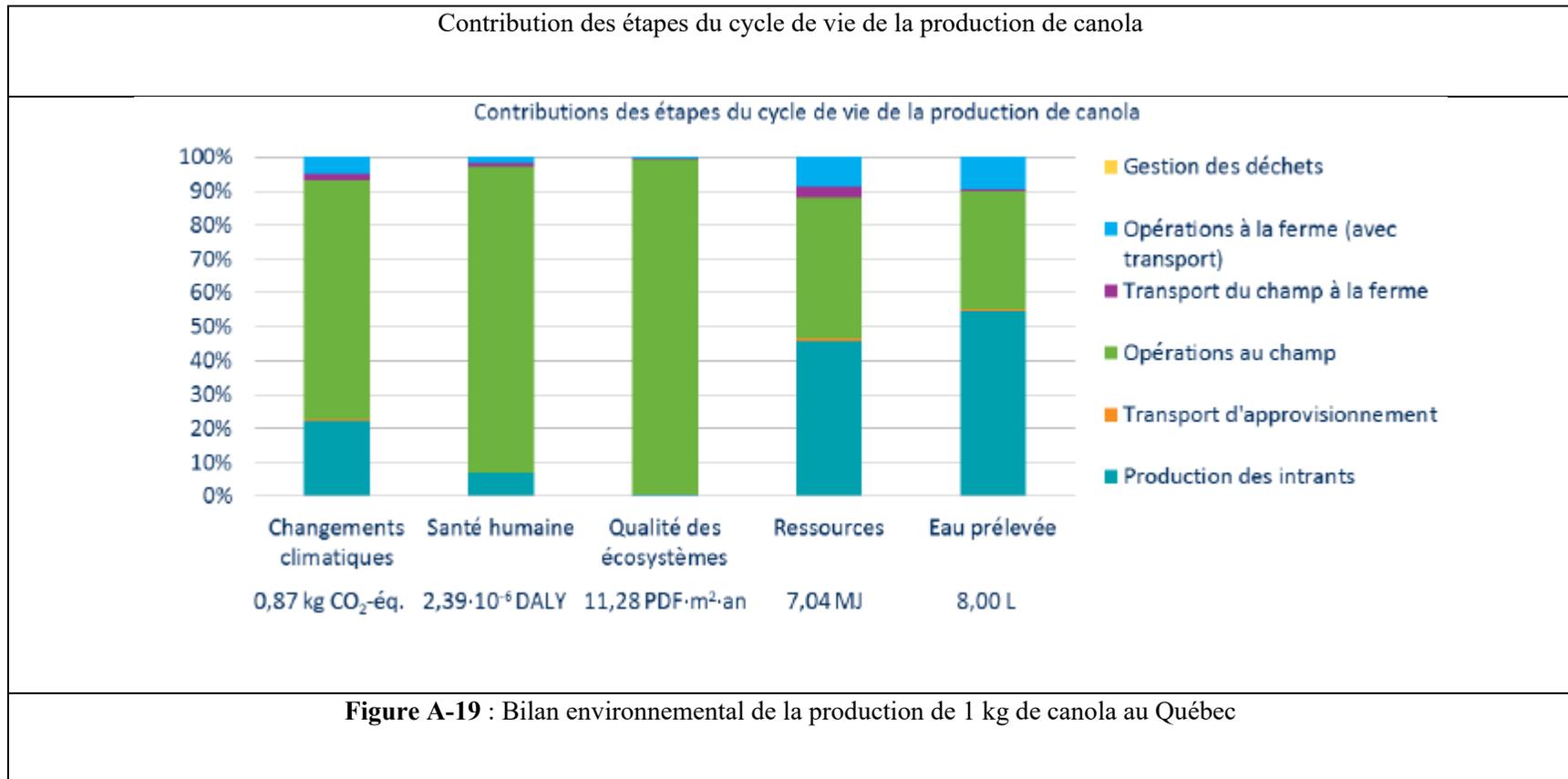


Figure A-18 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg de l'avoine au Québec à l'impact sur l'eau prélevée

RÉSULTATS POUR LE CANOLA



Principaux contributeurs aux changements climatiques

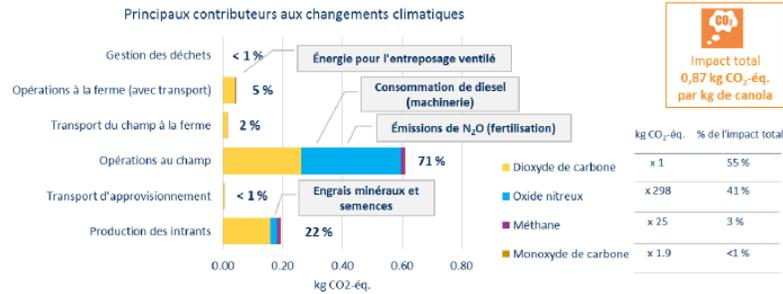


Figure A-20 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg du canola au Québec aux changements climatiques

Principaux contributeurs à la santé humaine

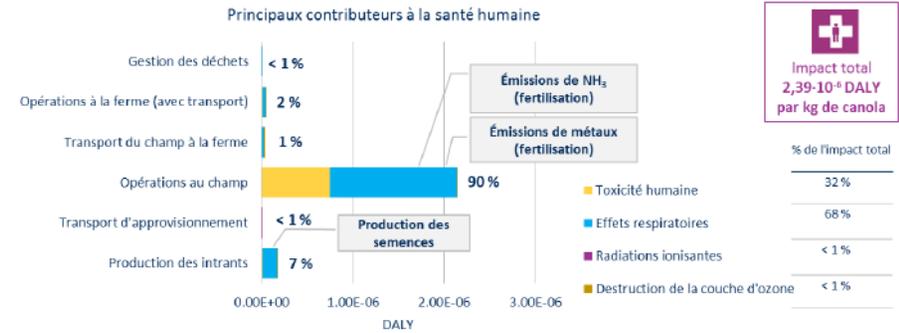


Figure A-20 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg du canola au Québec à l'impact sur la santé humaine

Principaux contributeurs à l'écosystème

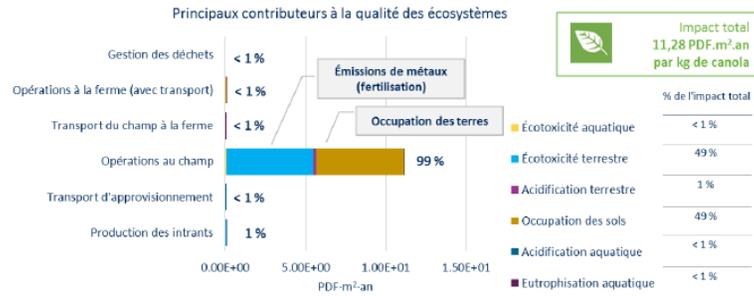


Figure A-21 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg du canola au Québec à l'impact sur la qualité des écosystèmes.

Principaux contributeurs aux ressources

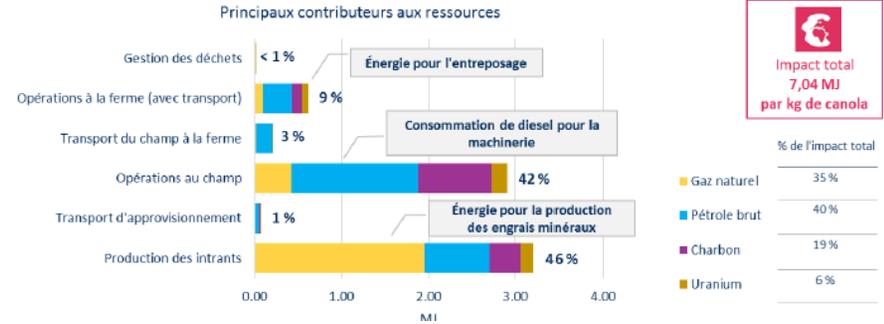


Figure A-22 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg du canola au Québec à l'impact sur la qualité des écosystèmes.

Principaux contributeurs à l'eau prélevée

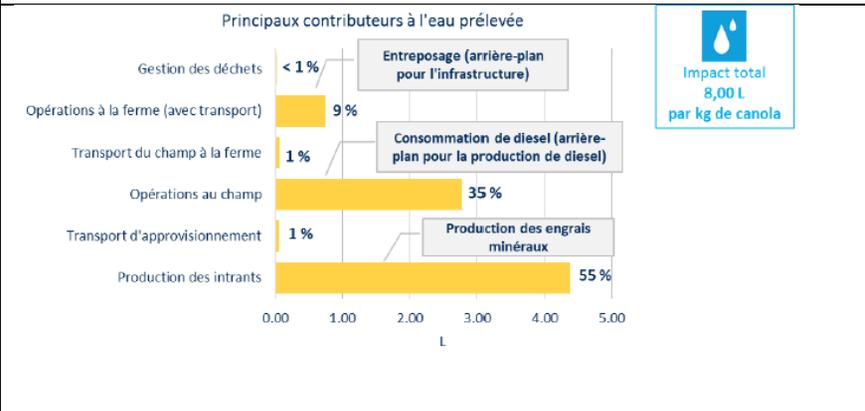


Figure A-23 : Principaux contributeurs (étapes et substances) du cycle de vie de la production de 1 kg du canola au Québec à l'impact sur l'eau prélevée

Tableau 4.1 : AUTRES STRATÉGIES CIRCULAIRES INVENTORIÉES DANS LA LITTÉRATURE

Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
Application d'engrais /	Scénariser l'épandage des engrais minéraux conventionnels et le travail du sol (référence de base)	-	Réduire les émissions de NH ₃ , N ₂ O, NO _x , et NO ₃	Minimum Moyen ou Maximum	<ul style="list-style-type: none"> -Mode d'épandage (Aspersion basse, injection & moyen) -Délai d'incorporation (Incorporation immédiate & Pas d'incorporation) -Période d'épandage Automne et/ou Printemps) -Travail du sol (conventionnel, labour réduit, sans labour)

Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
Substitution des engrais chimiques synthétiques par des engrais organiques (composts ou fumier ou lisier)	Scénariser utilisation biomasse ligneuse aérienne et souterraine (compostage)	EC 2.3 - Donner une nouvelle vie aux ressources	Réduire les émissions de CO2	Minimum Moyen ou Maximum	-Mode d'épandage (?) -Délai immédiate selon autre planification -Période (Automne et/ou Printemps) -Travail du sol (conventionnel, labour réduit, sans labour)

Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
	Scénariser combustion de biomasse herbacée	EC 2.3 - Donner une nouvelle vie aux ressources	Réduire les émissions de CO2	Minimum Moyen ou Maximum	<ul style="list-style-type: none"> -Mode d'épandage (Aspersion basse, injection & moyen) -Délai d'incorporation (Incorporation immédiate & Pas d'incorporation) -Période d'épandage Automne et/ou Printemps) -Travail du sol (conventionnel, labour réduit, sans labour)

Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
	Scénariser l'épandage des engrais organiques (lisier) et le travail du sol	EC 2.3 - Donner une nouvelle vie aux ressources	Réduire les émissions de CO2	Minimum Moyen ou Maximum	<ul style="list-style-type: none"> -Mode d'épandage (Aspersion basse, injection & moyen) -Délai d'incorporation (Incorporation immédiate & Pas d'incorporation) -Période d'épandage Automne et/ou Printemps) -Travail du sol (conventionnel, labour réduit, sans labour)

Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
	Scénariser les émissions de CO2 de la matière organique morte au sol.	EC 2.3 - Donner une nouvelle vie aux ressources	Réduire les émissions de CO2	Minimum Moyen Ou Maximum	-Mode d'épandage (Aspersion basse, injection & moyen) -Délai d'incorporation (Incorporation immédiate & Pas d'incorporation) -Période d'épandage Automne et/ou Printemps) -Travail du sol (conventionnel, labour réduit, sans labour)
Application des pesticides (Phytoprotection) / Remplacer des fongicides chimiques par des fongicides naturels	Scénariser l'application de pesticides naturel vinaigre (paille de blé, dilué x fois) ,	EC 2.3 - Donner une nouvelle vie aux ressources	Evaluer niveau de diminution du taux d'infection du blé et sa teneur en désoxynivalénol	Minimum Moyen ou Maximum	-Mode d'épandage (Aspersion basse, injection & moyen) -Délai d'incorporation (Incorporation immédiate & Pas d'incorporation) -Période d'épandage Automne et/ou Printemps)

Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
Séchage de grains au champ	Scénariser divers mode de séchage et de l'entreposage ventilé des grains	EC 2.3 - Donner une nouvelle vie aux ressources	Réduire les émissions de CO2	Minimum Moyen ou Maximum	Mode appliqué et selon planification la plus efficace
Machinerie / maintenance / infrastructures	Scénariser mutualisation de machinerie entre fermes voisines	EC 2.1 Utiliser les produits plus fréquemment	-Réduire consommation de diesel -Réduire les émissions de CO2	Minimum Moyen ou Maximum	-Mode d'utilisation appliqué et selon planification la plus efficace

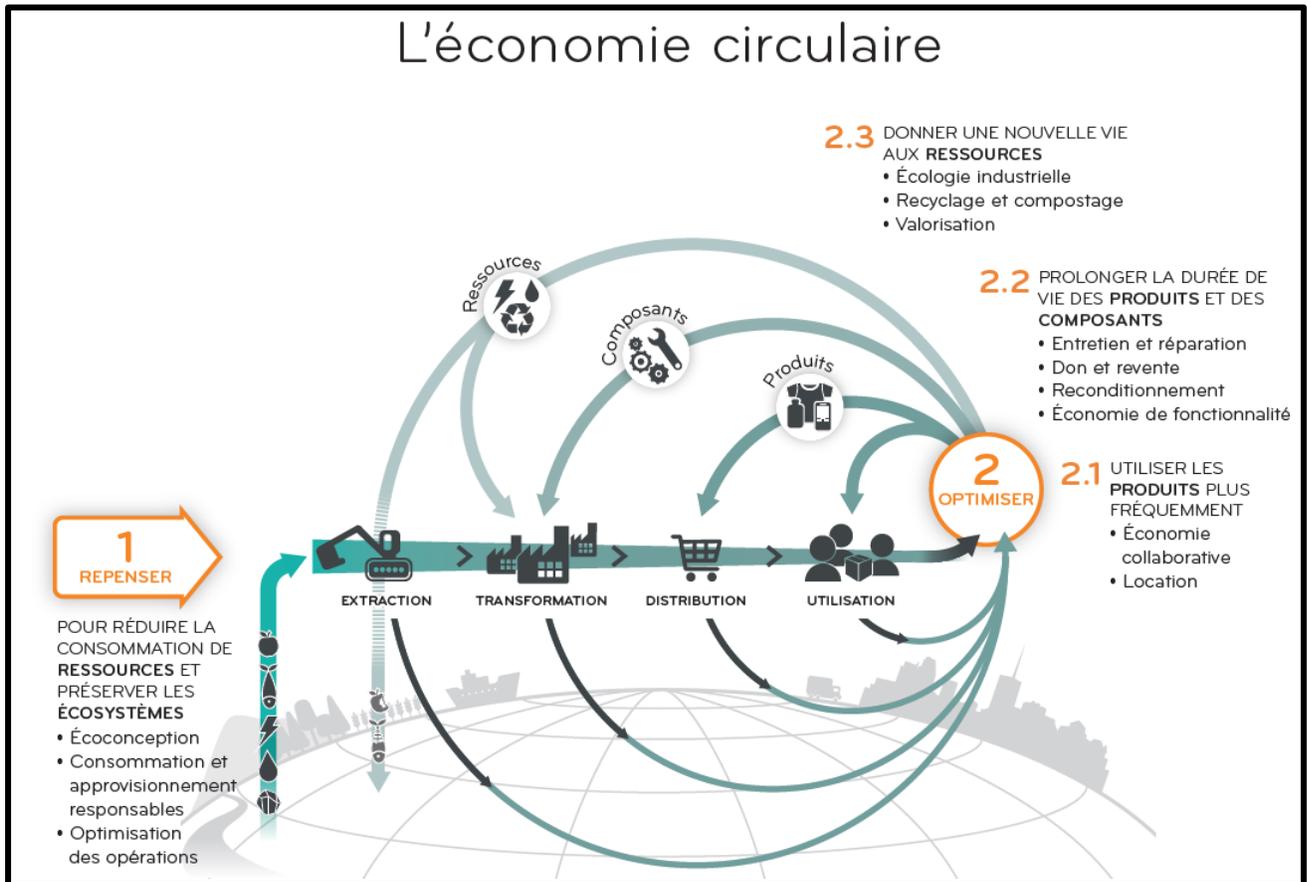
Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
(consommation diésel, propane électricité)	Charrue réversible (ou semi-portée) (sol loameux)	EC 2.1 Utiliser les produits plus fréquemment	-Réduire les émissions de CO2 -Réduire consommation de diesel	Minimum Moyen ou Maximum	-Mode d'utilisation appliqué et selon planification la plus efficace
	Pulvérisateur	EC 2.1 Utiliser les produits plus fréquemment	-Réduire les émissions de CO2 -Réduire consommation de diesel	Minimum Moyen ou Maximum	-Mode d'utilisation appliqué et selon planification la plus efficace

Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
	Moissonneuse-batteuse maïs avec nez récolteur et capteur de rendement	EC 2.1 Utiliser les produits plus fréquemment	-Réduire les émissions de CO2 -Réduire consommation de diesel	Minimum Moyen ou Maximum	-Mode d'utilisation appliqué et selon planification la plus efficace
	Transport grain du champ au bord de la route	EC 2.1 Utiliser les produits plus fréquemment	-Réduire les émissions de CO2 -Réduire consommation de diesel	Minimum Moyen ou Maximum	-Mode d'utilisation appliqué et selon planification la plus efficace

Contributeur/ Stratégies	Scénarios	Lien avec Schéma IEDDEC	Bénéfices environnementaux visés	Rendement	Scenarios de simapro
-----------------------------	-----------	----------------------------	-------------------------------------	-----------	----------------------

Source : American Society of Agriculture and Biological Engineers 2021

Figure 4.8 : L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE SELON P'IEDDEC ET RECYC-QUEBEC



Source : Institut EDDEC, 2015 En collaboration avec Recyc-Québec

CHAPITRE 6

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alexandratos, N. (s. d.). *World Agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision* (Rapport n°12-03).
- Al-Wahaibi, A., Osman, A. I., Al-Muhtaseb, A. H., Alqaisi, O., Baawain, M., Fawzy, S. et Rooney, D. W. (2020). Techno-economic evaluation of biogas production from food waste via anaerobic digestion. *Scientific Reports*, 10(1), 15719. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72897-5>
- Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., García-Arca, D. et López-Felices, B. (2020). Identification of Opportunities for Applying the Circular Economy to Intensive Agriculture in Almería (South-East Spain). *Agronomy*, 10(10), 1499. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101499>
- Belzile et al. (2014). Développement de la production et de la compétitivité des grains (alimentaires) de spécialité au Québec. Rapport final IRDA, 70p.
- Boon, E. K. et Anuga, S. W. (2020). Circular Economy and Its Relevance for Improving Food and Nutrition Security in Sub-Saharan Africa: the Case of Ghana. *Materials Circular Economy*, 2(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00005-z>
- Bourguignon, D. et al., (2016). *Closing the Loop: New Circular Economy Package*; European Parliamentary Research Service: Brussels, Belgium, 2016. Available online: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI\(2016\)573899_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI(2016)573899_EN.pdf)(accessed on 12 February 2021).
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., Cao, V., Hauschild, M., Henderson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A., Laurent, A., Levasseur, A., Liard, G., Rosenbaum, R. K., Roy, P.-O., Shaked, S., Fantke, P. et Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(9), 1653-1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Centre de transfert de technologie en écologie industrielle (CTTÉI). (2022). *Étude de caractérisation de la filière bioalimentaire de Lanaudière* [Rapport n° AT649]. Conseil de développement bioalimentaire de Lanaudière. https://cdbl.ca/wp-content/uploads/2022/10/RAPPORT-FINAL_ETUDE-CARACTERISATION_2022.pdf.
- Ceratti, M. *Dos Planetas Más Para Poder Vivir En Este*; World Bank: Washington, DC, USA, (2016). Available online: [Gulf Cooperation Council : Development news, research, data | World Bank](https://www.gulfcooperationcouncil.org/development-news-research-data/world-bank/)(accessed on February 12 2021).
- Chioatto, E. et Sospiro, P. (2023). Transition from waste management to circular economy: the European Union roadmap. *Environment, Development and Sustainability*, 25(1), 249-276. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02050-3>

- CIRAIG et Groupe AGÉCO. (2015). *Analyse du cycle de vie pour le secteur des grains du Québec* [Sommaire]. Producteurs de grains du Québec. https://www.pgq.ca/media/199413/depliant_acv_final.pdf
- Chojnacka, K., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., Skrzypczak, D., Mikula, K. et Loizidou, M. (2020). A transition from conventional irrigation to fertigation with reclaimed wastewater: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109959>
- Dahiya, S., Katakojwala, R., Ramakrishna, S. et Mohan, S. V. (2020). Biobased Products and Life Cycle Assessment in the Context of Circular Economy and Sustainability. *Materials Circular Economy*, 2(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00007-x>
- Elia, V., Gnoni, M. G. et Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2741-2751. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196>
- Ellen MacArthur Foundation (2019) What is circular economy? Retrieved from www.ellenmacarthurfoundation.org/what-is-circular-economy ; 10 February 2021
- Fantin, V., Righi, S., Rondini, I. et Masoni, P. (2017). Environmental assessment of wheat and maize production in an Italian farmers' cooperative. *Journal of Cleaner Production*, 140, 631-643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.136>
- GIEC/IPCC (2007), "Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability, contribution of working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change", Cambridge University Press, Cambridge, p. 976
- Goedkoop, M. J., Heijungs, R. et Huijbregts, M. A. (2008). *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, Pays-Bas. https://www.researchgate.net/publication/302559709_ReCiPE_2008_A_life_cycle_impact_assessment_method_which_comprises_harmonised_category_indicators_at_the_midpoint_and_the_endpoint_level
- Ghisellini, P., Cialani, C. et Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gouvernement du Québec, G. (2019). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990*. Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2017/inventaire1990-2017.pdf>
- Hébert, Marc, 2015. Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes : *Critères de référence et normes réglementaires* – Édition 2015. Québec. ISBN- 978-2-550-72954-9, 216 pages.

- HÉBERT, M. et N. BRETON (2008). Recyclage agricole des cendres de bois au Québec – État de situation et bonnes pratiques agro-environnementales, *agrosolutions*, vol. 19, No 2. [Enligne].
- Hoa, D.T.T. (2013), “The impact of climate change on the rice industry in Lao Cai province and proposed response solutions”, Master of Science thesis, Ha Noi National University.
- Hoekstra, A. Y. et Chapagain, A. K. (2006). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. Dans E. Craswell, M. Bonnell, D. Bossio, S. Demuth et N. Van De Giesen (dir.), *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change* (p. 35-48). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1_3
- Huynh, H. T. L., Nguyen Thi, L. et Dinh Hoang, N. (2020). Assessing the impact of climate change on agriculture in Quang Nam Province, Viet Nam using modeling approach. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 12(5), 757-771. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-03-2020-0027>
- Janik, A., Ryszko, A. et Szafraniec, M. (2020). Greenhouse Gases and Circular Economy Issues in Sustainability Reports from the Energy Sector in the European Union. *Energies*, 13(22), 5993. <https://doi.org/10.3390/en13225993>
- Jing, Q., Huffman, T., Shang, J., Liu, J., Pattey, E., Morrison, M. J., Jégo, G. et Qian, B. (2017). Modelling soybean yield responses to seeding date under projected climate change scenarios. *Canadian Journal of Plant Science*, CJPS-2017-0065. <https://doi.org/10.1139/CJPS-2017-0065>
- Jolliet et al., (2017). *Analyse du cycle de vie comprendre et réaliser un écobilan*. Lausanne : PU POLYTECHNIQUE. Éditeur Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, Édition, 3e édition mise à jour et augmentée, Format, 1 vol. (IX-340 p.) : ill., tabl., cartes, couv. ill. encoul.; 24 cm.
- Kumar Sarangi, P., Subudhi, S., Bhatia, L., Saha, K., Mudgil, D., Prasad Shadangi, K., Srivastava, R. K., Pattnaik, B. et Arya, R. K. (2022). Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 8526-8539. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20669-1>
- Kurniawan, T. A., Liang, X., O’Callaghan, E., Goh, H., Othman, M. H. D., Avtar, R. et Kusworo, T. D. (2022). Transformation of Solid Waste Management in China: Moving towards Sustainability through Digitalization-Based Circular Economy. *Sustainability*, 14(4), 2374. <https://doi.org/10.3390/su14042374>
- Leong, H. Y., Chang, C.-K., Khoo, K. S., Chew, K. W., Chia, S. R., Lim, J. W., Chang, J.-S. et Show, P. L. (2021). Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: a solution to global issues. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 87. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01939-5>
- MacArthur Foundation (2015) *Growth within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*. Ellen MacArthur Foundation, Isle of Wight, UK.
- MacArthur, E. *Delivering the Circular Economy: A Toolkit for Policymakers*; Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK, 2015. Available online:

- https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/ElleMacArthurFoundation_PolicymakerToolkit.pdf (accessed on 12 February 2021).
- Ministère du développement durable, De l'environnement et de la lutte contre Les changements climatiques (MDDELCC)(2015) : Guide sur le recyclage des MRF, page 5 : https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/guide-mrf.pdf
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales (MAAARO)(2022) : L'ensilage de tiges de maïs et la paille de blé dans la ration alimentaire d'hiver des vaches de boucherie. Le bœuf virtuel du MAAARO:<http://omafra.gov.on.ca/french/livestock/beef/news/vbn1109a1.htm>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2019). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990*. Gouvernement du Québec.<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2017/inventaire1990-2017.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2016). *Bilan 2015 du recyclage des matières résiduelles fertilisantes*. Gouvernement du Québec.https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/Bilan2015.pdf
- Norouzi, O. et Dutta, A. (2022). The Current Status and Future Potential of Biogas Production from Canada's Organic Fraction Municipal Solid Waste. *Energies*, 15(2), 475. <https://doi.org/10.3390/en15020475>
- Ogle, S. M., Alsaker, C., Baldock, J., Bernoux, M., Breidt, F. J., McConkey, B., Regina, K. et Vazquez-Amabile, G. G.(2019). Climate and soil characteristics determine where no-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions. *Scientific Reports*,9, 11665. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47861-7>
- Ogle, S. M., Alsaker, C., Baldock, J., Bernoux, M., Breidt, F. J., McConkey, B., Regina, K. et Vazquez-Amabile, G. G.(2019). Climate and soil characteristics determine where no-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions. *Scientific Reports*,9, 11665. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47861-7>
- Oliveira, M. M. D., Lago, A. et Dal' Magro, G. P. (2021). Food loss and waste in the context of the circular economy: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126284>
- Organisation internationale de normalisation (ISO). (2006a). *ISO 14040 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre*. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr>

- Organisation internationale de normalisation (ISO). (2006b). *ISO 14044: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices*, Organisation internationale de normalisation, 56 p.
<https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:fr>
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (2022) Perspectives de récoltes et de situation alimentaire Rapport mondial trimestriel - consulté en septembre 2023 sur le site :
[Perspectives de récolte et situation alimentaire n° 2, juillet 2022 \(fao.org\)](#)
- Pavolová, H., Lacko, R., Hajduová, Z., Šimková, Z. et Rovňák, M. (2020). The Circular Model in Disposal with Municipal Waste. A Case Study of Slovakia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), 1839. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061839>
- Pedrero, F., Grattan, S. R., Ben-Gal, A. et Vivaldi, G. A. (2020). Opportunities for expanding the use of wastewaters for irrigation of olives. *Agricultural Water Management*, 241, 106333. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106333>
- Peña, C., Civit, B., Gallego-Schmid, A., Druckman, A., Pires, A. C., Weidema, B., Mieras, E., Wang, F., Fava, J., Canals, L. M. I., Cordella, M., Arbuckle, P., Valdivia, S., Fallaha, S. et Motta, W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(2), 215-220. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01856-z>
- Primeau, C. (2014). *Modes de gestion des biosolides des usines de pâtes et papiers au Québec : analyse comparative*. (Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke).
https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2013/Primeau_C_2014-02-17_01.pdf
- Qian, B., Jing, Q., Bélanger, G., Shang, J., Huffman, T., Liu, J. et Hoogenboom, G. (2018). Simulated Canola Yield Responses to Climate Change and Adaptation in Canada. *Agronomy Journal*, 110(1), 133-146. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.02.0076>
- RECYC-QUÉBEC. (2018a). L'économie circulaire dans la filière alimentaire. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/schema-economie-circulaire-filiere-alimentaire>
- RECYC-QUÉBEC. 2021. Bilan net d'émissions de gaz à effet de serre. [RECYC-QUÉBEC - Bilan net d'émissions de gaz à effet de serre \(gouv.qc.ca\)](#), consulté le 22 décembre 2022.
- Rolewicz-Kalińska, A., Lelicinska-Serafin, K. et Manczarski, P. (2020). The circular economy and organic fraction of municipal solid waste recycling strategies. *Energies*, 13(17), 4366. <https://doi.org/10.3390/en13174366>
- Rossi, G., Mainardis, M., Aneggi, E., Weavers L. K. et Goi D. (2021). Combined ultrasound-ozone treatment for reutilization of primary effluent: A preliminary study. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 700-710. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10467-y>
- R. Bryant, C. (2016). *Agricultural adaptation to climate change*. Springer Berlin Heidelberg.

- Sauvé et al., 2016. *L'économie circulaire : une transition incontournable*. Les Presses de l'Université de Montréal, Les Presses de l'Université de Montréal, 2016 iSBN (papier) 978-2-7606-3675-0, iSBN (PDF) 978-2-7606-3676-7, iSBN (ePub) 978-2-7606-3677-4
- Sharma, H. B., Vanapalli, K. R., Samal, B., Cheela, V. R. S., Dubey, B. K. et Bhattacharya, J. (2021). Circular economy approach in solid waste management system to achieve UN-SDGs: Solutions for post-COVID recovery. *Science of The Total Environment*, 800, 149605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149605>
- Smol, M., Adam, C. et Preisner, M. (2020). Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 682-697. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>
- Thivierge, M.-N., Jégo, G., Bélanger, G., Chantigny, M. H., Rotz, C. A., Charbonneau, É., Baron, V. S. et Qian, B. (2017). Projected impact of future climate conditions on the agronomic and environmental performance of Canadian dairy farms. *Agricultural Systems*, 157, 241-257. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.07.003>
- Toop, T. A., Ward, S., Oldfield, T., Hull, M., Kirby, M. E. et Theodorou, M. K. (2017). AgroCycle – developing a circular economy in agriculture. *Energy Procedia*, 123, 76-80. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.269>
- Wyman O (2017) Supporting the circular economy transition: the role of the financial sector in the Netherlands. <https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2018/February/Circular-Economy.pdf>
- Vogel, E., Donat, M. G., Alexander, L. V., Meinshausen, M., Ray, D. K., Karoly, D., Meinshausen, N. et Frieler, K. (2019). The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters*, 14(5), 054010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b>
- Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W. et Yap, P.-S. (2023). Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 55-80. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
- Ymène et al. 2021. Roland, Greenhouse Gas Emissions from Canadian Agriculture: Estimates and Measurements (November 2021). SPP Briefing Paper, Volume 14:35, November 2021, Available at SSRN: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4042259