

RAPPORT DE RECHERCHE

GAZ NATUREL RENOUVELABLE : ENJEUX CLIMATIQUES ET ÉCOLOGIQUES ET POTENTIEL DE PRODUCTION AU QUÉBEC

Rapport réalisé par **MARC DIONNE**,
étudiant en Sciences de l'environnement,

sous la supervision d'**ÉRIC PINEAULT**,
professeur à l'Institut des sciences de l'environnement, UQAM

FÉVRIER 2024

NOTE AU LECTORAT

Cette étude a été réalisée à la demande de la Table Énergie du Front commun pour la transition énergétique, financée par la Fondation familiale Trottier et réalisée par Marc Dionne, étudiant à l'Institut des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Montréal (UQAM), sous la supervision d'Éric Pineault professeur à l'Institut. L'auteur remercie les membres du comité aviseur du Front commun pour la transition énergétique, Carole Dupuis, Bruno Detuncq et Jean-François Boisvert, qui l'ont soutenu tout au long de ses travaux. Il tient aussi à exprimer sa gratitude aux scientifiques et expert.e.s qui ont partagé leurs connaissances et points de vue lors de la conduite de cette étude. Leurs contributions ont été déterminantes pour appréhender la complexité et les nuances des enjeux entourant le gaz naturel renouvelable. Toutefois, bien que cette étude ait bénéficié de leurs précieux apports, la responsabilité des interprétations, synthèses et conclusions n'engage ni ces personnes ni le Front commun pour la transition énergétique. Elle demeure entièrement celle de l'auteur et de son superviseur, qui accueilleront avec intérêt tout commentaire ou suggestion.

POUR CITER CE RAPPORT

Dionne M. et E. Pineault, 2024, *Gaz naturel renouvelable : enjeux climatiques et écologiques et potentiel de production au Québec*, UQAM, préparé pour le Front commun pour la transition énergétique

DÉPÔT LÉGAL

Février 2024

©2024 Université du Québec à Montréal (UQAM)

Infographie et mise en page : Patricia Gendron

FAITS SAILLANTS

Présentée comme une solution de rechange « verte » au gaz naturel fossile (GNF), la filière du gaz naturel renouvelable (GNR) bénéficie de forts soutiens politiques et financiers de la part du gouvernement du Québec. Or, le développement de cette filière et ses conséquences climatiques et écologiques n'ont fait l'objet ni d'une évaluation environnementale stratégique, ni d'un débat public large. La présente recherche vise à déterminer s'il s'agit réellement d'une bonne solution et quelle place le GNR peut et doit occuper dans le mix énergétique de l'avenir. Elle a été réalisée au moyen d'une revue de littérature scientifique, d'entretiens avec des expert·e·s et d'une analyse des études publiées à ce jour sur le potentiel de production de GNR au Québec. En voici quelques faits saillants.

1

Les études disponibles sur le potentiel de production de GNR au Québec se limitent à évaluer les potentiels technique (PT) et technico-économique (PTÉ). Ainsi, par définition, elles font abstraction de nombreux usages concurrentiels actuels de la biomasse convoitée. De plus, elles ne se situent ni dans une optique de hiérarchie des usages ni dans le cadre d'analyses cycle de vie qui compareraient les impacts de la production de GNR à ceux d'autres usages de la biomasse, y compris la non extraction. Par conséquent, ces études ne fournissent en tant que telles aucune indication fiable quant au potentiel commercial réel et désirable de production de GNR au Québec.

2

La biomasse forestière est à la fois la source la plus importante de matière méthanogène (80 % du PTÉ 2030 estimé) et celle dont le volume réellement disponible semble le plus incertain, compte tenu des usages concurrentiels ainsi que des risques écologiques, climatiques et économiques. Quant aux volumes espérés de biomasse issue des déchets (9 % du PTÉ 2030 estimé) et du secteur agricole (11 % du PTÉ 2030 estimé) pouvant servir à la production de GNR, ils sont beaucoup moins considérables mais paraissent tout de même grandement surestimés.

3

Plusieurs enjeux cruciaux relevés dans le cadre de la revue de littérature ne sont pas pris en compte dans l'estimation des potentiels. Notamment, la production de GNR à partir de biomasse forestière implique des risques majeurs : perte de zones à haute valeur écologique; potentielle réduction du carbone dans les sols forestiers; fausse carboneutralité à cause des forts volumes d'émissions de GES à court terme et de la dette carbone à long terme, contribuant à l'effet domino et provoquant une accélération du réchauffement climatique. Quant à la production de GNR à partir de déjections animales, il est préoccupant de voir émerger au Québec des méga-usines de biométhanisation du lisier en l'absence d'études démontrant l'impact réel, vraisemblablement infime, de cette production sur la réduction des émissions de GES totales des élevages.

4

Compte tenu de la rareté probable des volumes futurs de GNR de haute qualité environnementale, il vaut mieux réserver ce gaz précieux aux usages sans regrets et critiques. À première vue, les usages industriels devraient être priorités car les possibilités de substitution sont faibles en ce domaine.

5

Les connaissances sont actuellement insuffisantes pour justifier un recours important à la filière du GNR et des investissements publics dans son développement, au détriment d'autres stratégies de décarbonation potentiellement plus efficaces. Entre autres, il manque d'études de cycle de vie pour comparer les impacts environnementaux et climatiques de différentes voies de production d'énergies et pour comparer des scénarios de développement des énergies renouvelables à des scénarios plus près du concept de décroissance économique.

6

Ce rapport peut être considéré comme un jalon vers une estimation crédible du potentiel réel et désirable de production de GNR au Québec. Il est impératif que le gouvernement du Québec se dote d'un plan d'acquisition des connaissances manquantes concernant la filière GNR, à défaut de quoi nous risquons de développer à grande échelle une industrie qui, au lieu de contribuer à la transition énergétique, nous en éloignera.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	4	2. BIOMASSE DISPONIBLE POUR LA PRODUCTION DE GNR AU QUÉBEC	30
OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE	9	Rapports de recherche existants sur le potentiel technique (PT) et technico-économique (PTÉ)	30
1. REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES ENJEUX ÉCOLOGIQUES ET CLIMATIQUES LIÉS À LA PRODUCTION ET À LA CONSOMMATION DE GNR	10	Potentiel commercial réel et désirable	36
Généralités	10	Biomasse issue des matières résiduelles	37
Biodiversité, écosystèmes et approche « via negativa »	10	Biomasse agricole	38
« Hiérarchie des usages » ou « utilisation en cascade » de la biomasse	11	Biomasse forestière	40
		Biomasse totale	43
Extraction	12	3. PRINCIPAUX CONSTATS	48
Biomasse issue des matières résiduelles	12	CONCLUSION	50
Biomasse agricole	13	BIBLIOGRAPHIE	53
Biomasse forestière	16		
Transformation	21		
Biométhanisation de biomasse issue du secteur des matières résiduelles et du secteur agricole : GNR de première génération	21		
Prétraitement	22		
Post-traitement, raffinage du biogaz	22		
Fuites du biodigesteur	23		
Digestat	24		
Installations de biométhanisation	25		
Mauvaise gestion de la biométhanisation	25		
Pyrolyse-gazéification et hydrogénation pyrocatalytique de la biomasse forestière : GNR de seconde génération	26		
Coproduits de la pyrolyse	27		
Installations pour la pyrolyse-gazéification	28		
Hydrogénation pyrocatalytique	28		
Installations pour l'hydrogénation pyrocatalytique	29		
Cogénération	29		
Usage et dissipation	29		

INTRODUCTION

Dans la course à la décarbonation des systèmes énergétiques, le « gaz naturel renouvelable » (GNR) s'est imposé comme une solution technologique qui semble au premier regard à la fois simple et efficace. Simple parce que les équipements qui fonctionnent actuellement au « gaz naturel fossile » (GNF) peuvent fonctionner tout aussi bien avec du GNR; ce gaz peut donc être injecté directement dans les réseaux gaziers existants. En fait, sur le plan chimique, GNF et GNR sont identiques : il s'agit de la même molécule de méthane (CH₄). Le GNR peut donc être mélangé au GNF en diverses proportions dans les systèmes actuels d'approvisionnement gazier et susciter ainsi l'espoir qu'un jour, 100 % des molécules de CH₄ en circulation dans les tuyaux seront d'origine renouvelable. Le GNR s'impose aussi comme une solution efficace parce qu'en théorie, ce gaz est carboneutre : sa production et sa combustion sont censées, au net, ne pas émettre de GES. De plus, contrairement au gaz fossile, qui est non renouvelable, le GNR est issu de la productivité biologique des écosystèmes. Théoriquement, c'est une source d'énergie renouvelable à l'infini, du moins tant qu'il y aura formation de biomasse par photosynthèse.

Présenté comme étant un substitut parfait du gaz fossile, carboneutre et renouvelable, le GNR semble donc mériter largement la place qu'il occupe dans les stratégies actuelles de décarbonation des systèmes énergétiques. Fait important sur le plan économique, il permet aussi de pérenniser l'imposante masse existante d'infrastructures

et d'équipements gaziers. Grâce au GNR, on éviterait de radier ces actifs qui valent des milliards de dollars, un facteur non négligeable dans une économie comme celle du Québec. À lui seul, ce critère peut expliquer la popularité du GNR auprès des distributeurs gaziers.

Ainsi, parmi la panoplie d'énergies renouvelables possibles, l'entreprise Énergir, qui distribue actuellement 97 % du gaz naturel consommé au Québec, met fortement l'accent, dans ses communications, sur le GNR. En date de septembre 2022, le gaz naturel distribué par Énergir au Québec était à 99,4 % d'origine fossile et le GNR représentait 0,6 % des volumes dans son réseau (Whitmore, J. et P.-O. Pineau, 2023). Énergir s'est engagée à respecter le règlement stipulant que 10 % du gaz distribué en 2030 sera de source renouvelable (ce qui comprend le GNR et l'hydrogène « vert ») (Énergir, 2023). Le GNR que l'entreprise souhaite distribuer en 2030 proviendrait de biomasse issue de matières résiduelles, agricole et forestière du Québec. Actuellement, Énergir importe l'essentiel de son GNR de producteurs américains. Énergir compte sur l'image de « propreté environnementale » de la chaîne d'approvisionnement du GNR pour vendre son produit comme étant écoresponsable et ayant le pouvoir de réduire les émissions de GES, comparativement aux combustibles fossiles.

Dans la récente mise à jour de son plan d'action « Vers un Québec décarboné et prospère (2023) », Hydro-Québec

affirme vouloir miser sur le GNR pour prolonger la vie utile de la centrale thermique de Bécancour. La Ville de Montréal, dans son projet de règlement visant à interdire l'installation d'équipement utilisant du gaz naturel fossile dans les nouvelles constructions, laisse toutefois la porte ouverte à des équipements qui utiliseraient du GNR. Plusieurs industries ayant des procédés difficilement décarbonables ou utilisant la molécule CH₄ pour ses propriétés chimiques espèrent aussi avoir accès à des volumes substantiels de GNR pour atteindre leurs objectifs de carboneutralité.

Cette forte demande de GNR, même si elle est encore largement virtuelle, se traduit en projets d'affaires. L'entreprise Nature Energy, une filiale de Shell, a ainsi annoncé en 2022 vouloir construire au Québec, en partenariat avec Énergir, une dizaine de complexes de production de GNR à partir de fumier (80 %) et de résidus municipaux (20 %). Un premier projet, capable de traiter 715 000 tonnes de matières annuellement (soit 2 000 tonnes par jour) est prévu à Farnham en Montérégie. D'autres projets similaires, portés par des entreprises différentes, ont été annoncés, dont un complexe de biométhanisation de fumier de cheval à Shefford en Estrie. Le Fonds de solidarité de la FTQ a également annoncé à l'automne 2023 la création d'un fonds consacré à l'investissement dans des installations de biométhanisation de petite et moyenne taille. Cet engouement pour les projets de production de GNR à partir de déjections animales (fumiers

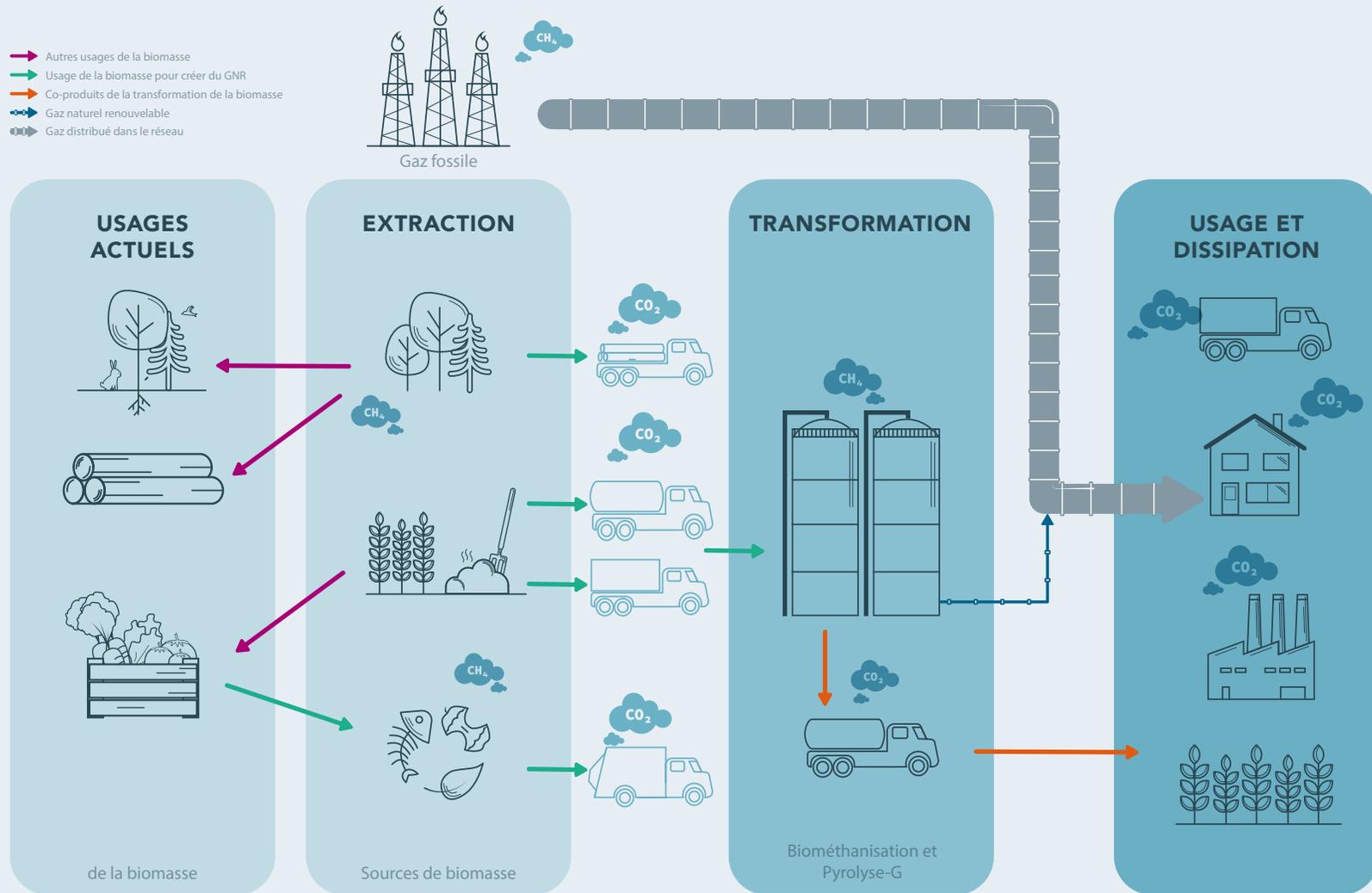
et lisiers), ainsi qu'à partir de déchets domestiques, ne doit pas faire oublier que le véritable potentiel de production de grands volumes de GNR se trouve plutôt du côté de la forêt et de sa biomasse. Comme on le verra plus loin, l'exploitation massive de ce potentiel dépend de technologies qui sont actuellement en développement, ce qui explique sans doute qu'on entende moins parler de production de GNR à partir de biomasse forestière pour le moment.

Le développement de la filière du GNR bénéficie de forts soutiens politiques et financiers de la part du gouvernement du Québec (Gouvernement du Québec, 2022). Or, ce développement et ses conséquences climatiques et écologiques n'ont fait l'objet ni d'une évaluation environnementale stratégique, ni d'un débat public large. Il est donc pertinent, à l'heure actuelle, de réfléchir aux enjeux environnementaux liés au développement de la filière GNR afin de déterminer s'il s'agit réellement d'une bonne solution de lutte au réchauffement climatique, si elle est vraiment plus durable que l'industrie des combustibles fossiles et quelle place elle peut et doit occuper dans le mix énergétique de l'avenir. C'est dans ce contexte que se situe la présente recherche.

La première section de ce rapport est une revue de littérature qui recense les impacts écologiques et climatiques positifs et négatifs identifiés à toutes les étapes de la chaîne de production et de consommation du gaz naturel renouvelable, de l'extraction des sources de biomasse ciblées à leur transformation en GNR et à l'usage du combustible ainsi que des coproduits de la transformation¹. La deuxième section rappelle le potentiel de production de GNR qui a été estimé et rendu public jusqu'ici pour le Québec, globalement et selon les diverses catégories de biomasse ciblées. Elle expose les facteurs qui ont été exclus de ces estimations et propose des ajustements devant permettre d'estimer plus justement le potentiel réel et désirable en tenant compte, principalement, des usages concurrentiels de la biomasse ainsi que des impacts écologiques et climatiques du GNR. La troisième section présente les principaux constats découlant des deux premières.

¹ Nous avons exclu l'étude de la filière dite « GNR de troisième génération », qui implique la transformation d'hydrogène vert en biocombustible, car son développement demeure hypothétique et nécessiterait une analyse à lui seul.

LA CHAÎNE DE PRODUCTION DU GNR



Avant de présenter la revue de littérature, prenons le temps de comprendre la chaîne de production du GNR; c'est d'ailleurs la séquence formée par ces principales étapes qui a guidé l'organisation de ce rapport. Le GNR est un combustible et, comme ses cousins fossiles, il doit être extrait, puis transformé; son usage énergétique se termine par la dissipation des gaz brûlés et de la chaleur issus de sa combustion. Le schéma ci-dessus se divise en trois sections qui reprennent cette séquence : extraction - transformation - usages et dissipation finale. Les flèches vertes et bleues suivent la transformation de la biomasse du point d'extraction vers sa dissipation finale au point d'usage du gaz. Nous reviendrons plus loin sur les autres flèches (mauves, oranges et grises) et la signification de chaque icône. Suivons donc la production du GNR en commençant par le point d'extraction.

EXTRACTION

À la différence des énergies fossiles, le GNR n'est pas extrait de réserves fossiles. Tel que représenté par les flèches vertes, il provient de biomasse issue de trois sources : la forêt, l'agriculture et les matières résiduelles. Cette biomasse, matière première pour produire du GNR, n'est pas nécessairement composée de déchets que le procédé « sauve » du gaspillage. En effet, pour alimenter une usine de GNR, il est possible, par exemple, de produire de la biomasse agricole sous la forme de cultures bioénergétiques ou de détourner des résidus agricoles du compostage qui les aurait transformés en engrais, tout comme il est possible d'extraire de la forêt de la biomasse non résiduelle. Même la catégorie des matières résiduelles est ambiguë puisque certaines d'entre elles, comme le bois de construction, peuvent servir à des usages autres que la production de GNR. En fait, comme l'indiquent les lignes mauves du schéma, presque toutes les sources de biomasse ciblées pour la production de GNR peuvent faire l'objet d'usages différents, peut-être plus désirables sur les plans environnemental et économique.

L'autre particularité de la chaîne de production du GNR est la nature du processus d'alimentation des usines de transformation de la biomasse en gaz. Contrairement au pétrole et au gaz d'origine fossile, qui se déplacent principalement par pipeline du point d'extraction vers les lieux de raffinage, la biomasse doit être transportée vers les usines de production de GNR en camion-citerne ou en camion vrac. Plus la capacité de production d'une usine de GNR est grande, plus son cercle d'approvisionnement en biomasse est vaste et plus ce trafic routier est important. Le rendement énergétique de ce système diminue donc à mesure que la taille des usines de production de GNR augmente.

TRANSFORMATION

La deuxième étape du processus de production du GNR est la transformation de la biomasse en gaz. Deux procédés sont utilisés. Dans le premier cas, la biomasse est versée dans un système de biométhanisation (technologie de première génération), où elle subira un processus de fermentation, ce qui permet de produire un gaz composé en partie de CH_4 . Dans le deuxième cas, la biomasse est versée dans une enceinte de pyrolyse-gazéification ou d'hydrogénation pyrocatalytique à haute température (technologie de deuxième génération). Ces deux procédés ne sont pas les seules manières d'extraire de l'énergie de la biomasse : il est aussi possible de produire de l'électricité et de la chaleur par cogénération de la biomasse, une pratique courante dans l'industrie forestière et à la ferme.

La production de GNR par biométhanisation est une technologie assez simple généralement basée sur la fermentation anaérobie, c'est-à-dire sans oxygène. Elle concerne principalement les matières résiduelles organiques et les résidus agricoles mais peut aussi se faire au moyen de cultures bioénergétiques. Ces matières sont enfermées dans un digesteur où la production de CH_4 et d'un digestat de bonne qualité sera favorisée par fermentation anaérobie. Les éléments introduits dans le digesteur doivent respecter les bonnes proportions et être manipulés convenablement pour produire une quantité optimale de GNR et un digestat de bonne qualité. Du biogaz qui résulte de la fermentation sera extrait le CH_4 . Quant au digestat, il ressemble à un compost mûr et pourra faire l'objet d'usages agricoles ou horticoles. Selon la qualité des intrants, des prétraitements sont parfois nécessaires et des post-traitements sont impératifs pour ensuite produire du GNR (Dar, R. A. et al. 2021).

L'extraction de CH_4 de la biomasse forestière implique des procédés qualifiés de « deuxième génération », plus avancés sur le plan technologique. Ces procédés comportent plus d'étapes, exigent un équipement plus complexe (et coûteux) et consomment plus d'énergie. Dans la pyrolyse-gazéification, la biomasse forestière est traitée à haute température dans un environnement contrôlé, ce qui produit une huile pyrolytique, une partie gazeuse et du biochar. Des traitements sont ensuite nécessaires pour produire du GNR et un biochar de qualité (Fahmy, T. Y. A. et al. 2018). L'hydrogénation pyrocatalytique est une variante de la pyrolyse qui consiste aussi à traiter la biomasse forestière à haute température en présence d'hydrogène pour produire une vapeur qui est ensuite purifiée pour donner du CH_4 et de l'eau (Blair et Mabee 2020).

La cogénération nécessite un combustible sous forme de biogaz non purifié provenant du digesteur (dans le processus de biométhanisation) ou sous forme de biomasse forestière résiduelle broyée, afin de produire de l'électricité et de la chaleur qui peuvent répondre aux besoins énergétiques locaux des installations ou de la ferme, ce qui réduit la consommation d'électricité ou de combustibles fossiles autrement utilisés. Les surplus en électricité peuvent alimenter un réseau local ou national (Deboni et al. 2019) (Prestipino et al. 2021) (WSP 2021).

À la fin de cette deuxième étape, un ensemble de produits est obtenu : le GNR, ce qu'on cherche à obtenir, représenté par la flèche bleue, et des matières résiduelles organiques, représentées par les flèches oranges. Dans le cas de la biométhanisation, il faut prévoir la gestion et l'épandage d'un digestat qui peut, tout dépendant de sa composition chimique et de sa gestion, être une source importante de pollution ou un amendement de qualité

en agriculture. Dans le cas des technologies de deuxième génération, dans la filière forestière, on obtient un déchet solide, le biochar, et un déchet liquide, le vinaigre de bois. Les deux peuvent faire l'objet d'usages agricoles et horticoles. De tous les résidus de production de GNR, le biochar est le moins problématique dans la mesure où c'est une matière solide relativement inerte qui concentre du carbone et qui est un amendement agricole et horticole recherché.

USAGE ET DISSIPATION

À la suite des étapes d'extraction et de transformation composant le processus de production du GNR, on obtient une molécule de CH₄. L'étape suivante comprend son usage énergétique puis sa dissipation finale une fois qu'elle a été brûlée. Chimiquement, une molécule de CH₄ de GNR est tout à fait identique à une molécule de CH₄ de gaz naturel fossile. Elle sera donc utilisée par les mêmes équipements pour obtenir les mêmes services énergétiques ou chimiques. La molécule peut dès lors

suivre deux trajectoires, qui sont représentées par les deux destinations de la flèche bleue : elle peut être injectée dans un réseau de distribution de gaz existant ou être utilisée localement dans un circuit court. Dans le premier cas, le GNR s'ajoute au gaz fossile et il en résulte un gaz naturel contenant une fraction de GNR; c'est ce que représentent les flèches grises. Ces flèches rappellent un fait important du modèle d'affaires de la filière GNR au Québec, à savoir qu'elle se développe en tant que complément de la filière du gaz naturel fossile. Ainsi, Énergir poursuit la cible établie par le gouvernement du Québec d'injecter 10 % de GNR dans son réseau gazier d'ici 2030. Cela veut dire qu'en cas d'atteinte de cette cible, le gaz consommé au Québec en 2030 sera à 90 % du gaz fossile extrait par fracturation hydraulique et à 10 % du gaz issu de biomasse.

Que la molécule soit d'origine fossile ou biologique, le résultat final est le même : la combustion du gaz par des équipements permet d'obtenir des services énergétiques

et génère des émissions gazeuses, principalement de la vapeur d'eau et du CO₂. C'est là où, théoriquement, les molécules de GNR et de GNF se distinguent. L'impact du GNR sur les changements climatiques est supposé moindre que celui du GNF ou même nul. Parce que le GNR résulte de l'activité biologique courante, on suppose que la quantité de CO₂ émise lors de sa combustion sera rapidement compensée par du CO₂ retiré de l'atmosphère par la photosynthèse, alors qu'au contraire, le gaz fossile introduit dans l'atmosphère du carbone qui était jusque là séquestré sous terre. C'est donc parce que le GNR s'inscrit dans le cycle écologique du carbone plutôt que dans son cycle géologique qu'il est considéré une énergie propre et renouvelable. Mais cela, comme nous le verrons, est une hypothèse théorique. En pratique, l'empreinte carbone du GNR varie selon son mode de production et sa fabrication soulève d'autres enjeux écologiques et climatiques qui vont apparaître dans notre revue de littérature.

OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE

L'objectif de cette recherche est double. Premièrement, elle a pour but de rassembler, au moyen d'une revue de littérature scientifique, une information aussi exhaustive que possible sur les enjeux écologiques et climatiques soulevés par le développement de la filière GNR et par les sources de biomasse qui l'alimentent. Deuxièmement, sur la base des connaissances scientifiques recensées et en puisant dans les estimations publiées jusqu'ici du potentiel de production de GNR sur le territoire québécois, elle vise à mieux cerner la contribution possible et désirable de cette filière à une transition efficace vers la carboneutralité, respectueuse des limites biophysiques de la planète et porteuse de justice sociale, conformément aux critères du Front commun pour la transition énergétique.

La liste complète des documents consultés se trouve dans la bibliographie à la fin de ce rapport.

Étant donné le caractère incomplet et souvent contradictoire des études réalisées à ce jour sur le gaz naturel renouvelable, l'auteur a aussi consulté directement des spécialistes aptes à l'éclairer sur des enjeux pointus en lien avec la production et la consommation de gaz naturel renouvelable, notamment :

- Céline Vaaneckhaute, *Ing. jr., Université Laval, sur le sujet de la biométhanisation;*
- Évelyne Thiffault, *Ing. f., Université Laval, sur le sujet de la biomasse forestière résiduelle;*

- Martin Chantigny, *Ph. D., Agriculture et Agroalimentaire Canada, sur le sujet de la valeur agromonomique du digestat.*

Bien que cette étude ait bénéficié de leurs précieux apports, la responsabilité des interprétations, synthèses et conclusions demeure entièrement celle de l'auteur et de son superviseur.

1 ■ REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES ENJEUX ÉCOLOGIQUES ET CLIMATIQUES LIÉS À LA PRODUCTION ET À LA CONSOMMATION DE GNR

GÉNÉRALITÉS

BIODIVERSITÉ, ÉCOSYSTÈMES ET APPROCHE « VIA NEGATIVA »

Le recours massif à la bioénergie comme stratégie de décarbonation divise profondément la communauté scientifique. Certains prônent la production à grande échelle de bioénergie avec capture et stockage de carbone (CSC), même si elle crée une dette carbone à court terme, car ils soutiennent que c'est le seul moyen de diminuer la consommation de combustibles fossiles (Cowie, A. L. et al. 2021). D'autres dénoncent cette stratégie qui témoigne selon eux d'une incompréhension fondamentale de la situation climatique actuelle. Cette différence provient en bonne partie de la perspective des scientifiques interpellées. Les promoteurs de la bioénergie abordent souvent la question sous l'angle des enjeux et défis des gestionnaires des systèmes énergétiques, qui recherchent des solutions pour la transition. Par contre, chez les scientifiques qui adoptent le point de vue de la survie des milieux biologiques et de la biodiversité, la prudence est la position dominante (Malcom, J. R. et al. 2020).

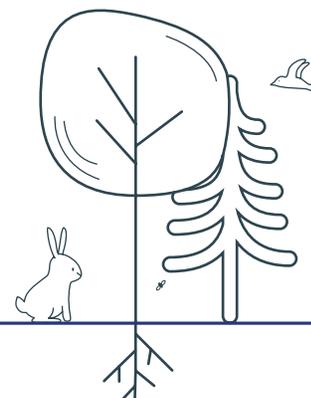
Selon le GIEC et l'IPBES, le développement à grande échelle de la bioénergie risque d'avoir des impacts négatifs importants sur la biodiversité et les écosystèmes. L'augmentation de la demande en biomasse peut aggraver la pression sur les terres agricoles et les écosystèmes qui sont déjà grandement affectés par les impacts directs et indirects de la présence humaine ainsi que par les changements climatiques (Giuntoli, J. et al. 2022). Plusieurs voies existent pour atteindre la carboneutralité avec ou sans bioénergie, mais seuls des écosystèmes biodiversifiés, résilients et en santé peuvent perdurer et continuer d'offrir leurs services écosystémiques à long terme.

Dans le contexte d'un tel débat au sein de la communauté scientifique, Saltelli *et al.* proposent d'utiliser une approche « via negativa », qui consiste à souligner les mauvaises solutions plutôt que de débattre pour tenter de déterminer quelle solution serait légèrement meilleure qu'une autre. Parfois, il est avantageux de savoir quoi ne pas faire afin d'éviter le pire scénario (Giuntoli, J. et al. 2022).

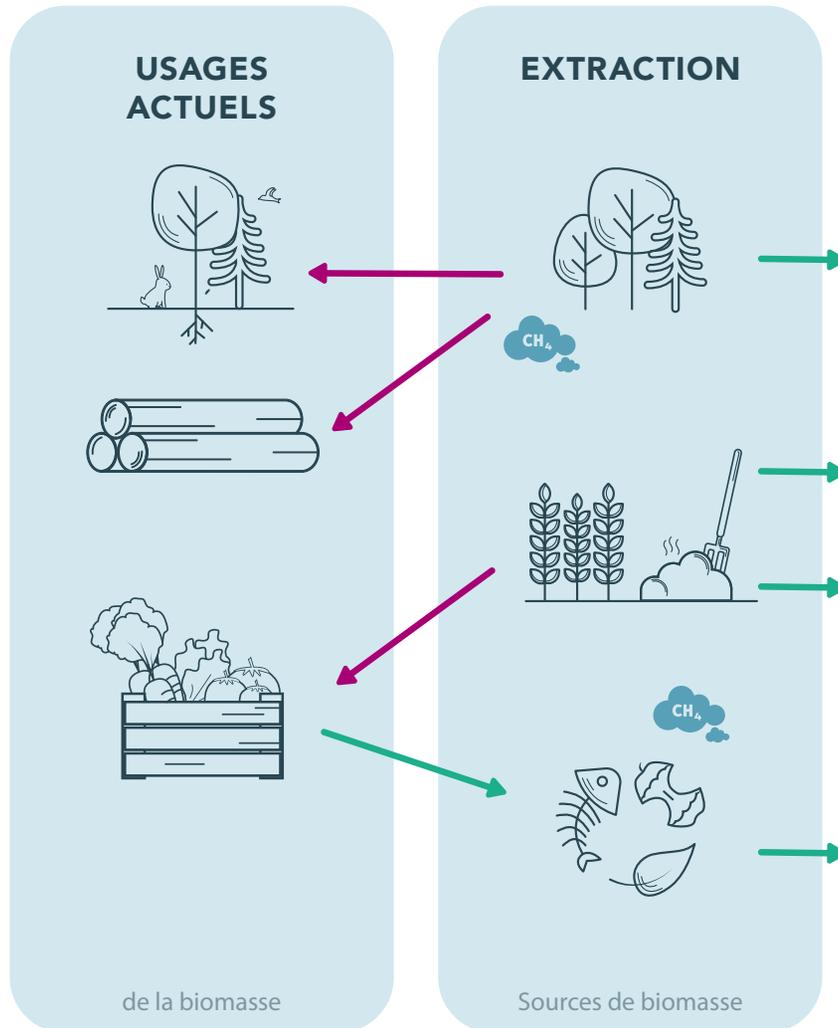
« HIÉRARCHIE DES USAGES » OU « UTILISATION EN CASCADE » DE LA BIOMASSE

La Politique québécoise de gestion des matières résiduelles adoptée en application de la Loi sur la qualité de l'environnement stipule qu'à moins qu'une analyse basée sur une approche du cycle de vie des biens et des services ne démontre qu'une dérogation est justifiée, « la réduction à la source, le réemploi, le recyclage (...), les autres formes de valorisation de la matière, la valorisation énergétique et l'élimination doivent être privilégiés dans cet ordre dans le domaine de la gestion des matières résiduelles. » Nous n'avons trouvé aucune analyse du cycle de vie justifiant la production de GNR à partir de la biomasse résiduelle issue des secteurs ciblés (déchets, agricole, forestier) par rapport aux autres usages qui doivent avoir préséance selon la Politique. Le concept d'« utilisation en cascade » est également employé pour désigner le principe voulant que la biomasse soit utilisée en fonction de sa valeur ajoutée économique et environnementale la plus élevée. Keegan, D. *et al.* (2013) recommandent « l'utilisation en cascade de la biomasse ». Cette approche consiste à classer les usages de la biomasse selon leurs conséquences sociales, économiques et environnementales, et à prioriser dans chaque cas l'usage le plus avantageux. L'usage matériel de la biomasse est très souvent préférable à la production d'énergie, car il maximise la quantité de carbone séquestrée dans les biomatériaux.

Dans les rapports de recherche réalisés jusqu'ici pour estimer la biomasse disponible pour la production de GNR au Québec (WSP-Deloitte 2018, Aviseo Conseil 2019 et WSP 2021), le concept d'utilisation en cascade de la biomasse n'a pas été utilisé et celui de la hiérarchie des usages n'est mentionné que dans un seul rapport et pour une seule sous-catégorie de biomasse (la biomasse végétale agricole, WSP 2021).



- Autres usages de la biomasse
- Usage de la biomasse pour créer du GNR
- Co-produits de la transformation de la biomasse
- Gaz naturel renouvelable
- Gaz distribué dans le réseau



EXTRACTION

NOTE SUR L'EXPRESSION

« VALORISATION ÉNERGÉTIQUE » | Dans le domaine de la gestion des déchets et dans la Loi sur la qualité de l'environnement du Québec, on utilise l'expression « valorisation énergétique » pour désigner toute activité de détournement d'une matière de l'élimination en vue d'obtenir de l'énergie. Or, le mot « valorisation » est positivement connoté puisqu'il désigne l'action de donner plus de valeur à quelque chose, alors que la production d'énergie est souvent la manière la moins avantageuse, sur les plans environnemental et économique, de détourner une matière de l'élimination. C'est pourquoi, dans ce document qui vise à analyser objectivement les enjeux écologiques et climatiques de l'utilisation de la biomasse pour produire du GNR, nous avons préféré utiliser l'expression à connotation neutre « production d'énergie ».

Dans cette section, nous examinons les enjeux écologiques et climatiques liés à l'extraction de biomasse pour la production de GNR. Cet examen se base sur une littérature scientifique complétée par la consultation d'experts. Comme il est d'usage, nous considérons ici les trois catégories de biomasse usuellement ciblées pour produire du GNR : la biomasse provenant du secteur des matières résiduelles, du secteur agricole et du secteur de la foresterie. Chacune de ces catégories se subdivise en plusieurs sous-catégories présentant des caractéristiques et des enjeux spécifiques. Pour cadrer notre recherche de littérature sur ces multiples sources de matière organique et centrer notre attention sur les sources dont les volumes potentiels estimés sont les plus conséquents, nous nous sommes inspirés principalement des descriptions présentées dans *l'Inventaire de la biomasse disponible pour produire de la bioénergie et portrait de la production de la bioénergie sur le territoire québécois* réalisé par WSP Canada inc. en 2021 pour le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec.

BIOMASSE ISSUE DES MATIÈRES RÉSIDUELLES

L'extraction de biomasse issue de matières résiduelles pour produire du GNR soulève des enjeux associés au verrouillage de modes de vie et de pratiques basés sur un modèle linéaire de production et de consommation, le modèle « extraire, fabriquer, transporter, consommer, jeter ». Elle présente aussi des enjeux liés au transport. Plus les distances entre les lieux de disposition des matières résiduelles et les lieux de production du GNR sont grandes, plus les émissions de GES seront importantes.

Les sites d'enfouissement sont à l'origine de plusieurs problèmes environnementaux comme la pollution des sols, de l'eau et de l'air, surtout en raison de la décomposition de la matière organique. Ils sont responsables d'environ 20 % des émissions de CH₄ au Canada. Le CH₄ a un potentiel de réchauffement climatique 80 fois supérieur au dioxyde de carbone (CO₂) sur une échelle de 20 ans et 28 fois supérieur au CO₂ sur une échelle de 100 ans (Mar, K. A. et al. 2022; Malmir, T. et al. 2023). Vu le potentiel de réchauffement climatique du CH₄, capter les rejets gazeux et liquides des sites d'enfouissement pour produire de l'énergie est avantageux du point de vue environnemental.

Une étude récente réalisée au Québec par Moreau *et al.* (2023) montre qu'en considérant la décomposition non contrôlée des produits du bois en fin de vie dans les décharges, l'empreinte carbone de la foresterie est grandement augmentée. La solution la plus efficace à l'heure actuelle pour réduire les émissions de GES du secteur forestier serait de gérer les émissions fugitives de CH₄ dans les décharges.

Le gaz récolté peut ensuite être éliminé par différentes méthodes de gestion comme le brûler à la torche sur place ou à l'aide de biosystèmes d'oxydation passive du CH₄ (Nelson, B. et al. 2022). Une des solutions possibles pour réduire les émissions liées aux matières résiduelles serait de décentraliser les systèmes de gestion de ces matières. En effet, la présence d'une usine de compostage à moins de 10 km d'une municipalité diminuerait de

65 % les impacts environnementaux liés au transport de ces matières (Tahereh, M., Saeed, R. et Ursula, E. 2020).

De plus en plus d'efforts sont consacrés à la séparation de la fraction organique des matières résiduelles afin de gérer les émissions de CH₄, de produire du compost ou de générer de l'énergie par biométhanisation (Tahereh, M., Saeed, R. et Ursula, E. 2020).

Le compostage aérobique (en présence d'oxygène) est un moyen simple et efficace de réduire considérablement la production de CH₄ et permet de valoriser la biomasse pour en faire un compost utile.

Par contre, les émissions de GES liées au compostage sont fortement dépendantes des étapes opérationnelles de manipulation de la matière organique (Lou et Nair 2009).

BIOMASSE AGRICOLE

CULTURES VÉGÉTALES DESTINÉES À LA PRODUCTION DE GNR

Utiliser des terres fertiles pour produire de l'énergie est très critiqué dans la littérature scientifique. Bien que nous ayons besoin de l'agriculture pour nourrir les populations humaines, les effets néfastes de l'agriculture sur l'environnement sont nombreux et il serait problématique d'utiliser nos terres arables pour chercher à satisfaire la soif du secteur de l'énergie. La production à grande échelle de GNR à partir de cultures végétales risque de provoquer des problèmes d'ordres divers : concurrence avec l'alimentation humaine et animale; détérioration des milieux naturels et de la biodiversité (surtout si des zones renfermant des écosystèmes sensibles sont remplacées par des cultures bioénergétiques); concurrence avec les filières existantes de mobilisation des matières; appauvrissement de la santé des sols; migration du carbone séquestré dans le sol vers l'atmosphère; compétition avec d'autres sources d'énergie plus désirables; pollution liée à la fertilisation des cultures; introduction d'espèces envahissantes (WSP 2021) (Jury, C. et al. 2010).

RÉSIDUS DE CULTURES VÉGÉTALES

Les résidus de cultures ont plusieurs utilisations plus souhaitables que la production de GNR. Le retour au sol de ces résidus permet de conserver la biodiversité et la structure du sol (protection contre l'érosion, retour en nutriments, etc.). On utilise traditionnellement les résidus de cultures comme fourrage, paillis de culture ou litière pour le bétail (WSP 2021).

LES TERRES MARGINALES

La superficie des terres cultivables au Québec est restreinte et exploitée intensivement. Elle représente environ 2 % à 4 % de l'écoumène québécois mais augmente si l'on inclut les terres arables de moins bonne qualité (Ruiz, J. 2019). D'après l'Union des producteurs agricoles (UPA), les terres cultivables devraient être considérées comme la « prunelle de nos yeux » (Gerbet, T. 2018).

Baucoup d'études proposent d'utiliser des terres marginales pour produire de la bioénergie afin d'éviter d'entrer en compétition avec l'alimentation. Par contre, les définitions de ce qu'est une « terre marginale » varient. Selon la revue de littérature réalisée par Mellor, P. *et al.* (2021), la moitié des terres considérées comme étant marginales pourrait être utilisée pour la production alimentaire.

DÉJECTIONS ANIMALES

Un grand nombre d'analyses de cycle de vie examinent la possibilité de réduire les émissions de GES totales liées à l'élevage de bétail en utilisant les excréments des animaux afin de produire du GNR par biométhanisation et d'ainsi remplacer un combustible fossile dans une optique d'économie circulaire. À travers le monde, la gestion du fumier est responsable d'environ 10 % des émissions de CH₄ agricole et cette proportion peut atteindre 50 % dans un contexte d'élevage confiné, dépendamment du climat. Au Canada, environ 43 % du fumier est laissé sur les plaines. Il ne serait probablement pas pertinent d'un point de vue environnemental et économique d'employer de la machinerie pour collecter le fumier sur les plaines afin de produire de l'énergie. Dans un contexte d'élevage confiné, le fumier est déjà géré et collecté, contrairement aux élevages sur les plaines (Henrik, B. M. *et al.* 2022).

CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES ÉVITÉES PAR LA BIOMÉTHANISATION DU LISIER DE PORC

Afin de déterminer l'impact réel de la production d'énergie à partir des excréments d'animaux sur l'empreinte carbone du cycle de vie de l'élevage du porc, un calcul simple est proposé :

SI LE LISIER EST UTILISÉ POUR PRODUIRE DU GNR PAR BIOMÉTHANISATION :

Selon la Fédération des producteurs de porcs du Québec (2010), les émissions de GES de la production de porc sont de 4,16 kg éqCO₂ par kilogramme de bétail vivant (éqCO₂/kgbétail vivant). Ces GES incluent les émissions liées à la production de la moulée et des céréales requises pour la moulée, aux opérations de la ferme, à la gestion du lisier et au passage à l'abattoir. Les cochons québécois pèsent en moyenne 107 kg lorsqu'ils sont abattus (Correa, J. *et al.* 2006). En combinant le poids des cochons et les émissions de GES par kg de bétail vivant, on peut déduire que l'empreinte carbone due à l'élevage du cochon entier équivaut à environ 445,12 kg éqCO₂ par cochon abattu.

Si un cochon élevé pour la viande produit en moyenne près de 3,73 kg de purin par jour (Beaulieu, M. S. 2004), alors ce cochon aura produit près de 671 kg de purin durant toute sa vie (6 mois). Selon Wang, H. *et al.* (2020), une fois séché, le purin pèse environ 13 % de son poids humide. Donc une fois séché, le purin produit durant la vie d'un cochon pèse 87,23 kg. Toujours selon la même source, la biométhanisation à partir d'excréments d'animaux produit 6,2 GJ d'énergie, 50,62 kg d'azote, 7,63 kg de phosphore et 22,99 kg de potassium par tonne de matière sèche. Donc, si tout le purin produit par ce porc durant sa vie est inséré dans le biodigester, alors ce porc produira environ 0,56 GJ d'énergie sous forme de GNR, 4,43 kg d'azote, 0,67 kg de phosphore et 2,01 kg de potassium. Sachant que la combustion de pétrole sous forme d'essence traditionnelle émet 67,44 g CO₂/GJ (EPA, 2023), alors les émissions évitées par l'utilisation du GNR produit totalisent 36,42 g éqCO₂, soit un peu moins que 0,008 % des émissions générées par l'élevage du cochon durant la vie de l'animal (36,42 g éqCO₂/445,12 kg

éqCO₂). Les émissions de GES évitées de la production d'azote, de phosphore et de potassium n'ont pas été comptabilisées dans le calcul.

SI LE LISIER EST UTILISÉ POUR PRODUIRE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE PAR COGÉNÉRATION :

Selon Freitas *et al.* (2022), avec une tonne de lisier et 1,89 m³ d'eau, un système de cogénération permettra de produire 31 kWh d'électricité, une quantité de chaleur équivalente à la combustion de 0,321 kg de propane et 3,76 kg-N de fertilisant, tout en émettant 54,38 kg de CO₂ et 2,16 kg de CH₄.

Il est vrai que la biométhanisation à la ferme peut augmenter la circularité dans l'agroécosystème, mais le processus d'élevage industriel s'inscrit quand même dans une économie linéaire où une énorme quantité de GES est émise par la production de ces produits animaux. La biométhanisation n'a pas le pouvoir de contrebalancer ces émissions de manière significative.

PRODUCTION DE GNR À PARTIR DE CULTURES BIOÉNERGÉTIQUES AVEC CSC

Certains producteurs misent sur la production de GNR à partir de cultures bioénergétiques avec capture et stockage du carbone (CSC), dans l'espoir de compenser les effets négatifs de ce genre d'opération et de repositionner le GNR agricole comme une solution pertinente de



réduction des émissions de GES. Néanmoins, les dommages que la perte d'habitats peut causer à la biodiversité restent trop importants pour être compensés par les avantages environnementaux associés à la production de GNR à partir de cultures bioénergétiques. Selon le GIEC (2022), convertir des zones ayant une valeur au niveau de la biodiversité (comme les portions de forêts natives ou des boisés laissés à l'abandon) dans les territoires agricoles pour produire de la bioénergie, même avec CSC, peut avoir de sérieuses conséquences, notamment sur la biodiversité. En plus, la CSC est un processus très énergivore, très coûteux et seulement possible dans certains sites géologiques particuliers (Wilberforce et al. 2019). Ces effets négatifs risquent fortement d'être plus importants que les effets positifs de la bioénergie.

BIOMASSE FORESTIÈRE

EXPANSION DE LA FORESTERIE

L'essor du marché de la bioénergie à partir de résidus forestiers provoquerait un intrant d'argent additionnel pour l'industrie forestière, ce qui risque de rendre la production du produit principal (comme le bois de charpente) plus attrayante économiquement et d'entraîner l'expansion de cette utilisation de la terre (la foresterie). Ce phénomène mettrait plus de pression sur les écosystèmes et augmenterait les effets négatifs liés à la foresterie (Cherubini, F. et al. 2009) (Rijal, B., Gautam, S. H. et Lebel, L. 2020).

ENJEUX POUR DES COMMUNAUTÉS AUTOCHTONES

Dans certains contextes, la production d'énergie à partir de biomasse forestière pourrait être une solution avantageuse. Par exemple, dans certaines communautés autochtones, le pétrole et le gaz naturel sont pour le moment les seuls combustibles disponibles. Malgré les questionnements des communautés autochtones face à la bioénergie, la perspective de produire un combustible local à partir de biomasse semble être une stratégie intéressante qui leur procurerait une indépendance en matière de gestion de leurs ressources (Bullock, R. C. L. et al. 2020) (Walker et al. 2019).

Par contre, lors de discussions avec des communautés autochtones canadiennes sur les énergies renou-

velables, il a été rapporté de manière récurrente qu'à maintes reprises dans le passé, des projets importants de développement d'énergie leur ont été faussement présentés comme étant une solution qui allait leur offrir une indépendance énergétique. Dans les faits, ces communautés sont encore aujourd'hui dépendantes d'une gestion colonialiste des ressources en énergie (Miller, A. et Parkins, J. 2023).

EFFETS DE LA RÉCOLTE À LONG TERME DE RÉSIDUS FORESTIERS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LE CARBONE DU SOL

Certaines études concluent que laisser entre 30 et 50 % de la biomasse forestière résiduelle sur le sol forestier est suffisant pour soutenir les écosystèmes. D'autres recommandent d'en laisser l'entièreté au sol afin de préserver à long terme la biodiversité et la productivité des écosystèmes forestiers (Rijal, B., Gautam, S. H. et Lebel, L. 2020). Selon Siol, C. et al. (2023), il serait absurde de tenter de récolter toute la biomasse en décomposition sur le sol forestier pour éviter les émissions de CH₄; la décomposition de la matière organique sur le sol est un processus essentiel pour préserver la biodiversité, favoriser le renouvellement du stock de carbone dans le sol et assurer la productivité future des forêts.

La récolte de biomasse forestière résiduelle peut augmenter techniquement le stock de biomasse utilisable sur une superficie donnée, donner plus de valeur au système forestier et réduire la probabilité de feux de forêt ou de maladies fongiques du sol. Par contre, l'extraction de ces résidus risque d'augmenter l'érosion et la compaction du sol et de diminuer son stock en carbone, ses nutriments, sa rétention d'eau, sa biodiversité et sa fertilité. De nombreuses études omettent de prendre en compte plusieurs facteurs comme les effets du carbone dans le sol sur la fertilité, les effets de la biodiversité sur le rendement des récoltes ou « l'effet de déplacement » observé lorsque les résidus de la forêt et de la transformation du bois sont déjà utilisés pour d'autres usages (Siol, C. et al. 2023) (Cherubini, F. et al. 2009).

Dans l'étude de Malcolm *et al.* (2020), la récolte de résidus forestiers pour produire de l'énergie n'est pas considérée comme une avenue pour atténuer le réchauffement climatique, car cette pratique est jugée non durable. En effet, en raison du risque important de réduire le carbone stocké dans le sol forestier (par des pratiques forestières plus intensives) et de l'importance des résidus forestiers pour la biodiversité, les chercheurs jugent que récolter les résidus de coupe pour produire de l'énergie ne constitue pas une stratégie écoresponsable digne d'être envisagée.

La récolte de résidus forestiers peut empêcher le renouvellement du stock de carbone dans le sol. Normalement, le bois mort et toute autre biomasse se décomposent lentement sur le sol de la forêt et une partie du carbone séquestré dans cette biomasse est acheminée dans le sol, ce qui contribue à lui conserver sa richesse en matières organiques. Il en résulte un sol riche en nutriments, avec une bonne rétention d'eau. Une autre partie du carbone est émis dans l'atmosphère sous la forme de CH₄. Ce processus est naturel et nécessaire pour préserver le cycle du carbone, la biodiversité et les services écosystémiques associés. Or, toute diminution du stock de carbone dans le sol, même légère, peut avoir un très gros effet global sur le cycle du carbone. En effet, la quantité de carbone stockée dans le sol de la planète est beaucoup plus élevée que la quantité stockée dans la biomasse ou dans l'atmosphère. De plus, la variation du carbone dans le sol se fait de manière lente et elle est difficile à mesurer (Siol, C. et al. 2023).



Aucune des études analysées par Siol, C. *et al.* (2023) n'aborde directement la corrélation entre la quantité de biomasse forestière résiduelle pouvant être récoltée de manière durable (pour compenser et balancer la matière organique et les nutriments du sol) et la productivité future de la forêt.

Il serait donc imprudent de conclure qu'il est écologiquement responsable d'utiliser les résidus forestiers pour produire du GNR.

L'étude réalisée par Sampo, S. *et al.* (2022) montre que parmi une grande variété de pratiques de gestion forestière dans les forêts tempérées et boréales, l'intensification des récoltes, y compris les récoltes de résidus, a un impact négatif sur les stocks en carbone dans le sol à court, moyen et long terme.

Récolter le bois endommagé qui se trouve sur les grandes superficies de forêts ravagées par les insectes et les feux de forêt pourrait être une solution intéressante pour permettre la régénération des forêts et tirer parti de cette matière difficilement valorisable. En revanche, couper l'entièreté des forêts dégradées n'est pas recommandé du point de vue du bilan carbone des forêts (Gouge, D. *et al.* 2021).

DETTE CARBONE CRÉÉE PAR LA RÉCOLTE DE BIOMASSE FORESTIÈRE

L'utilisation de biomasse forestière pour produire du GNR provoque une augmentation des émissions de GES à court terme. En effet, si la biomasse forestière résiduelle n'est pas récoltée, elle

se décompose lentement, pour une durée qui augmente avec la quantité de résidus laissés au sol. Au contraire, le GNR est rapidement brûlé et le carbone qui devrait se trouver sur le sol de la forêt est alors immédiatement envoyé dans l'atmosphère. Les émissions de GES sont donc augmentées à court terme. Si la récolte de résidus s'effectue dans une forêt boréale ayant un faible potentiel de séquestration de carbone et s'il en résulte une diminution du carbone emmagasiné dans le sol, cela peut prendre des siècles avant que le stock de carbone libéré par les émissions fugitives et la combustion du GNR soit compensé par les émissions évitées des combustibles fossiles remplacés, alors qu'entre temps l'industrie de la bioénergie aura augmenté les émissions de GES et aggravé le réchauffement climatique (Schulze, E.-D. *et al.* 2012) (McKechnie, J. *et al.* 2021) (Malcom, J. R. *et al.* 2020) (Kouchaki-Penchah, H. *et al.* 2023).

La récolte de bois résiduel pour la bioénergie est encouragée par un grand nombre d'études fondées sur des calculs de dette carbone ignorant la séquestration du carbone qui aurait lieu en l'absence de récolte, les émissions de carbone biogénique ainsi que la nécessité de consommer des combustibles fossiles pour la gestion de la forêt, la récolte et le procédé de production de bioénergie.

Une erreur commune dans les calculs d'empreinte carbone de la bioénergie est l'idée qu'une forêt plus productive (une forêt qui, grâce à sa croissance rapide, emmagasine plus rapidement le CO₂ atmosphérique) est un meilleur puits de carbone, car ce constat ignore le carbone actuellement stocké dans la biomasse. Les forêts plus productives ne sont pas les meilleurs puits de carbone. En fait, plus une forêt est productive, moins elle a de potentiel de stockage de carbone dans sa biomasse. Les forêts peu productives ont un plus grand potentiel de stockage de carbone, car bien que les arbres dans ces forêts aient une croissance plus lente, ils vivent plus longtemps. L'intensification des pratiques forestières risque fortement de rendre les forêts plus jeunes et donc d'en faire des puits de carbone moins efficaces (Schulze, E.-D. *et al.* 2012).

Kouchaki-Penchah, H. *et al.* (2023) ont réalisé une étude de cas au Québec qui estime les émissions de GES liées à la combustion de granules de bois. En corrigeant le facteur du carbone biogénique dans le calcul de remboursement de la dette carbone, l'étude conclut que la dette carbone est beaucoup plus longue à rembourser que prévu. En effet, après 100 ans, seulement 60 % du carbone atmosphérique émis par la combustion de biomasse forestière résiduelle est réabsorbé par la croissance des végétaux. Même si notre étude porte sur le GNR et non sur les granules de bois, les travaux de Kouchaki-Penchah, H. *et al.* donnent à penser que les conséquences de tenir pour acquis la carboneutralité immédiate de la bioénergie peuvent être très graves.

Aussi, peu d'études attribuent à la biomasse forestière résiduelle les émissions de GES liées à l'exploitation forestière. La plupart prennent pour acquis que la récolte de cette biomasse, considérée comme un « résidu », ne génère aucune émission de GES. Pourtant les résidus de la foresterie sont des produits forestiers auxquels il faut attribuer une part de l'ensemble des impacts environnementaux liés à l'exploitation forestière (Malolm *et al.* 2020). Domke *et al.* (2012) comptabilisent les émissions de GES liées à la décomposition naturelle de la biomasse forestière résiduelle sur le sol forestier et les comparent aux émissions de GES liées à la récolte de biomasse forestière et à la transformation de cette biomasse en électricité dans une installation de bioénergie de 26 MW. Ils concluent que les émissions de GES liées à la décomposition de la biomasse sur le sol forestier sont comparables aux émissions de GES liées à la transformation de cette biomasse en électricité mais que les émissions de GES liées à la récolte et au transport de la biomasse représentent une dette carbone qui n'est jamais repayée. Dans ce contexte, la carboneutralité n'est donc pas possible.

En revanche, si la biomasse sert à produire du GNR qui remplace un combustible fossile, il est possible que la dette carbone soit remboursée sur une période de temps de quelques décennies à un siècle dépendamment du pouvoir d'absorption de CO₂ des forêts, des techniques de gestion forestière, des procédés utilisés,

des distances de transport et de l'empreinte carbone du combustible remplacé.

REMBOURSEMENT DE LA DETTE CARBONE

Le raisonnement derrière la « carboneutralité » des produits de la forêt est basé sur le principe que la forêt est un puits de carbone, c'est-à-dire qu'elle absorbe plus de carbone qu'elle n'en émet sur une période de temps donnée.

Avec le réchauffement et l'assèchement du climat, les forêts connaissent de plus en plus d'épisodes de feux. Avec la fréquence des feux de forêts qui augmente, les forêts ne sont plus des puits mais elles deviennent des sources de CO₂ atmosphérique (Walker et al. 2019).

Cela signifie que la dette carbone engendrée par le développement de la filière GNR à partir de biomasse forestière, qui peut prendre de quelques décennies à des siècles avant d'être remboursée en temps normal (lorsque la forêt est un puits de carbone), ne sera probablement jamais remboursée.

LA FAUSSE CARBONEUTRALITÉ DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE RÉSIDUELLE

Si l'on considère que l'utilisation de biomasse forestière résiduelle pour produire du GNR augmente à court terme les émissions de GES et qu'il faut prévoir plusieurs décennies avant que cette dette carbone soit remboursée (si elle l'est un jour, étant donné que les puits de carbone qu'étaient les forêts deviennent de plus en plus des sources d'émissions de GES), il est pertinent d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes du réchauffement climatique. Ce réchauffement provoque un effet domino : les banquises de l'Antarctique et les glaciers fondent, le niveau des mers monte, la fréquence des feux de forêt augmente, le pergélisol dégèle et les tempêtes s'intensifient. Ces phénomènes peuvent avoir pour conséquence un réchauffement encore plus rapide du climat. Par exemple, la fonte de la banquise diminue l'albédo de l'océan antarctique, les feux de forêt accroissent

les émissions de GES et la fonte du pergélisol émet des quantités colossales de CH₄. La croissance éventuelle incertaine des végétaux ne pourra renverser aucun de ces phénomènes qui continuent d'accélérer le réchauffement du climat en se renforçant mutuellement de manière synergique. Le réchauffement climatique engendré par la combustion de bioénergie augmente le risque de dépasser les points de non-retour au-delà desquels le réchauffement climatique s'accélélera de manière autonome même si les émissions de GES d'origine humaine sont éliminées à 100 %. Le délai requis pour atteindre le seuil de carboneutralité (si atteignable) de la bioénergie forestière est beaucoup trop long pour contribuer à l'atteinte des cibles de mitigation du réchauffement climatique.

Si le climat se réchauffe au-delà de 2 °C, les conséquences seront désastreuses : montée du niveau des mers, vagues de chaleur meurtrières, sécheresses, tempêtes dévastatrices plus fréquentes et extrêmes, diminution du rendement des récoltes de blé, de maïs, de riz et de soya alors que selon les prévisions, la population mondiale continuera à croître de quelques milliards de personnes. Ces événements augmenteront la famine, perturberont l'économie, provoqueront des migrations de masse, des conflits civils et des guerres. Une majorité de scientifiques s'accorde pour dire qu'il faut diminuer sans tarder les émissions de GES de manière draconienne et atteindre le « net zéro » au plus tard en 2050 (Sterman, J. et al. 2022).

TRANSFORMATION

L'extraction de biomasse n'est que la première étape de la production du GNR. L'étape suivante inclut la collecte, le transport et la concentration de la biomasse vers le site de traitement, le traitement industriel de la biomasse pour en extraire du CH_4 , c'est-à-dire du méthane, ainsi que la disposition du substrat résiduel solide et liquide. Nous allons maintenant examiner les enjeux relatifs aux technologies de transformation de la biomasse en GNR. Tel qu'indiqué en introduction, nous nous intéressons ici aux technologies dites de première et deuxième générations. Les technologies de troisième génération, qui visent la production de e-gaz à partir d'hydrogène vert, tombent à l'extérieur du périmètre analytique de cette étude. Tournons-nous donc maintenant vers les procédés qui transforment la matière organique en énergie.

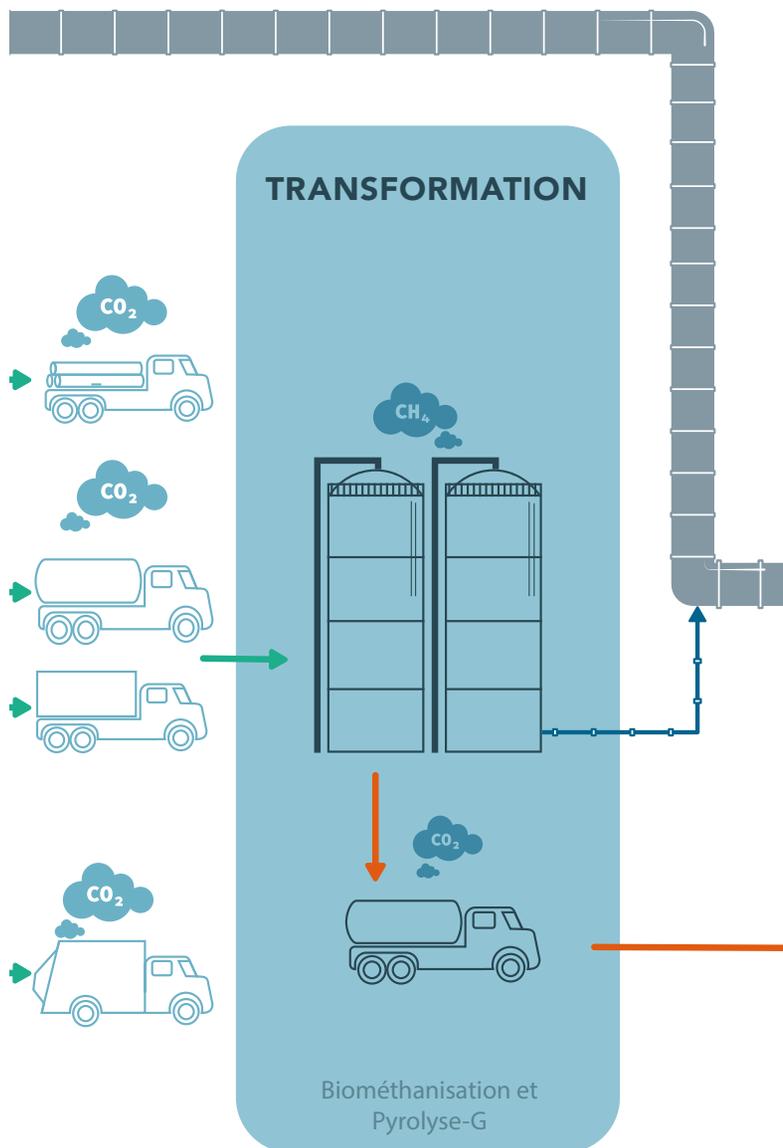
BIOMÉTHANISATION DE BIOMASSE ISSUE DU SECTEUR DES MATIÈRES RÉSIDUELLES ET DU SECTEUR AGRICOLE : GNR DE PREMIÈRE GÉNÉRATION

La biométhanisation consiste à laisser la matière organique se dégrader dans un biodigesteur avec oxygène (aérobie) ou sans oxygène (anaérobie) pour produire du biogaz et du digestat. Le procédé le plus commun de biométhanisation est la digestion anaérobie. Les sources de biomasse utilisées comme intrants pour la biométhanisation sont la biomasse issue du secteur des matières résiduelles (potentiel technique de 48,55 PJ/année en 2030) et la biomasse provenant du secteur agricole (potentiel technique de 25,45 PJ/année en 2030).

Le rendement énergétique (en gigajoules par tonne de matière sèche) du biogaz récolté au-dessus de la matière organique en fermentation varie selon le type de biomasse. Il se situe autour de 12,4 pour les résidus alimentaires, 6,2 pour les fumiers et 7,1 pour les résidus de récoltes (Wang, H. et al. 2020). Le « rendement de conversion » correspond au contenu énergétique du GNR divisé par le contenu énergétique de la biomasse utilisée en intrant. Dans l'étude de Blair et Mabee (2020), le rendement de conversion de la digestion anaérobie est de 35 % en utilisant un mélange d'écorces, de résidus de l'industrie du bois sous forme liquide et de résidus de récolte.

PRÉTRAITEMENT

Le traitement approprié varie selon le type de biomasse utilisé. Par exemple, si la biomasse contient un haut taux de lignine, le prétraitement servira à briser cette substance pour rendre les éléments disponibles à la fermentation et, ainsi, à la production optimale de CH_4 . Divers procédés de prétraitement sont possibles. Plusieurs nécessitent des installations coûteuses et consomment beaucoup d'énergie, ce qui peut augmenter considérablement l'empreinte environnementale du processus de biométhanisation, même si l'on utilise de l'électricité de source renouvelable. Le prétraitement biologique



est moins énergivore et donc plus accessible pour les producteurs de biométhane à petite échelle (Michailos, S. et al. 2021) (Dar, R. A. et al. 2021). En fonction des intrants et des conditions de fermentation, le biogaz composé en majeure partie de CH₄ (40 % à 70 %) et de CO₂ (15 % à 60 %) peut comporter des traces d'autres éléments.

POST-TRAITEMENT, RAFFINAGE DU BIOGAZ

Le raffinage du biogaz n'est pas obligatoire. On peut utiliser le biogaz directement pour produire de la chaleur ou de l'électricité localement en utilisant la cogénération (Michailos, S. et al. 2021). Un post-traitement est toutefois impératif pour transformer le biogaz en GNR. Si le gaz inclut des substances non souhaitées comme de la vapeur d'eau, des siloxanes, des composés aromatiques, des composés organiques volatils, de l'hydrogène, du sulfure d'hydrogène, de l'ammoniac, de l'oxygène, de

l'azote, du monoxyde de carbone et d'autres particules, il devra d'abord être traité dans une première étape afin de le purifier. Dans une seconde étape, le CO₂ est séparé du CH₄ pour laisser presque seulement du CH₄. Les méthodes de séparation conventionnelles incluent l'absorption, l'adsorption, la séparation par membranes et la distillation cryogénique entre autres. Il y a beaucoup d'innovations dans le domaine du raffinage du biogaz et il existe maintenant des procédés de séparation permettant de produire un gaz composé à plus de 99 % de CH₄. Par contre, malgré la grande efficacité de la séparation, ces procédés sont liés à des problèmes opérationnels et environnementaux. Ils sont souvent très énergivores et comportent des coûts d'investissement élevés. Des problèmes peuvent aussi survenir comme la corrosion et la dégradation des absorbants, la précipitation des sels ou le moussage.

La technologie la plus répandue et la plus développée est l'absorption par oscillation de pression (PSA). Les impacts environnementaux de cette technologie sont liés aux importantes fuites de CH₄ et à la consommation d'énergie. Selon Kohlheb, N. et al. (2020), l'empreinte carbone de la PSA se situe entre 83,6 et 85,3 kg éqCO₂/100 Nm³ de GNR produit. Une grande partie de cette empreinte carbone (70 %) serait évitée en utilisant un mix énergétique provenant de sources entièrement renouvelables, au lieu du mix énergétique européen. Pour comparer, l'empreinte carbone du mix énergétique européen est de 334 g éqCO₂/kWh (Scarlat et al. 2022) alors que celle du mix énergétique du Québec est de 34,5 g éqCO₂/kWh (Levasseur et al. 2021). Le gaz riche en CO₂ peut ensuite être utilisé dans la récupération assistée du pétrole (un procédé qui n'a pas d'application au Québec), dans la capture et

le stockage du carbone ou pour d'autres applications industrielles, par exemple dans l'industrie alimentaire (Christopher, S. et al. 2019) (Gilassi, S. et al. 2019).

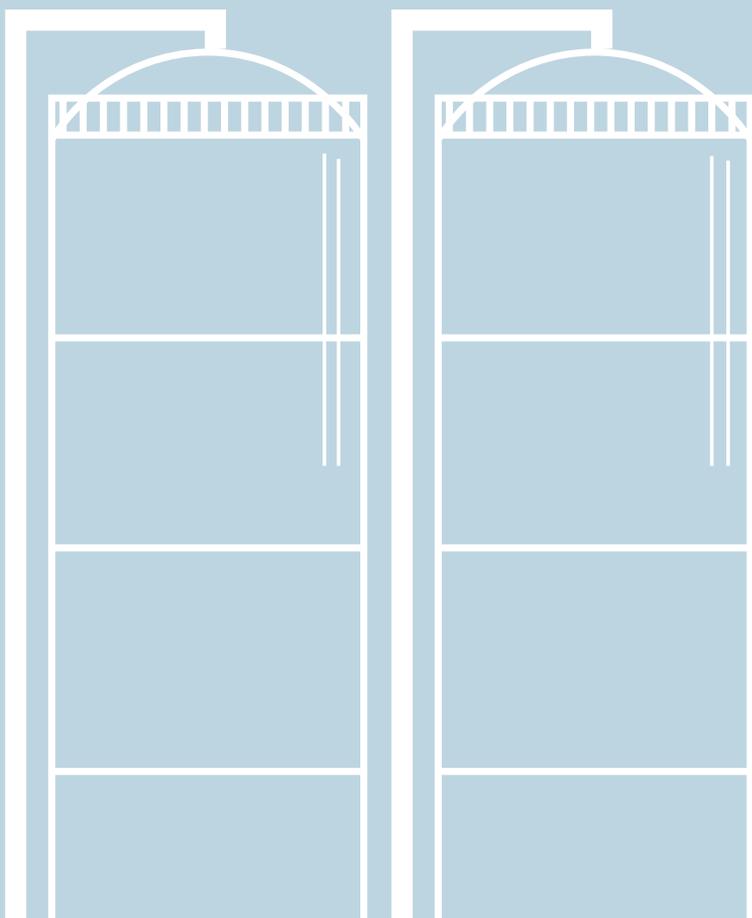
FUITES DU BIODIGESTEUR

L'étude de Henrik et al. (2022) indique que l'utilisation des excréments animaux pour faire de la biométhanisation procure des avantages environnementaux grâce aux émissions de GES évitées durant le stockage de la biomasse (gestion du fumier) et grâce au remplacement d'un combustible fossile par le GNR produit. Par contre, les fuites de CH₄, tout au long de la chaîne de production et de distribution du GNR, peuvent réduire ces avantages d'environ 7 % pour chaque point de pourcentage additionnel de fuite de CH₄.

Les fuites de CH₄ varient en fonction des conditions du biodigesteur et des opérations. Par exemple, dans l'étude de Baldé, H. et al. (2022), un biodigesteur ayant des défauts d'étanchéité présentait des fuites de CH₄ de 5,5 %, alors qu'un biodigesteur plus étanche présentait des fuites de 0,6 %.

Selon Bakkaloglu, D., Cooper, J. et Hawkes, A. (2022), les émissions de GES liées au cycle de vie de l'énergie produite par biométhanisation se situent entre 2,5 et 343 g éqCO₂/MJ ou entre 0,8 et 182 g éqCO₂/GJ si les émissions provenant du digestat ne sont pas incluses. La très grande variabilité dans ces émissions de GES s'explique par le fait que certaines installations sont des « super-émetteurs », c'est-à-dire des installations qui génèrent des émissions de GES de manière disproportionnée, comparativement aux autres installations mieux gérées, en raison d'une instabilité de leurs émissions, d'une utilisation insuffisante des équipements ou de stratégies inadéquates pour les opérations et la maintenance des équipements.

Par rapport aux émissions de CH₄ provenant de la décomposition de la matière organique, Emily, G. (2020) explique qu'il n'est pas adéquat de proposer une solution d'atténuation du réchauffement du climat en comparant un scénario dans lequel on laisse simplement le



CH₄ provenant de la décomposition de la matière organique se libérer dans l'atmosphère à un scénario où le CH₄ est transformé en GNR pour remplacer un combustible fossile.

Premièrement, les politiques sont de plus en plus soucieuses du climat. Il n'est pas adéquat de proposer un scénario de base où les émissions de CH₄ ne sont pas gérées dans les dépotoirs, à la ferme, dans le secteur des matières résiduelles, etc. Une base de comparaison appropriée, sans production de GNR, serait un scénario où les émissions de CH₄ pouvant être collectées (biogaz) pour produire du GNR sont directement torchées sur place. Le torchage du biogaz transforme le CH₄ en CO₂ avec une efficacité théorique de 99 % mais qui peut dépendre de différents facteurs, dont la vitesse des vents, qui affectent la buse d'éjection. En règle générale, les émissions de GES associées à ce torchage sont similaires à celles provenant de la combustion du GNR à la fin de sa chaîne de production.

Toutes les manipulations, tous les procédés et tous les transports additionnels généreront des émissions de GES supplémentaires. Par exemple, les différents procédés thermochimiques (dans le cas des technologies de deuxième génération) et microbiologiques (dans le cas de la biométhanisation) qui maximisent la production de CH₄ augmenteront d'autant les fuites de CH₄ sur toute la chaîne de production et d'approvisionnement du GNR.

DIGESTAT

Le digestat est le coproduit liquide et solide de la transformation de la biomasse en biogaz. L'application du digestat comme fertilisant peut être une excellente solution environnementale et économique. Elle favorise la circularité de la matière dans l'agroécosystème. Le digestat possède un très grand potentiel fertilisant et peut remplacer les engrais chimiques. Par rapport aux déchets organiques « non digérés », il est plus hygiénique et plus riche en ammoniac, en plus d'offrir une stabilité microbienne. Par contre, si le digestat n'est pas correctement appliqué, il peut affecter le sol et la croissance des plantes. WSP (2021) note qu'il y a une incertitude scientifique sur l'impact sur la santé et la conservation des

sols d'utiliser le digestat issu de la digestion anaérobie en remplacement des déjections animales, particulièrement lorsque cela se fait à grande échelle.

L'élimination du digestat peut également s'avérer problématique. En effet, si le digestat est appliqué de manière précoce et s'il est retenu dans le sol sans être utilisé par les plantes, cela peut entraîner une perte de nutriment vers les couches plus profondes du sol ou des émissions de nitrate (NO₃) dans l'eau souterraine.

De plus, le digestat peut contenir plusieurs matières toxiques pour les humains, les organismes vivants et les écosystèmes. Il peut renfermer des métaux lourds (Cd, Pb, Hg, Ni, Zn, Cu et Cr), des polluants organiques persistants (POPs), des produits des procédés industriels.

De plus, le digestat peut contenir plusieurs matières toxiques pour les humains, les organismes vivants et les écosystèmes. Il peut renfermer des métaux lourds (Cd, Pb, Hg, Ni, Zn, Cu et Cr), des polluants organiques persistants (POPs), des produits des procédés industriels comme des dioxines et des furanes, des produits de combustion incomplète (PAH, phtalates, PBDE), des médicaments, des produits de soins personnels, des pesticides persistants, des traces d'autres pesticides, des antibiotiques, des contaminants émergents et des produits chimiques provenant de l'agriculture. Le digestat doit être stocké, employé et éliminé correctement pour minimiser les émissions d'odeurs, de polluants (NO_x, NH₃ et CH₄) et d'aérosols (Lamolinará, B. et al. 2022).

Un stockage inadéquat ou une application incorrecte du digestat anaérobie peuvent mener à une perte de son pouvoir fertilisant, à des émanations toxiques (ammoniac et NO) ainsi qu'au lessivage d'éléments nutritifs dans les cours d'eau de surface et souterrains (Nkoa, R. 2014).

INSTALLATIONS DE BIOMÉTHANISATION

L'empreinte environnementale de la production des biodigesteurs semble plus importante pour les biodigesteurs tubulaires en plastique à cause de leur courte durée de vie ainsi que des matériaux servant à la fabrication des tubes et de la géomembrane. Les dômes fixes sont habituellement composés de matériaux à plus longue durée de vie que les biodigesteurs en plastique. Les problèmes environnementaux rapportés sont liés à la production du ciment et des briques. De plus, ces types de biodigesteurs sont plus susceptibles d'avoir des fuites. Des biodigesteurs étanches utilisant des matériaux environnementalement propres à longue durée de vie doivent être prioritaires (Garfí, M. et al. 2016). La durée de vie des biodigesteurs à dôme fixe est de plus de 20 ans, d'au plus 15 ans pour les installations à tambour flottant et de 2 à 5 ans pour les biodigesteurs en ballon (Abubakar, A. M. 2022). Ceci étant dit, l'analyse de cycle de vie montre que la fabrication et l'installation contribuent peu à l'impact environnemental total du biodigesteur (Mezzullo, W. G. et al. 2013).

MAUVAISE GESTION DE LA BIOMÉTHANISATION

Les points positifs de la biométhanisation sont nombreux et rares sont les études qui ne suggèrent pas l'adoption de cette technologie pour diminuer l'empreinte carbone liée à l'enfouissement des matières résiduelles organiques et au secteur agricole. La distance de transport joue beaucoup dans le bilan carbone de la biométhanisation et plusieurs études recommandent les plus petites distances possibles entre les différentes étapes du processus de production (Subbarao, P. et al. 2023) (Jain, S. et Gualandris, J. 2023). Ainsi, la question se pose à savoir si la biométhanisation doit se faire à l'échelle domestique ou industrielle.

D'un côté, les petits systèmes de biométhanisation ont un meilleur potentiel pour réduire les émissions de GES liées aux déchets domestiques ou à la ferme, vu qu'ils évitent les émissions de GES associées au tri et au transport des résidus organiques. Ils évitent aussi les émissions liées à la production et au transport du compost et des fertilisants qui auraient été nécessaires sans l'utilisation du digestat (Chan, Y. C. et al. 2011) (Subbarao, P. et al. 2023).



D'un autre côté, les risques associés à la mauvaise gestion du processus font en sorte que, selon Bruun, S. *et al.* (2014), la biométhanisation à petite échelle peut se transformer en véritable « bombe climatique » s'il n'y a pas de mécanisme pour assurer une gestion appropriée du processus. Cette étude concerne davantage les pays en développement où les biodigesteurs sont souvent construits de manière artisanale et où les opérations sont peu ou pas réglementées. Les risques restent quand même préoccupants si cette technologie se répand et si la gestion des installations et du digestat est remise entre les mains des individus sans une formation adéquate.

Selon Jain et Gualandris (2023), l'engouement actuel pour la biométhanisation et le soutien politique accordé à cette technologie sont fondés sur une erreur : celle d'ignorer d'autres approches plus efficaces en matière d'atténuation des changements climatiques. La réutilisation maximale et locale de la matière avant transformation a beaucoup d'avantages du point de vue de l'économie circulaire. Par exemple, notre système d'alimentation doit être transformé pour prévenir le gaspillage alimentaire et pour optimiser la production, la distribution et la consommation afin de diminuer les impacts sur les émissions de GES, la consommation d'eau, la biodiversité et la sécurité alimentaire. Avant de se précipiter sur de nouvelles politiques d'écologie industrielle souvent erronées car fondées sur des « hiérarchies linéaires de récupération alimentaire et des préférences politisées », il est nécessaire de faire des évaluations holistiques des possibilités écoresponsables de gestion des matières organiques en question (Jain et Gualandris 2023).

PYROLYSE-GAZÉIFICATION ET HYDROGÉNATION PYROCATALYTIQUE DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE : GNR DE SECONDE GÉNÉRATION

Les processus de pyrolyse-gazéification et d'hydrogénation pyrocatalytique consistent à traiter la biomasse à haute température pour favoriser la production de CH₄. L'intrant utilisé par ces technologies de seconde génération est la biomasse forestière (potentiel technique de 259,45 PJ/année en 2030), qui représente l'essentiel du potentiel technique inventorié par WSP 2021.

Dans le procédé de la pyrolyse, la biomasse sèche (moins de 10 % d'eau) est traitée à haute température (350 à 700 °C) dans un environnement à faible teneur en oxygène, ce qui produit du biochar solide, une huile pyrolytique liquide et du gaz non condensable. Le rendement et la qualité des produits offerts par la pyrolyse sont grandement dépendants des caractéristiques de la biomasse et des paramètres opérationnels du processus. Les réels impacts environnementaux de la pyrolyse sont encore inconnus (Yu, Z. *et al.* 2022). La maturité de cette technologie pourrait être atteinte après 2030 (Patrick, F. *et al.* 2020).

Les systèmes de pyrolyse mobile font partie des techniques émergentes. Ces systèmes peuvent conférer un avantage sur les sites forestiers où la biomasse est très dispersée. Ils peuvent aussi permettre une diminution des GES liés au transport de la biomasse. Par contre, la pyrolyse mobile nécessite de l'énergie provenant de copeaux de bois, de diesel ou d'électricité. Là où l'empreinte carbone du mix énergétique est très faible comme c'est

Selon Jain et Gualandris (2023), l'engouement actuel pour la biométhanisation et le soutien politique accordé à cette technologie sont fondés sur une erreur : celle d'ignorer d'autres approches plus efficaces en matière d'atténuation des changements climatiques.

le cas au Québec, il peut être plus avantageux de transporter la biomasse à une installation fixe branchée sur le réseau électrique. Il y a aussi un risque d'incendie lié aux systèmes de pyrolyse mobile, ce qui peut être un autre argument en défaveur de ce type de système (Puettmann, M. *et al.* 2019).

COPRODUITS DE LA PYROLYSE

L'huile pyrolytique, le produit en phase liquide provenant de la pyrolyse, peut être brûlée pour générer de la chaleur. Toutefois, son pouvoir calorifique est peu élevé (autour de 18 MJ/kg) et des problèmes peuvent surgir durant la combustion à cause de taux élevés en espèces réactives de l'oxygène (ROS). Une huile de haute qualité peut être produite en sélectionnant les paramètres de pyrolyse appropriés et en utilisant une biomasse ayant une très faible teneur en eau, en oxygène et en cendre, mais une haute teneur en cellulose. Un traitement est impératif afin de transformer l'huile pyrolytique pour en faire un GNR pouvant remplacer les combustibles fossiles conventionnels, mais cette technologie n'est pas encore au point. Plusieurs défis entourent le traitement de l'huile pyrolytique, liés notamment à sa haute viscosité, sa basse valeur calorifique et sa portion aqueuse (Steele *et al.* 2021) (Akhtar *et al.* 2018) (Yu, Z. *et al.* 2022).

La fraction aqueuse de l'huile pyrolytique, un vinaigre de bois, pourrait être utilisée comme biofongicide en agriculture. L'utilisation de cette matière comme biofongicide peut être plus ou moins avantageuse selon qu'elle remplace ou non un fongicide typique (et non un autre biofongicide) et selon la quantité de vinaigre de bois qu'il est nécessaire d'utiliser pour remplacer efficacement ce fongicide typique, le cas échéant (Brassard, P. *et al.* 2021).

Le biochar produit lors de la pyrolyse peut ensuite être utilisé pour l'étape de la gazéification. Cette matière riche en carbone est traitée à une température de 650 à 1200 °C en présence d'agents de gazéification (air, oxygène, vapeur, CO₂), ce qui produit un « gaz de synthèse » qui doit ensuite subir des post-traitements pour produire du GNR (Akhtar *et al.* 2018).

Le biochar produit par la pyrolyse des résidus forestiers peut aussi être redonné à la terre et avoir des impacts positifs sur la santé des sols et la productivité des récoltes. C'est toutefois la séquestration du biochar qui semble avoir le meilleur effet au niveau de l'atténuation du réchauffement climatique. En effet, la séquestration du biochar permettrait de capturer le carbone et de le garder dans le sol pour une période dépendant du type de biochar et des conditions du sol. D'après 12 études publiées après 2010, le potentiel annuel global de séquestration du carbone par le biochar d'ici 2050 serait entre 0,03 et 6,6 Gt eqCO_2 (Brassard, P. et al. 2021). Cependant, des recherches additionnelles sur l'impact du vieillissement du biochar sur les propriétés du sol sont nécessaires, car cet impact dépend des intrants de la pyrolyse et du procédé de pyrolyse utilisé (Lévesque, V. et al. 2021).

Brassard *et al.* (2021) estiment que la pyrolyse de résidus forestiers est une pratique durable d'un point de vue environnemental, surtout si le combustible généré remplace des combustibles fossiles, si le vinaigre de bois remplace un fongicide typique et si le biochar est séquestré dans le sol pour une période de 100 ans.

Des analyses de cycle de vie doivent être réalisées afin de déterminer le taux de retour énergétique de la production de GNR par pyrolyse-gazéification à partir de la récolte de biomasse forestière résiduelle jusqu'à la combustion du GNR à la fin de sa vie, ce qui permettra de cerner la consommation énergétique totale de la chaîne de production et de distribution du GNR.

INSTALLATIONS POUR LA PYROLYSE-GAZÉIFICATION

L'infrastructure nécessaire à la pyrolyse comprend le sécheur, l'équipement de broyage, le pyrolyseur et l'installation de conditionnement. La consommation en électricité nécessaire pour le processus est de 2,81 MJ/kg_{biomasse} ou 780,56 kWh par Mg de biomasse. La durée de vie de l'infrastructure est de 50 ans (Brassard, P. et al. 2021).

Pour le processus de gazéification, plusieurs types de réacteurs existent. Une revue des avantages et inconvénients de ceux-ci est donnée par McKendry (2002).

HYDROGÉNATION PYROCATALYTIQUE

La présence d'hydrogène dans un combustible augmente sa valeur calorifique et améliore sa combustion. Cela a mené les chercheurs à employer de l'hydrogène pendant le processus de pyrolyse, un procédé qu'on appelle hydrogénation pyrocatalytique. La biomasse forestière est d'abord broyée (aucun autre prétraitement n'est nécessaire) et le processus est ensuite très similaire à la pyrolyse, sauf qu'il se produit en présence d'hydrogène pour maximiser la production de CH_4 et que le coproduit de charbon est brûlé pour fournir la chaleur au processus. La présence de l'hydrogène permet également d'éliminer le contenu en oxygène dans l'huile pyrolytique. La PSA est ensuite utilisée pour raffiner le gaz et produire du GNR. Le rendement de conversion de l'hydrogénation pyrocatalytique est de 59 % (Blair et Mabee 2020).

INSTALLATIONS POUR L'HYDROGÉNATION PYROCATALYTIQUE

Pour le prétraitement de la biomasse forestière, un broyeur est nécessaire (Blair et Mabee 2020). Aucune information additionnelle n'a été trouvée sur les installations nécessaires à l'hydrogénation pyrocatalytique.

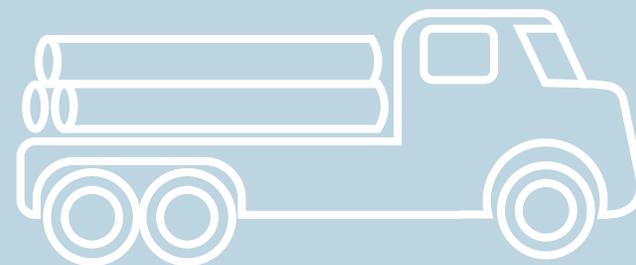
COGÉNÉRATION

La cogénération peut utiliser comme combustible du biogaz non purifié provenant d'un biodigesteur ou de la biomasse ligneuse broyée (biomasse forestière résiduelle ou résidus de récoltes). L'unité de cogénération est composée d'un moteur à combustion interne qui entraîne un générateur électrique pour produire de l'électricité et de la chaleur.

Ncube *et al.* (2021) ont réalisé une analyse de cycle de vie des impacts environnementaux d'une usine de biométhanisation et comparé la production de chaleur et d'électricité par cogénération avec la production de GNR depuis le biogaz généré dans le biodigesteur. Cette étude a montré que 90 % des impacts environnementaux de la cogénération sont dus à la production du biogaz dans le biodigesteur. Les autres impacts sont dus aux émissions de CO_2 du moteur à combustion interne, à la production et au transport de l'huile pour le moteur ainsi qu'à la

fabrication et à la distribution des matériaux qui constituent l'unité de cogénération. L'étude montre que les impacts environnementaux qui sont dus à la purification du biogaz pour produire du GNR sont plus importants que pour la cogénération. Les émissions de GES totales pour le traitement d'une tonne métrique humide de matière organique est de 11,8 kg eqCO_2 pour la production d'électricité et de chaleur par cogénération et de 29,6 kg eqCO_2 pour la production de GNR par biométhanisation et purification du biogaz.

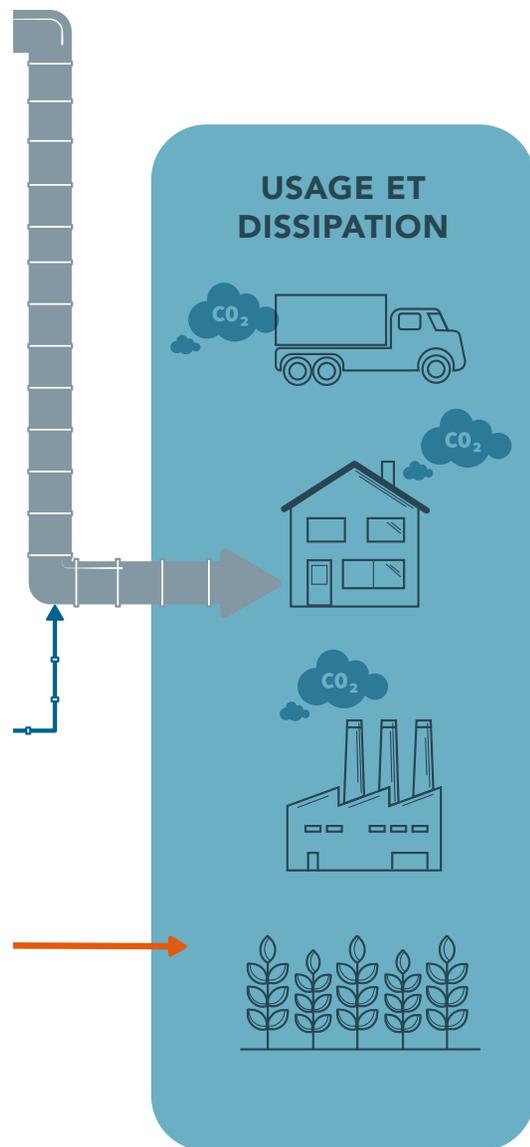
La cogénération permettant de subvenir aux besoins locaux en énergie des installations ou de la ferme, son utilisation comporte un intérêt au niveau de l'augmentation de la circularité de l'agroécosystème ou des infrastructures. C'est une solution avantageuse, car elle permet à la fois de gérer les émissions de carbone biogénique et de produire de l'énergie utilisable localement sans nécessiter de post-traitements ni de transports additionnels.



USAGE ET DISSIPATION

Une fois produit, le GNR a les mêmes caractéristiques que le gaz naturel fossile. Sa combustion émet 206,7 g $\text{éqCO}_2/\text{KWh}$. En comparaison, la combustion du pétrole émet 261,9 g $\text{éqCO}_2/\text{KWh}$ et celle du diesel émet 265 g $\text{éqCO}_2/\text{KWh}$ (Holmgren et al. 2015).

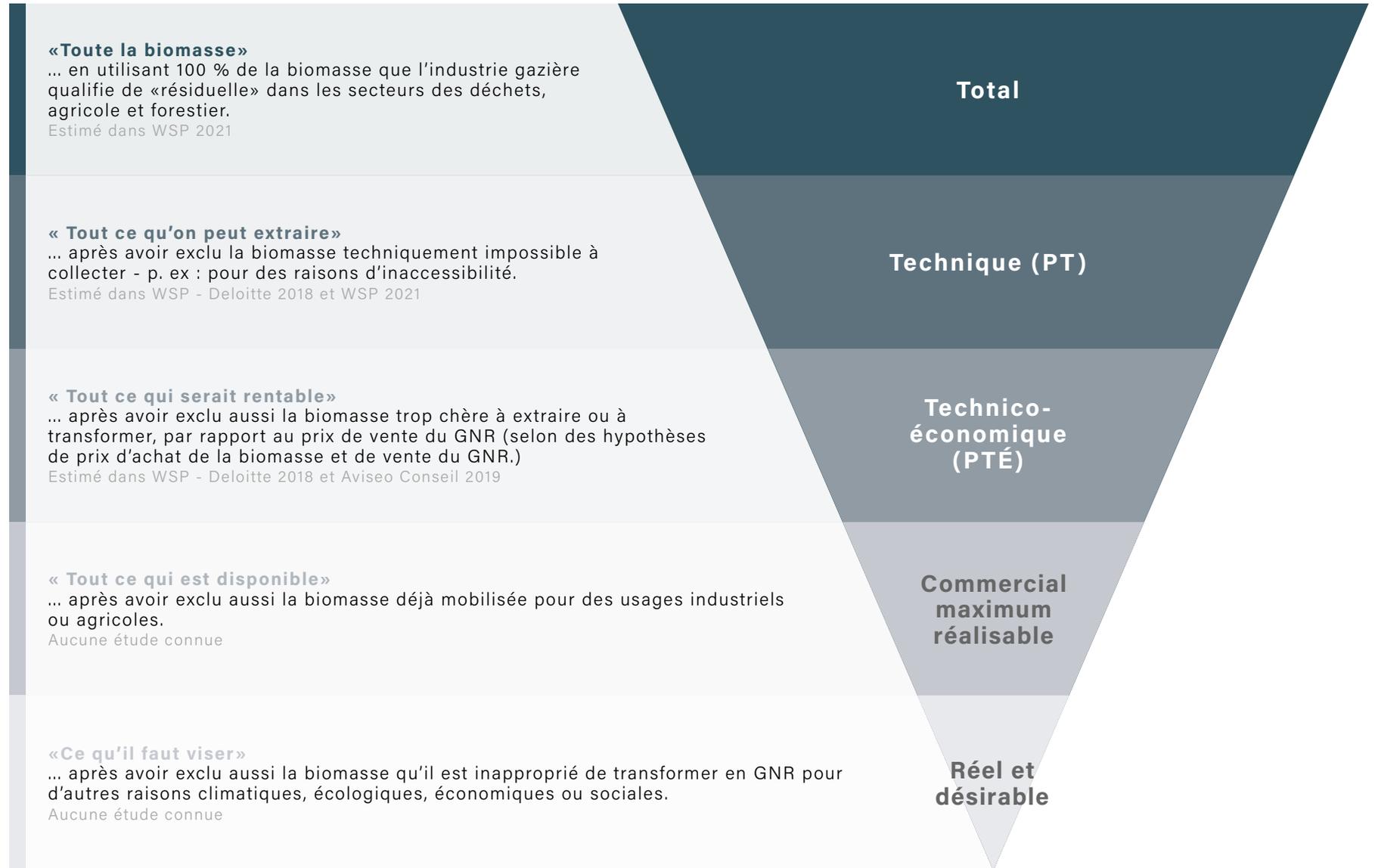
La distribution du GNR implique des transports routiers dont l'empreinte carbone augmente proportionnellement aux distances de transport. L'injection du GNR directement dans les gazoducs d'Énergir et de Gazifère permet de tirer parti d'infrastructures existantes. Par contre, il convient de noter qu'en vertu du règlement sur le volume minimal de GNR devant être injecté dans le réseau de gaz naturel, seulement 10 % du gaz qui circulera dans leurs tuyaux en 2030 sera de source renouvelable; plus de 90 % de ce gaz sera toujours d'origine fossile.



2 ■ BIOMASSE DISPONIBLE POUR LA PRODUCTION DE GNR AU QUÉBEC

POTENTIEL DE PRODUCTION DE GNR AU QUÉBEC

Le volume de GNR qu'il serait possible de produire...



RAPPORTS DE RECHERCHE EXISTANTS SUR LE POTENTIEL TECHNIQUE (PT) ET TECHNICO-ÉCONOMIQUE (PTÉ)

NOTE SUR L'EXPRESSION « GISEMENTS DE BIOMASSE » | Le mot « gisement » est fréquemment utilisé pour désigner la quantité de biomasse potentiellement disponible pour la production de GNR. Or, ce mot peut laisser entendre que la quantité de biomasse potentiellement disponible est fixe et immuable (à l'instar d'un gisement pétrolier ou minier, par exemple) alors qu'en réalité, elle peut être augmentée ou diminuée selon les pratiques des divers milieux d'extraction. C'est pourquoi nous lui avons préféré l'expression « sources de biomasse ». En foresterie, on parle également de « potentiel adaptatif » plutôt que de « gisement ».

NOTE SUR LA VALEUR ÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMASSE | Dans le présent rapport, nous exprimons tous les potentiels énergétiques estimés dans les rapports de WSP-Deloitte (2018), Aviseo Conseil (2019) et WSP (2021) en termes de mètres cubes (m³) de GNR purifié ou en pétajoule (PJ) d'énergie selon le rendement énergétique suivant : 26,853 m³ de gaz naturel pour produire 1,0 gigajoule (GJ) (Régie de l'énergie du Canada 2016). Un PJ équivaut à 1 000 000 GJ. Ces données en énergie (PJ) n'incluent pas l'énergie nécessaire à la production du GNR, seulement l'énergie libérée lors de sa combustion finale.

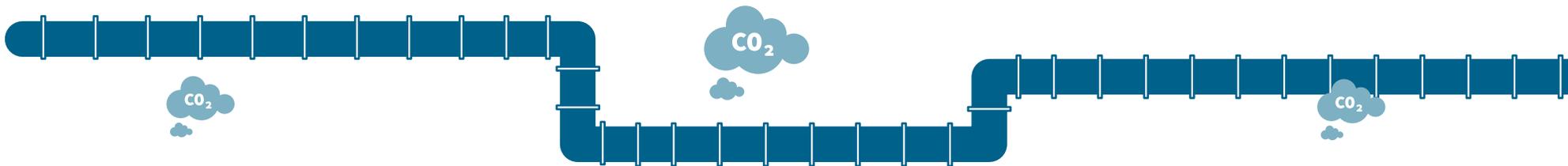
Depuis 2018, trois rapports ont été publiés sur le potentiel de production de GNR au Québec, à partir d'une estimation de la biomasse disponible pour la biométhanisation ou la pyrolyse pour chacune des sources primaires de biomasse (issue de matières résiduelles, agricole et forestière) (WSP-Deloitte 2018) (Aviseo Conseil 2019) (WSP 2021). Deux de ces études ont été commandées par l'entreprise de distribution de gaz Énergir, soit WSP-Deloitte 2018 et Aviseo Conseil 2019, tandis que l'étude la plus récente, publiée par WSP Canada en 2021, a été commandée par le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. Ces rapports puisent manifestement dans les mêmes bases de données, avec certains ajustements en 2021, mais présentent des angles et des degrés de détails différents les uns des autres. On y identifie quatre niveaux de potentiel de production de GNR : le potentiel total qui est une grandeur théorique, le potentiel technique (PT), le potentiel technico-économique (PTÉ) et le potentiel commercial maximum réalisable. Le tableau qui suit présente une version schématisée et simplifiée des définitions de ces quatre niveaux proposées dans les études mentionnées, auxquels nous en avons ajouté un cinquième : le potentiel réel et désirable de production de GNR selon le Front commun pour la transition énergétique.

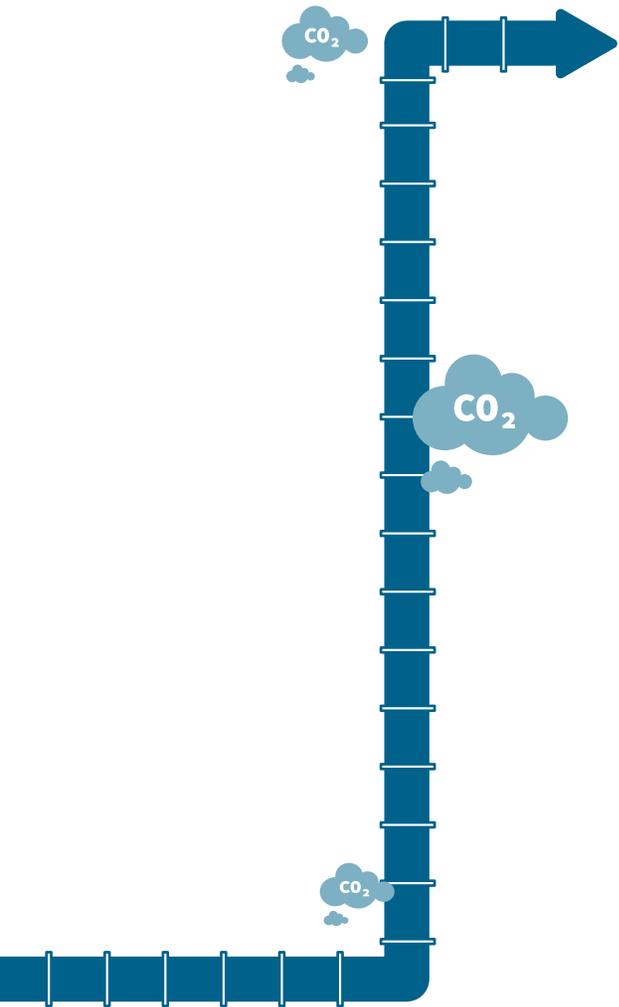
Nous n'avons pas au Québec d'étude accessible estimant la biomasse réellement disponible en ce moment ou dans un futur proche (2030), compte tenu des usages concurrentiels de la biomasse, soit le potentiel commercial maximum réalisable

Le potentiel total représente 100 % de la source de biomasse considérée. Le potentiel technique (PT) est une estimation des volumes de GNR que l'on peut obtenir à partir des technologies existantes en faisant abstraction des coûts d'extraction et de transformation, ce que fait l'estimation du potentiel technico-économique (PTÉ). Par contre, ni le potentiel technique, ni le potentiel technico-économique ne tiennent compte des autres usages actuels ou futurs de la biomasse. Ces estimations présupposent ainsi la disponibilité commerciale et économique des sources de biomasse, ce qui n'est pas du

tout évident, comme nous le verrons dans les prochaines pages. Nous n'avons pas au Québec d'étude accessible estimant la biomasse réellement disponible en ce moment ou dans un futur proche (2030), compte tenu des usages concurrentiels de la biomasse, soit le potentiel commercial

maximum réalisable. Finalement, il faudrait soustraire de ce volume potentiel la biomasse qui devrait être utilisée différemment ou ne pas être extraite pour des raisons écologiques, climatiques ou sociales à partir des critères d'une transition efficace vers la carboneutralité, respectueuse des limites biophysiques de la planète et porteuse de justice sociale. Le calcul de cette grandeur n'existe pas non plus, mais ce rapport peut être considéré comme un premier jalon vers l'estimation de ce potentiel.





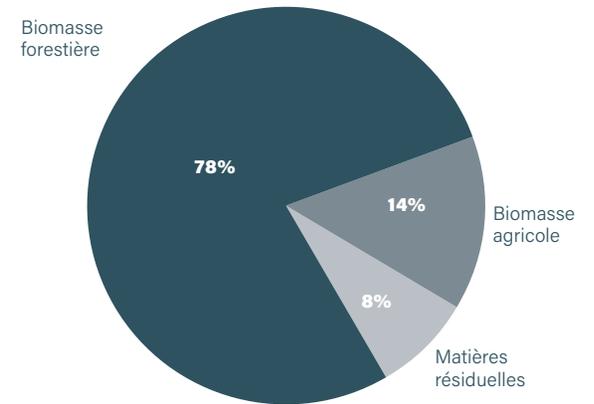
**POTENTIEL TECHNIQUE (PT)
SELON WSP CANADA INC. (2021)**

Dans son *Inventaire de la biomasse disponible pour produire de la bioénergie et portrait de la production de la bioénergie sur le territoire québécois* réalisé pour le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021), WSP Canada Inc. indique que le potentiel technique de production de GNR au Québec représente 326,4 PJ/an en 2020 et 333,5 PJ/an en 2030. Le rapport évalue la contribution des trois types de biomasse jugés pertinents pour cet usage : la biomasse agricole (25,45 PJ/an en 2030), la biomasse issue des matières résiduelles (48,55 PJ/an en 2030) et la biomasse forestière (259,45 PJ/an en 2030).

Comme nous l'avons souligné plus haut, ce potentiel technique n'est pas une grandeur réelle, réalisable ou désirable de production de GNR. Néanmoins, ces chiffres nous permettent déjà de faire une observation importante : c'est de la forêt québécoise que provient l'essentiel de la biomasse considérée pour la production de GNR. À lui seul, le potentiel technique estimé de cette source correspond à 78 % du potentiel technique total. Cette dépendance de la biomasse forestière pour une production massive de GNR est une constante dans les trois études que nous avons analysées.

c'est de la forêt québécoise que provient
l'essentiel de la biomasse considérée pour
la production de GNR.

**POTENTIEL TECHNIQUE 2030 DE
PRODUCTION DE GNR PAR TYPE DE
BIOMASSE** SELON WSP CANADA 2021



POTENTIEL TECHNIQUE 2030 (PT 2030) DE PRODUCTION DE GNR

SELON WSP CANADA INC. (2021)

	PJ/an	Millions m ³ de GNR/an	
Total	333,5	8 955	100 %
À base de biomasse issue des matières résiduelles	48,55	1 304	14 %
À base de biomasse agricole	25,45	683	8 %
À base de biomasse forestière	259,45	6 967	78 %

POTENTIEL TECHNICO-ÉCONOMIQUE (PTÉ) SELON WSP-DELOITTE (2018)

Un consortium formé de WSP Canada et Deloitte a publié en novembre 2018 une étude commandée par Énergir et intitulée *Production québécoise de gaz naturel renouvelable (GNR) : un levier pour la transition énergétique, Évaluation du potentiel technico-économique au Québec (2018-2030)*. Les calculs effectués dans le cadre de cette étude reposaient sur l'hypothèse d'un coût de production maximum de 15 \$ le GJ. L'étude concluait que le PTÉ de production de GNR s'établissait à 25,8 PJ/an pour 2018 et qu'il atteindrait 144,3 PJ/an en 2030, soit l'équivalent de 12 % et 66 % du volume de gaz naturel distribué en 2018 par Énergir au Québec.

Dans cette étude, les contributions potentielles des différentes sous-catégories de biomasse ne sont présentées que sous la forme d'un schéma dont il est nécessaire d'interpréter visuellement les différents volumes afin d'établir des ordres de grandeur approximatifs. Cet exercice a permis d'estimer que le PTÉ 2030 total de 144,3 GJ/an (équivalent à 66 % du gaz naturel distribué par Énergir au Québec en 2018) comprend environ 118 GJ/an (82 %) issus de la biomasse forestière (incluant le CRD, contrairement à l'étude WSP 2021), 19 GJ/an (13 %) issus de la biomasse végétale agricole et 7 GJ/an (5 %) issus des lieux d'enfouissement techniques.

POTENTIEL TECHNICO-ÉCONOMIQUE 2018 ET 2030 (PTÉ 2018 ET 2030) DE PRODUCTION DE GNR

SELON WSP-DELOITTE (2018)

	PJ/an	Millions m ³ de GNR/an
2018	25,8	693
2030	144,3	3 875

POTENTIEL TECHNICO-ÉCONOMIQUE (PTÉ) SELON AVISEO CONSEIL (2019)

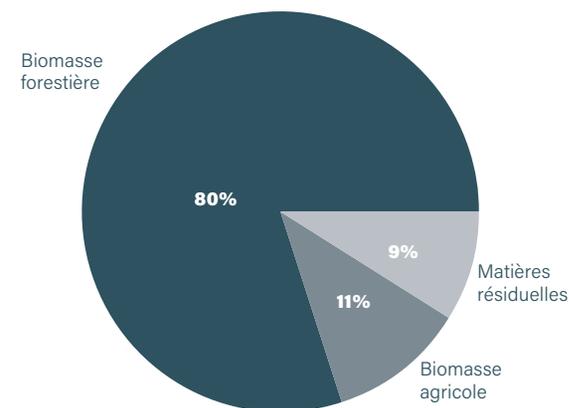
Dans une étude intitulée *La filière de production de gaz naturel renouvelable au Québec, Impacts économiques à l'horizon 2030 et contribution à l'économie circulaire (2019)*, commandée par Énergir, Aviseo Conseil reprend les chiffres présentés en 2018 par WSP-Deloitte, en incluant une ventilation des sources de biomasse qui n'avait pas été divulguée avec la même précision dans le rapport WSP-Deloitte.

Selon Aviseo Conseil (2019), du PTÉ 2030 total de 144,3 PJ/an, 13,0 PJ seraient attribuables aux matières résiduelles, soit des résidus organiques municipaux, industriels, commerciaux et institutionnels qui pourraient être convertis par biométhanisation (technologie de première génération); 15,5 PJ seraient issus de résidus agricoles, soit les résidus de cultures et d'élevages, qui pourraient aussi être convertis par biométhanisation; et 115,0 PJ proviendraient de résidus forestiers (c'est-à-dire les résidus de coupe, les résidus de transformation, les bois mal aimés, les bois non récoltés et les résidus de l'industrie de la construction, rénovation et démolition) qui pourraient être convertis par pyrolyse-gazéification ou par hydrogénation pyrocatalytique (technologies de deuxième génération).

Le développement attendu des technologies de deuxième génération explique au moins en grande partie l'écart considérable entre le PTÉ estimé pour 2018 (25,8 PJ/an, WSP-Deloitte 2018) et le PTÉ estimé pour

POTENTIEL TECHNICO-ÉCONOMIQUE 2030 DE PRODUCTION DE GNR PAR TYPE DE BIOMASSE SELON AVISEO CONSEIL 2019

Sur la base de l'étude WSP-Deloitte (2018)



2030 (144,3 PJ/an, WSP-Deloitte 2018 et Aviseo Conseil 2019). L'exploitation de la biomasse forestière pour produire du GNR dépendant du développement de technologies de seconde génération (l'hydrogénation pyrocatalytique et la pyrogazéification), cette source a été exclue du potentiel estimé pour 2018 mais représente 80 % du potentiel estimé pour 2030. Les prévisions 2030 se fondent donc sur la prémisse que l'hydrogénation pyrocatalytique et la pyrogazéification auront atteint une maturité d'ici là.

POTENTIEL TECHNICO-ÉCONOMIQUE 2030 (PTÉ 2030) DE PRODUCTION DE GNR

SELON AVISEO CONSEIL (2019)

	PJ/an	Millions m ³ de GNR/an	
Total	144,3	3 875	100 %
À base de biomasse issue des matières résiduelles	13,0	349	9 %
À base de biomasse agricole	15,5	417	11 %
À base de biomasse forestière	115,0	3 089	80 %

Ce potentiel technico-économique de GNR, soit 3,9 milliards de m³ pour 144,3 PJ d'énergie en 2030, équivaut aux deux tiers du volume de gaz naturel consommé en 2020 au Québec. Ce chiffre repose sur trois hypothèses importantes :

1. les technologies de seconde génération de production de GNR auront atteint une maturité en 2030,
2. il aura été possible d'investir massivement dans les infrastructures de seconde génération,
3. il aura été possible de dégager de la biomasse pour nourrir ces infrastructures, ce qui implique de détourner de la biomasse d'usages actuels et d'augmenter l'extraction de biomasse de la forêt québécoise. Car l'extraction de biomasse forestière demeure dans ces estimations la source principale de GNR.

POTENTIEL COMMERCIAL RÉEL ET DÉSI- RABLE

L'estimation du PT et du PTÉ ne tenant compte ni de la maturité des technologies, ni des compétitions d'usage de la biomasse, ni d'une analyse systémique des contraintes climatiques et écologiques qui limiteront l'usage de certaines sources de biomasse, elle ne fournit aucune indication fiable quant au potentiel commercial réel et désirable de production de GNR au Québec.

Pour estimer la biomasse réellement disponible, il faudrait soustraire du PTÉ estimé (une valeur très virtuelle) la biomasse à laquelle les producteurs de GNR n'auront pas accès en raison des obstacles technologiques et surtout des compétitions d'usages qui pourraient diminuer la quantité de biomasse disponible ou faire augmenter son coût. L'étude d'Aviseo Conseil (2019) indique que les usages compétitifs peuvent être nombreux pour certaines sources de biomasse mais que leur exhaustivité ainsi que leur pertinence à long terme, en fonction de l'évolution des marchés concernés, est difficile à établir et à documenter.

En fait, ni l'usage optimal des biomasses résiduelles, ni la quantité de biomasse que l'on pourra extraire à coût raisonnable en 2030 (en tenant compte notamment des transformations que subiront les écosystèmes forestiers en raison des changements climatiques et des services écosystémiques que nous demanderons aux forêts) n'ont fait l'objet d'études systémiques.

N'ayant pas de mesure du potentiel commercial réalisable, il est impossible d'extrapoler ce que serait un potentiel réel et désirable selon les critères d'une transition efficace vers la carboneutralité, respectueuse des limites biophysiques de la planète et porteuse de justice sociale. Il est donc impossible d'évaluer la quantité de GNR qu'il sera possible d'allouer à différents usages en 2030. Cette lacune limite la possibilité d'avoir un dialogue social éclairé sur le rôle du GNR dans la gestion intégrée des ressources énergétiques à déployer pour planifier la transition socioécologique du Québec.

Dans les sections qui suivent, nous présentons les principaux facteurs à prendre en compte pour déterminer la biomasse à retrancher du PTÉ afin d'estimer le potentiel commercial réel et désirable des diverses catégories et sous-catégories de biomasse.

BIOMASSE ISSUE DES MATIÈRES RÉSIDUELLES

L'étude d'Aviseo Conseil (2019) indique qu'en 2030, il sera techniquement possible et rentable² d'extraire de la biomasse issue des matières résiduelles 349 millions de m³ de GNR/an et de produire ainsi 13 PJ/an d'énergie, soit 9 % du PTÉ total estimé de production de GNR. Les éléments suivants sont à prendre en compte pour déterminer la biomasse à soustraire de ces estimations afin de déterminer le potentiel commercial réel et désirable :

- Une grande portion de la biomasse incluse dans le PTÉ estimé du secteur des déchets résidentiels et commerciaux, ainsi que du secteur de la transformation agroalimentaire, est déjà utilisée pour le com-

postage et l'épandage et n'est donc pas disponible pour la production de GNR. Cette portion pourrait être augmentée.

- Selon le principe de la hiérarchie des usages des matières résiduelles du gouvernement du Québec, la réduction à la source et le compostage des résidus alimentaires et des résidus verts ont préséance sur la production de GNR. Une généralisation de ces usages prioritaires diminuerait les volumes de biomasse provenant de ces sources ainsi que les volumes de biogaz issus des lieux d'enfouissement.
- L'usage énergétique n'est pas optimal non plus pour les résidus de bois de construction, rénovation et démolition (CRD), alors qu'il y a pénurie de CRD chez les transformateurs. Le potentiel considéré pour ces résidus inclut d'ailleurs des volumes déjà utilisés pour produire des panneaux de particules. Aussi, ce potentiel ne prend pas en compte la possibilité de développer la déconstruction sélective et le réemploi de la matière.
- En ce qui concerne les résidus de pâtes et papiers, la production de panneaux de particules à basse densité et les autres modes de gestion comme l'épandage risquent d'entrer en compétition avec le GNR.
- Les papiers mixtes considérés dans le secteur des matières résiduelles résidentielles et commerciales résultent de mauvaises pratiques de gestion dont on peut attendre une amélioration. Un meilleur tri et des règles d'usage améliorées pourraient réduire cette source à près de zéro.
- L'incorporation de boues municipales à la biomasse utilisée pour fabriquer du GNR présente un enjeu de contamination possible du digestat qui diminue sa valeur.

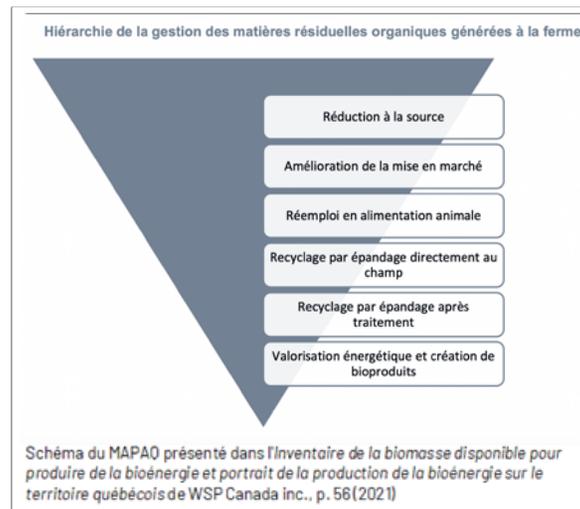
2 En fonction des hypothèses de prix de revient et de prix de vente du GNR utilisées.

- Le volume de biomasse issue des déchets disponible pour produire du GNR pourra diminuer si le modèle linéaire de production et de consommation, le modèle « extraire, fabriquer, transporter, consommer, jeter », perd du terrain.

BIOMASSE AGRICOLE

L'étude d'Aviseo Conseil (2019) indique qu'en 2030, il sera techniquement possible et rentable³ d'extraire de la biomasse agricole 417 millions de m³ de GNR/an et de produire ainsi 15,5 PJ/an d'énergie, soit 11 % du PTÉ total estimé de production de GNR. Deux types de matières organiques sont considérés pour la biométhanisation dans ce secteur : la biomasse végétale et les résidus de l'élevage. La biomasse végétale comprend principalement des pailles de récolte, en particulier des résidus du maïs-grain. Le fumier et le lisier issus des fermes forment l'autre contingent de résidus agricoles considérés comme intrants potentiels.

Le rapport de WSP (2021), qui a été élaboré deux ans plus tard et porte sur le potentiel technique seulement, fournit une information plus détaillée sur les matières organiques comprises dans les estimations. Les calculs qu'on y trouve excluent ou limitent certaines sources de biomasse végétale agricole en raison de contraintes comme la concurrence à l'alimentation humaine et animale, la conservation des milieux naturels et de la biodiversité, la concurrence avec les usages actuels des matières et le maintien de la santé des sols, entre autres. Les résidus de cultures sont considérés comme non disponibles pour la production de bioénergie afin de favoriser la santé et la conservation des sols. En ce qui concerne les cultures bioénergétiques, le potentiel estimé inclut uniquement les volumes considérés en surplus de la demande intérieure (destinés à l'exportation) ou déjà destinés à la production d'énergie. Cette étude s'appuie en cela sur la « hiérarchie de la gestion des matières résiduelles organiques générées à la ferme » du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (le MAPAQ), qui classe la production d'énergie au dernier rang des stratégies à utiliser pour gérer ces



matières. L'étude n'en prévoit pas moins une hausse du potentiel théorique de matières sèches utilisées pour la production de bioénergie de 550 000 tonnes (équivalent à presque 8 PJ) en 2020 à 715 000 tonnes (équivalent à presque 11 PJ) en 2030. Le plus grand potentiel de production de bioénergie provient de la production de maïs-grain (99 % du total) dont 440 000 tonnes sont déjà utilisées à des fins de production d'éthanol au Québec.

Les éléments suivants sont à considérer pour déterminer la biomasse à retrancher de ces volumes estimés afin de déterminer le potentiel commercial réel et désirable :

- Les cultures bioénergétiques et la récolte de résidus de culture pour produire du GNR entrent en compétition avec la production alimentaire ainsi qu'avec les autres carburants et les autres usages possibles de la biomasse résiduelle (p. ex. litière pour l'élevage et paillis de culture).
- 80 % des cultures bioénergétiques actuelles au Québec ne sont pas disponibles pour la production de GNR puisqu'elles sont déjà utilisées pour produire de l'éthanol.

- La prise en compte des impacts écologiques et climatiques pourrait limiter les volumes de biomasse agricole disponibles pour la production de GNR, notamment :

- Les cultures bioénergétiques et la récolte de résidus de culture affectent négativement les écosystèmes, la biodiversité et la santé des sols.
- L'étalement des cultures bioénergétiques pourrait entraîner la perte de zones à haute valeur écologique.
- Les usages optimaux des déjections animales sont l'amendement du sol et la production d'énergie par cogénération pour les besoins locaux. Des régies alternatives pour la gestion des déjections animales pourraient affecter les volumes futurs de déjections disponibles.
- L'utilisation de déjections animales pour produire du GNR pourrait procurer des gains infimes, en matière de réduction des GES, par rapport à l'empreinte carbone totale des élevages. La construction de méga-usines de production de GNR au moyen de fumier ou de lisier peut avoir un effet de verrou sur ces élevages pendant plusieurs décennies. Des analyses du cycle de vie des émissions de GES des élevages avec et sans production de GNR sont nécessaires pour déterminer l'opportunité de développer cette filière.
- Les petites installations de biométhanisation des résidus agricoles peuvent se transformer en « bombes climatiques » s'il n'y a pas de mécanisme pour assurer une gestion appropriée du processus. Les méga-usines émettent pour leur part de forts volumes de GES associés au tri et au transport des résidus organiques.

³ En fonction des hypothèses de prix de revient et de prix de vente du GNR utilisées.

BIOMASSE FORESTIÈRE

L'étude d'Aviseo Conseil (2019) indique qu'en 2030, il sera techniquement possible et rentable⁴ d'extraire de la biomasse forestière 3 089 millions de m³ de GNR/an et de produire ainsi 115 PJ/an d'énergie, soit 80 % du PTÉ total estimé de production de GNR. Selon cette étude, les résidus forestiers offrent donc, de loin, le « gisement » le plus considérable de matières organiques pour la production de GNR au Québec. La biomasse forestière considérée pour la production de GNR inclut les bois de faible qualité sous-utilisés par l'industrie forestière (les bois sans preneurs ou mal aimés), les résidus de coupe, soit les branches et feuillages laissés en bordure de chemin (la biomasse forestière résiduelle) et les écorces, sciures, rabotures, copeaux et résidus générés lors de la fabrication de produits finis par les scieries, papetières, usines de plancher de bois franc, fabricants d'armoires, etc. (les résidus de première et de deuxième transformations).

En d'autres termes, l'industrie du GNR ne se contente pas des « restes » en prenant seulement la biomasse qui traîne par terre : elle investit dans la récolte de biomasse forestière tout comme les autres preneurs. Ainsi, le bois résiduel n'est pas un déchet inutilisé des pratiques forestières, il est plutôt un produit de la forêt comme un autre.

Étant donné l'importance de cette catégorie et la complexité des enjeux qu'elle soulève, nous proposons une analyse particulièrement détaillée des éléments à prendre en compte pour déterminer son potentiel commercial réel et désirable :

- Tel que mentionné précédemment, qualifier la biomasse forestière mobilisable pour produire du GNR de « gisement », est contesté. Le terme « gisement » ré-

fère à une quantité statique comme un dépôt pétrolier ou minier, par exemple. En réalité, en foresterie, des produits du bois de différentes qualités sont extraits de la forêt à l'intention de différents preneurs, selon les types de biomasse et de densité de matière. Si l'un des preneurs est un producteur de GNR, la compagnie forestière adaptera ses pratiques pour favoriser l'approvisionnement en ce type de biomasse (Gouge, D. et al. 2021). En d'autres termes, l'industrie du GNR ne se contente pas des « restes » en prenant seulement la biomasse qui traîne par terre : elle investit dans la récolte de biomasse forestière tout comme les autres preneurs. Ainsi, le bois résiduel n'est pas un déchet inutilisé des pratiques forestières, il est plutôt un produit de la forêt comme un autre. Faisant abstraction de cette réalité, les études mentionnées jusqu'ici ont calculé le potentiel de biomasse forestière disponible pour la production d'énergie en considérant le bois résiduel comme un déchet ou une matière inutilisée, alors qu'il s'agit d'une matière dont l'existence est une conséquence des pratiques en foresterie ou en usine.

- La transformation des pratiques de gestion et de récolte afin de favoriser l'extraction de biomasse des champs de coupe exige des investissements significatifs.
- L'extension de la récolte de biomasse forestière provoque la perte de zones à haute valeur écologique.
- Le bois sans preneur inclut celui qui se trouve dans les forêts privées du sud du Québec, dont l'exploitation a des impacts sur la biodiversité dans cette partie de la province et soulève également des enjeux d'acceptabilité sociale.
- Récolter une partie des forêts ravagées par les incendies et les insectes peut permettre de tirer parti de cette biomasse difficilement valorisable. Cette pratique présente toutefois des enjeux de coût d'extraction.

- La totalité du potentiel de biomasse comptabilisé dans les produits conjoints de première et de deuxième transformation du bois fait déjà l'objet d'usages que l'on peut juger optimaux. Dans son évaluation de cette source de biomasse, WSP écrit :

« Pour le gisement forestier, le potentiel technique inclut des quantités déjà valorisées. En effet, les quantités vendues sur le marché libre notamment les produits conjoints de 1^{ère} et deuxième transformation sont inclus malgré le fait qu'ils sont essentiellement déjà récupérés et valorisés notamment par l'industrie des pâtes et papiers, des panneaux particules et des granules et bûches énergétiques. Ces quantités ont été tout de même comptabilisées puisque la bioénergie pourrait en récupérer une portion notamment au niveau des écorces et sciures selon la capacité de payer de cette industrie et selon les difficultés de l'industrie des pâtes et papiers qui pourrait réduire leurs approvisionnements. » (WSP, 2021 : p.xxiii).

- Or, à eux seuls, les produits conjoints de première et deuxième transformations représentent 51,5 % du potentiel technique total que calcule WSP pour l'année 2030. L'accès à ces sous-produits suppose donc : 1. que les producteurs de bioénergie seront capables d'extraire, via leur capacité de payer, ces matières de leurs chaînes de valeur actuelles; 2. qu'il y aura des substituts pour ces matériaux déjà mobilisés - en particulier dans le secteur des matériaux de construction; 3. que la substitution n'engendrera pas un impact environnemental et climatique plus important que celui des usages actuels des matériaux.
- La production de GNR à partir de biomasse forestière repose sur des technologies de deuxième génération dont la maturité à l'horizon 2030 n'est pas assurée.

4 En fonction des hypothèses de prix de revient et de prix de vente du GNR utilisées.

- La prise en compte des impacts écologiques et climatiques pourrait limiter les volumes de biomasse forestière disponibles pour la production de GNR, notamment :
 - L'essor du marché de la bioénergie à partir de résidus forestiers risque d'entraîner l'expansion de la foresterie et d'augmenter ainsi la pression sur les écosystèmes.
 - La récolte de biomasse forestière résiduelle peut augmenter l'érosion et la compaction du sol et diminuer son stock en carbone, ses nutriments, sa rétention d'eau, sa biodiversité et sa fertilité.
 - Toute diminution du stock de carbone dans le sol, même légère, peut avoir un très gros effet global sur le cycle du carbone.
 - Récolter le bois endommagé qui se trouve sur les grandes superficies de forêts ravagées par

les insectes et les feux de forêt peut être avantageux mais couper l'entièreté des forêts dégradées n'est pas recommandé du point de vue du bilan carbone des forêts.

- L'utilisation de biomasse forestière pour produire du GNR provoque une augmentation des émissions de GES à court terme car le GNR est rapidement brûlé et le carbone alors immédiatement envoyé dans l'atmosphère. Les émissions de GES sont donc augmentées à court terme. Les conséquences de tenir pour acquis la carboneutralité immédiate de la bioénergie peuvent être très graves.
- La dette carbone engendrée par la production de GNR, qui peut prendre de quelques décennies à des siècles avant d'être remboursée en temps normal (lorsque la forêt est un puits de carbone), ne sera probablement jamais remboursée maintenant que les forêts deviennent des sources de CO₂ atmosphérique.

- Le délai requis pour atteindre le seuil de carboneutralité (si atteignable) de la bioénergie forestière est beaucoup trop long pour contribuer à l'atteinte des cibles de mitigation du réchauffement climatique et par conséquent, l'utilisation de biomasse forestière résiduelle pour produire du GNR contribue à l'effet domino ayant pour conséquence un réchauffement encore plus rapide du climat.

BIOMASSE TOTALE

Les informations qui précèdent sont résumées dans le tableau ci-dessous afin de donner une image aussi claire que possible du potentiel commercial réel et désirable de production de GNR au Québec, en retenant uniquement les portions de la biomasse dont la production de GNR est l'usage le plus probable sur le plan économique et le plus opportun sur les plans climatique et écologique

CATÉGORIES ET SOUS-CATÉGORIES DE BIOMASSE	PT 2030 SELON WSP (2021)	PTÉ 2030 SELON AVISEO (2019)	OBSTACLES TECHNOLOGIQUES ET ÉCONOMIQUES, COMPÉTITIONS D'USAGE ET USAGES OPTIMAUX, ENJEUX CLIMATIQUES ET ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR DÉTERMINER LA BIOMASSE À RETRANCHER DU PTÉ AFIN D'ESTIMER LE POTENTIEL COMMERCIAL RÉEL ET DÉSI RABLE	POTENTIEL COMMERCIAL RÉEL ET DÉSI RABLE
	PJ/an	PJ/an		PJ/an
ISSUE DES MATIÈRES RÉSIDUELLES				
1. Résidus alimentaires, résidus verts et autres matières organiques	15,61	ND	Réduction des résidus alimentaires. Compostage.	Indéterminé
2. Papiers et cartons (« papiers mixtes » difficilement recyclables)	8,39	ND	Un meilleur tri et des règles d'usage améliorées pourraient réduire cette source à près de 0.	Près de 0
3. Résidus de bois de construction, rénovation et démolition (CRD)	7,14	ND	Une meilleure collecte réduirait cette source à 0 pour le GNR, pénurie de CRD chez les transformateurs.	0
4. Résidus des fabriques de pâtes et papiers	7,5	ND	Autre usage optimal possible en fonction de l'évolution de l'industrie.	Indéterminé
5. Boues municipales	1,4	ND	Enjeu de contamination possible du digestat diminue sa valeur.	Indéterminé
6. Biogaz issu des lieux d'enfouissement	8,48	ND	Élimination des matières organiques des lieux d'enfouissement (réduction à la source des déchets organiques, compostage).	Indéterminé
Grand total	333,5	144,3		Indéterminé

CATÉGORIES ET SOUS-CATÉGORIES DE BIOMASSE	PT 2030 SELON WSP (2021)	PTÉ 2030 SELON AVISEO (2019)	OBSTACLES TECHNOLOGIQUES ET ÉCONOMIQUES, COMPÉTITIONS D'USAGE ET USAGES OPTIMAUX, ENJEUX CLIMATIQUES ET ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR DÉTERMINER LA BIOMASSE À RETRANCHER DU PTÉ AFIN D'ESTIMER LE POTENTIEL COMMERCIAL RÉEL ET DÉSIRABLE	POTENTIEL COMMERCIAL RÉEL ET DÉSIRABLE
	PJ/an	PJ/an		PJ/an
Total	48,56	13,0 9 % du total		Indéterminé mais largement inférieur au PTÉ
AGRICOLE				
1. Cultures bioénergétiques et résidus de cultures	10,98	ND	Compétition avec l'alimentation, santé des sols, enjeux de biodiversité.	Indéterminé
2. Déjections animales : bovins laitiers (35 %), secteur porcin (33 %), volaille (20 %)	14,47	ND	Usages optimaux : amendement du sol, production d'énergie par cogénération pour les besoins locaux. Gain non démontré en matière de réduction des GES.	0 en l'absence d'analyse du cycle de vie démontrant la réduction de GES.
Total	25,45	15,5 11 % du total		PTÉ réduit de 57 % en l'absence d'analyse cycle de vie démontrant une réduction significative de GES due à la production de GNR à partir de déjections animales
FORESTIÈRE				
1. Bois sans preneurs	24,33	ND	Récolte d'une partie des forêts ravagées par les incendies et les insectes peut permettre de tirer parti de cette biomasse difficilement valorisable.	24,33
2. Biomasse forestière résiduelle	63,37	ND	Dépend de la régie de coupe en forêt. Obstacles économiques. Principaux risques : perturbation du cycle du carbone, dommages à la biodiversité, fausse carboneutralité/accélération du réchauffement climatique.	0 en l'absence d'études démontrant la carboneutralité et la viabilité
3. Produits conjoints de la première transformation	157,16	ND	Cette biomasse sert actuellement à d'autres usages que la production de GNR (panneaux à lamelles orientées, panneaux de particules, usines de pâtes et papiers, utilisation énergétique).	0
4. Produits conjoints de la deuxième transformation	14,59	ND		0
Total	259,45	115,0 80 % du total		PTÉ réduit de + de 90 % en l'absence d'études démontrant la carboneutralité et la viabilité
Grand total	333,5	144,3		Indéterminé

3. PRINCIPAUX CONSTATS

1. La production de gaz naturel renouvelable est une stratégie éprouvée pour générer de l'énergie à partir de résidus organiques. La biométhanisation permet de gérer les émissions de carbone biogénique et de transformer des résidus agricoles (matières végétales et déjections animales) ainsi que des déchets en énergie et en engrais. Par la pyrolyse, il est possible de convertir des résidus de biomasse forestière en énergie. Ce sont donc des procédés pouvant servir à la gestion de déchets. Cependant, la production de GNR n'est ni la seule stratégie, ni la plus efficace dans plusieurs cas, pour gérer ces matières résiduelles. La hiérarchie préconisée par le gouvernement du Québec place la production d'énergie au dernier rang des usages des matières résiduelles, à moins de preuves du contraire démontrées par des analyses du cycle de vie.
2. La biométhanisation et la pyrolyse génèrent du biogaz dont on peut tirer du GNR. Ce sont actuellement des procédés coûteux qui ne permettent pas de produire du gaz à un prix comparable à celui du gaz fossile. Ces procédés génèrent également des coproduits finaux, digestat dans le premier cas, biocharbon et vinaigre de bois dans le second. Ces produits ont une valeur mais soulèvent également des enjeux. En particulier, le digestat, une fois composté, peut être un amendement agricole utile à la santé des sols; sa valeur agronomique serait supérieure aux fumiers et aux lisiers. Par contre, sa qualité peut être affectée par la nature des déchets domestiques qui y sont incorporés. Des producteurs agricoles hésitent à utiliser le compost de digestat à cause de cette potentielle contamination.
3. Le potentiel d'augmentation des volumes de biomasse végétale issus de l'agriculture est limité. L'incorporation de résidus de culture à la fabrication du GNR est une possibilité mais pourrait appauvrir les sols si le digestat ne revient pas au champ où la biomasse a été prélevée, ou affecter le sol et la croissance des plantes si le digestat n'est pas correctement appliqué. Le développement de cultures

bioénergétiques pour produire du GNR soulève des enjeux de sécurité alimentaire et la perte d'habitats qui y est associée engendre des problèmes pour la biodiversité.

4. Le calcul sommaire des émissions de GES évitées par la biométhanisation du lisier de porc proposé dans la revue de littérature mène à penser que les avantages climatiques de la production de GNR à partir de déjections animales pourraient être infimes alors que le cycle de vie complet de la production animale demeure fortement émetteur de GES. En l'absence de recherches plus exhaustives à ce sujet, il est préoccupant de voir émerger au Québec des méga-usines de biométhanisation du lisier et d'observer que le gouvernement appuie financièrement ces opérations en puisant dans les fonds de la transition énergétique.

En l'absence de recherches plus exhaustives à ce sujet, il est préoccupant de voir émerger au Québec des méga-usines de biométhanisation du lisier et d'observer que le gouvernement appuie financièrement ces opérations en puisant dans les fonds de la transition énergétique.

5. Le méthane étant un puissant gaz à effet de serre avec un potentiel de réchauffement planétaire extrêmement élevé, le principal impact climatique direct du GNR provient des fuites de méthane au moment de la production du gaz et de son transport.
6. Les futurs producteurs de GNR seront tentés, pour jouir des économies d'échelle et réduire les coûts de production, de miser sur des installations de grande taille. Le fonctionnement de ces complexes d'envergure impliquera une demande massive de biomasse résiduelle avec un cercle d'approvisionnement très large et un flux élevé d'intrants et d'extrants par camionnage. Cela se traduira par une empreinte carbone plus élevée et d'importantes nuisances pour les riverains.

La biomasse forestière est à la fois la source la plus importante de matière méthanogène et celle dont le volume semble le plus incertain. En effet, compte tenu des usages concurrentiels et des risques écologiques et climatiques, il semble peu probable que l'extraction de biomasse forestière puisse jouer le rôle prédominant annoncé.

7. La biomasse forestière est à la fois la source la plus importante de matière méthanogène et celle dont le volume semble le plus incertain. En effet, compte tenu des usages concurrentiels et des risques écologiques et climatiques, il semble peu probable que l'extraction de biomasse forestière puisse jouer le rôle prédominant annoncé. Quant aux volumes espérés de biomasse issue des déchets et du secteur agricole, ils sont beaucoup moins considérables mais paraissent tout de même grandement surestimés. Par conséquent :

- il nous semble inévitable qu'une exclusion du gaz naturel fossile du système énergétique québécois implique soit une réduction substantielle de la consommation de gaz naturel, soit une importation massive de GNR du Canada ou des États-Unis;
- nous sommes d'avis que les volumes de GNR de haute qualité environnementale seront restreints et qu'il vaut mieux réserver ce gaz précieux aux usages sans regrets, c'est-à-dire à la fois difficilement convertibles à l'électricité et fournissant des services énergétiques et chimiques dont on ne peut pas se passer; le pire scénario est une injection du GNR dans les réseaux existants sans discriminer ni hiérarchiser ses usages potentiels ni ceux des sources de biomasse qui alimentent sa production.

8. Des incertitudes majeures plombent la crédibilité des orientations actuelles du gouvernement du Québec qui soutiennent le développement massif de la filière GNR. Notamment :
- Plusieurs méthodes de gestion des émissions biogéniques sont possibles mais il manque d'études qui comparent les impacts de ces différentes méthodes avec la production de GNR au niveau du cycle de vie.
 - Il manque d'analyses du cycle de vie des émissions de GES des élevages avec et sans production de GNR afin de déterminer si la production de GNR réduit réellement les émissions de GES et, le cas échéant, si cette réduction est significative par rapport à l'empreinte carbone totale de ces élevages.
 - Il manque d'études sur la quantité de biomasse forestière résiduelle pouvant être récoltée de façon durable sans réduire le carbone dans le sol et sans affecter négativement les écosystèmes forestiers à long terme.
 - Il manque d'études qui comparent l'empreinte carbone de la récolte de résidus forestiers pour produire du GNR avec la séquestration du carbone qui aurait lieu si ces résidus n'étaient pas récoltés.
 - Il manque d'études sur les potentiels enjeux environnementaux liés aux procédés de pyrolyse-gazéification et d'hydrogénation pyrocatalytique.
 - Il manque d'études sur les impacts à long terme du vieillissement du biochar sur les propriétés du sol.
 - Compte tenu de la rareté probable des volumes futurs de GNR, une étude des besoins et usages sans regrets ou critiques du GNR est essentielle et urgente. À première vue, les usages industriels devraient être priorités car les possibilités de substitutions sont faibles. Pourtant, le modèle de distribution actuel de GNR est plutôt un usage indiscriminé de cette ressource énergétique.

CONCLUSION

Dans ce rapport, nous avons déterminé que le volume de GNR réellement extractible de la biomasse au Québec est certainement moins important que les estimations faites dans les trois rapports récents qui se sont intéressés à cette filière. Dans une optique de transition énergétique juste et viable, la contribution du GNR serait surtout réservée aux procédés difficiles à électrifier mais essentiels à l'économie et à la société québécoise. Nous avons également identifié plusieurs problèmes associés à la production de GNR à partir de la littérature scientifique et de nos entrevues d'expert-es. Il est impératif de résoudre ces questions avant de pouvoir estimer la contribution potentielle du GNR à la transition énergétique du Québec. Les problèmes les plus préoccupants ayant été identifiés sont les suivants :

1. Le GNR produit à partir de biomasse agricole risque d'entrer en compétition avec l'alimentation et comporte beaucoup d'aspects problématiques du point de vue environnemental :
 - Détérioration de la santé des sols due à la récolte de résidus de cultures pour produire du GNR;
 - Perte de zones à haute valeur écologique due à l'étalement des cultures bioénergétiques.
2. La production de GNR à partir de biomasse forestière, quant à elle, implique les risques suivants :
 - Perte de zones à haute valeur écologique due à l'extension de la récolte de biomasse forestière;
 - Potentielle réduction du carbone dans les sols forestiers due à la récolte de résidus de coupe;
 - Augmentation des émissions de GES à court terme et dette carbone à long terme, provoquant une accélération du réchauffement climatique.
3. Il faut également tenir compte des problèmes potentiels liés à l'expansion de la biométhanisation dont le procédé serait mal géré.

4. Finalement le volume disponible de GNR est incertain et assurément beaucoup plus faible que les chiffres qui ont circulé jusqu'ici, si 1) on tient compte des autres usages déjà existants pour la biomasse; 2) on favorise l'utilisation en cascade de la biomasse en respectant la hiérarchie des usages des matières résiduelles préconisée par le gouvernement du Québec et 3) on tient compte de la non-pertinence d'utiliser les résidus forestiers à grande échelle pour produire du GNR, principalement à cause de la dette carbone.

Finalement le volume disponible de GNR est incertain et assurément beaucoup plus faible que les chiffres qui ont circulé jusqu'ici, si 1) on tient compte des autres usages déjà existants pour la biomasse; 2) on favorise l'utilisation en cascade de la biomasse en respectant la hiérarchie des usages des matières résiduelles préconisée par le gouvernement du Québec et 3) on tient compte de la non-pertinence d'utiliser les résidus forestiers à grande échelle pour produire du GNR, principalement à cause de la dette carbone.

WSP, Deloitte et Aviseo Conseil ont amorcé le cadrage de la filière GNR en estimant le potentiel technique (PT) et technico-économique (PTÉ) de production de GNR au Québec. Ces estimations sont certes utiles, en tant que premières étapes dans l'établissement du potentiel réel et désirable de production de GNR. Cependant, par définition, elles ne tiennent pas compte des usages concurrentiels et souvent préférables de la biomasse. De plus, comme elles ne se situent ni dans une optique de hiérarchie des usages ni dans le cadre d'une analyse du cycle de vie qui comparerait les impacts climatiques et écologiques de la production de GNR à ceux d'autres usages, elles ne fournissent en tant que telles aucune indication fiable de la pertinence de développer cette

filière. Ce sont pourtant ces estimations, largement reprises par les médias, qui semblent guider les politiques publiques du Québec et ses programmes de financement concernant le développement de la filière GNR.

Par ailleurs, pour atteindre l'objectif de 10 % de GNR dans son réseau de gaz naturel malgré les volumes restreints de biomasse disponibles, Énergir serait contrainte de canaliser une part importante de cette biomasse vers la production de bioénergie, éclipsant les autres besoins et négligeant les impacts environnementaux associés aux chaînes d'approvisionnement et de production du GNR. Enfin, le modèle d'affaires actuel et à moyen terme d'Énergir n'implique pas une priorisation de ses clients industriels, pour qui l'approvisionnement en méthane est critique parce que non substituable, mais plutôt une distribution indiscriminée du GNR vers de multiples usages pour lesquels des substituts et solutions de rechange existent. Une telle stratégie de distribution prive l'industrie québécoise de volumes d'énergie renouvelable pourtant nécessaires à son fonctionnement.

Pour avoir un meilleur portrait du potentiel qu'a le GNR d'être une solution souhaitable à la crise climatique, nous identifions notamment les besoins de recherche suivants :

- Des **études de cycle de vie** les plus complètes possible doivent être effectuées pour comparer les impacts environnementaux et climatiques de différentes voies de production d'énergies (électricité, biogaz, GNR) à partir de différents types d'installations et de biomasse, et pour comparer des scénarios de développement des énergies renouvelables à des scénarios plus près du concept de décroissance économique incluant par exemple la diminution des transports routiers, la diminution de l'empreinte carbone des produits consommés, la diminution du gaspillage et de la surconsommation ainsi que la réduction des déchets.

- **Des études sur la quantité de biomasse forestière résiduelle pouvant être récoltée** sans réduire le stock de carbone, la matière organique et les nutriments des sols sur le long terme. Cela permettra d'établir quelle est la quantité potentielle de résidus forestiers pouvant être récoltés tout en assurant la durabilité des écosystèmes forestiers.
- **Une estimation du taux de retour énergétique** (EROI ou energy returned on energy invested) **de la production de GNR** à partir des différentes sources de biomasse. Pour la biomasse forestière, dont la transformation en GNR est hautement énergivore, il sera nécessaire d'inclure dans ce calcul la récolte des résidus, le transport de la biomasse forestière, la combustion et l'ensemble du processus de production et de purification de l'huile.
- **Des calculs de l'empreinte carbone de la production de GNR au moyen de biomasse forestière** (et des autres sources de biocarburants) tenant compte de la bioséquestration du carbone qui aurait eu lieu si celle-ci n'avait pas été récoltée, des émissions de carbone biogénique et des émissions liées à la combustion d'énergies fossiles nécessaire à la gestion des terres, aux récoltes et aux procédés de production de bioénergie, en plus des émissions de la combustion du GNR de source forestière.

En somme, alors que le GNR pourrait potentiellement contribuer à la transition énergétique du Québec, les connaissances actuelles restent insuffisantes pour justifier en ce moment un recours important à cette filière et des investissements publics dans son développement, au détriment d'autres stratégies de décarbonation potentiellement plus efficaces. Avant d'envisager le GNR comme solution majeure, des recherches crédibles et indépendantes sont nécessaires, voire urgentes, pour garantir une transition énergétique qui soit réellement bénéfique pour le climat, les communautés, l'économie régionale et le respect de la capacité de support des écosystèmes.

En somme, alors que le GNR pourrait potentiellement contribuer à la transition énergétique du Québec, les connaissances actuelles restent insuffisantes pour justifier en ce moment un recours important à cette filière et des investissements publics dans son développement, au détriment d'autres stratégies de décarbonation potentiellement plus efficaces.

BIBLIOGRAPHIE

1. Abubakar, A. M. (2022). Biogas production and feedstock type : Characteristic, selection, and global biogas production. *Journal of Engineering Research and Sciences*, 1(2), 170-187.
2. Akhtar, A., Krepl, V., & Ivanova, T. (2018). A combined overview of combustion, pyrolysis, and gasification of biomass. *Energy and Fuels*, 32(7), 7294-7318. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01678>
3. Aviseo Conseil. (2019). *La filière de production de gaz naturel renouvelable au Québec : impacts économiques à l'horizon 2030 et contribution à l'économie circulaire*. [PDF]. Étude commandée par Énergir. <https://Aviseo.ca/app/uploads/2021/08/Energir-La-filiere-de-production-de-gaz-naturel-renouvelable-au-Quebec.pdf>
4. Ayaovi, L., Évelyne, T., & Simon, B. (2022). Sustainability Impact Assessment of Forest Bioenergy Value Chains in Quebec (Canada)—A ToSIA Approach, 15(6676), 6676-6676. <https://doi.org/10.3390/en15186676>
5. Baldé, H., Wagner-Riddle, C., MacDonald, D., & VanderZaag, A. (2022). Fugitive methane emissions from two agricultural biogas plants. *Waste Management*, 151, 123-130.
6. Bakkaloglu, S., Cooper, J., & Hawkes, A. (2022). Methane emissions along biomethane and biogas supply chains are underestimated. *One Earth*, 5(6), 724-736. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.05.012>
7. Beaulieu, M. S. (2004). *Manure management in Canada* (Vol. 1). Ottawa, ON, Canada: Statistics Canada, Agriculture Division.
8. Blair, M. J., & Mabee, W. E. (2020). Evaluation of technology, economics and emissions impacts of community-scale bioenergy systems for a forest-based community in Ontario. *Renewable Energy*, 151, 715-730. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.073>
9. Brassard, P., Godbout, S., & Hamelin, L. (2021). Framework for consequential life cycle assessment of pyrolysis biorefineries : a case study for the conversion of primary forestry residues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110549>
10. Bullock, R. C. L., Zurba, M., Parkins, J. R., & Skudra, M. (2020). Open for bioenergy business? perspectives from indigenous business leaders on biomass development potential in Canada. *Energy Research & Social Science*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101446>
11. Chan, Y. C., Sinha, R. K., & v700. (2011). Emission of greenhouse gases from home aerobic composting, anaerobic digestion and vermicomposting of household wastes in brisbane (australia).
12. *Waste Management & Research*, 29(5), 540-548. <https://doi.org/10.1177/0734242X10375587>
13. Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., & Woess-Gallasch, S. (2009). Energy- and greenhouse gas-based Lca of biofuel and bioenergy systems : key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation & Recycling*, 53(8), 434-447. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.013>
14. Christopher, S., Thomas, H., Alexandra, P., Nora, S., & Daniela, T. (2019). Biogas upgrading : a review of national biomethane strategies and support policies in selected countries, 12(19), 3803-3803. <https://doi.org/10.3390/en12193803>
15. Correa, J. A., Fautitano, L., Laforest, J. P., Rivest, J., Marcoux, M., & Gariépy, C. (2006). Effects of slaughter weight on carcass composition and meat quality in pigs of two different growth rates. *Meat Science*, 72(1), 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.06.006>
16. Cowie, A. L., Berndes, G., Bentsen, N. S., Brandão, M., Cherubini, F., Egnell, G., George, B., Gustavsson, L., Hanewinkel, M., Harris, Z. M., Johnsson, F., Junginger, M., Kline, K. L., Koponen, K., Koppejan, J., Kraxner, F., Lamers, P., Majer, S., Marland, E., ... Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). (2021). Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy. *Global Change Biology. Bioenergy*, 13(8). <https://doi.org/10.1111/gcbb.12844>
17. Dar, R. A., Parmar, M., Dar, E. A., Sani, R. K., & Phutela, U. G. (2021). Biomethanation of agricultural residues: potential, limitations and possible solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110217>
18. Deboni, T. L., Simioni, F. J., Brand, M. A., & Lopes, G. P. (2019). Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. *Renewable Energy*, 135, 1291-1302. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.039>
19. Emily, G. (2020). At scale, renewable natural gas systems could be climate intensive: the influence of methane feedstock and leakage rates, 15(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9335>
20. Énergir. (2023). <https://energir.com/fr/>
21. EPA. (2023, 26 août). *Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>
22. Fahmy, T. Y. A., Fahmy, Y., Mobarak, F., El-Sakhawy, M., & Abou-Zeid, R. E. (2018). Biomass pyrolysis: past, present, and future. *Environment, Development and Sustainability : A Multidisciplinary Approach to the Theory and Practice of Sustainable Development*, 22(1), 17-32. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0200-5>
23. Fournel, S., Charbonneau, É., Binggeli, S., Dion, J. M., Pellerin, D., Chantigny, M. H., & Godbout, S. (2019). Optimal housing and manure management strategies to favor productive and environment-friendly dairy farms in Québec, Canada: Part II. Greenhouse gas mitigation methods. *Transactions of the ASABE*, 62(4), 973-984.
24. Freitas, F. F., Furtado, A. C., Piñas, J. A. V., Venturini, O. J., Barros, R. M., & Lora, E. E. S. (2022). Holistic life cycle assessment of a biogas-based electricity generation plant in a pig farm considering co-digestion and an additive. *Energy*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125340>
25. Front commun pour la transition énergétique, Les critères d'une transition énergétique porteuse de justice sociale, adoptés lors de l'assemblée générale du 10 septembre 2017 <https://www.pourlatransitionenergetique.org/les-criteres-dune-transition-energetique-porteuse-de-justice-sociale/>
26. Gerbet, T. (2018). Perte des terres agricoles au Québec: «C'est pire qu'avant». *Radio Canada*. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1134484/agriculture-zonage-territoire-agricole-cptaq-loi-etat-lement-protection-accaparement>
27. Gilassi, S., Taghavi, S. M., Rodrigue, D., & Kaliaguine, S. (2019). Optimizing membrane module for biogas separation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 83, 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.02.010>
28. Giuntoli, J., Barredo, J. I., Avitabile, V., Camia, A., Cazzaniga, N. E., Grassi, G., Jasinevičius, G., Jonsson, R., Marelli, L., Robert, N., Agostini, A., & Mubareka, S. (2022). The quest for sustainable forest bioenergy: win-win solutions for climate and biodiversity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112180>
29. Gouge, D., Thiffault, E., & Thiffault, N. (2021). Biomass procurement in boreal forests affected by spruce budworm: effects on regeneration, costs, and carbon balance. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(12), 1939-1952. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0060>
30. Gouvernement du Québec. Q-2 - Loi sur la qualité de l'environnement. <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/Q-2/>
31. Gouvernement du Québec. Q-2, r. 35.1 - Politique québécoise de gestion des matières résiduelles. <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/Q-2,%20r.%2035.1>

32. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. Programme de soutien à la production de gaz naturel renouvelable (PSPGNR), Cadre normatif (2022). https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/economie/publications-adm/cadres-normatifs-programmes/CN_PSPGNR_2022-2027_MEIE.pdf
33. Henrik, B. M., Peter, S., Jørgen, E. O., Søren, O. P., Tavs, N., & Sven, G. S. (2022). Agricultural biogas production—climate and environmental impacts, 14(1849), 1849–1849. <https://doi.org/10.3390/su14031849>
34. Holmgren, K. M., Berntsson, T. S., Andersson, E., & Rydberg, T. (2015). The influence of biomass supply chains and by-products on the greenhouse gas emissions from gasification-based biosng production systems. *Energy: Part 1*, 90, 148–162. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.098>
35. Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group II. (2022). Climate change 2022 : impacts, adaptation and vulnerability : working group ii contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. (Pörtner H. O & D. Belling, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
36. Jain, S., & Gualandris, J. (2023). When does upcycling mitigate climate change? the case of wet spent grains and fruit and vegetable residues in Canada. *Journal of Industrial Ecology*, 27(2), 522–534. <https://doi.org/10.1011/jiec.13373>
37. Jury, C., Benetto, E., Koster, D., Schmitt, B., & Welfring Joëlle. (2010). Life cycle assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.011>
38. Keegan, D., Kretschmer, B., Elbersen, B., & Panoutsou, C. (2013). Cascading use: a systematic approach to biomass beyond the energy sector. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(2), 193–206. <https://doi.org/10.1002/bbb.1351>
39. Kouchaki-Penchah, H., Bahn, O., Vaillancourt, K., Moreau, L., Thiffault, E., & Levasseur, A. (2023). Impact of Biogenic Carbon Neutrality Assumption for Achieving a Net-Zero Emission Target: Insights from a Techno-Economic Analysis. *Environmental Science & Technology*.
40. Kohlheb, N., Wluka, M., Bezama, A., Thrän, D., Aurich, A., & Müller, R. A. (2020). Environmental-economic assessment of the pressure swing adsorption biogas upgrading technology. *Bioenergy Research*, 14(3), 901–909. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10205-9>
41. Lévesque, V., Oelbermann, M., & Ziadi, N. (2021). Biochar in temperate soils: opportunities and challenges 1. *Canadian Journal of Soil Science*, 102(1), 1–26. <https://doi.org/10.1139/CJSS-2021-0047>
42. Lou, X. F., & Nair, J. (2009). The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions - a review. *Bioresource Technology*, 100(16), 3792–3798. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.006>
43. Magdalena, K., Agnieszka, C., Andrzej, L., & Monika, J. (2020). Sustainable development in the agri-food sector in terms of the carbon footprint: a review, 12(6463), 6463–6463. <https://doi.org/10.3390/su12166463>
44. Malcolm, J. R., Holtzmark, B., & Piasek, P. W. (2020). Forest harvesting and the carbon debt in boreal east-central Canada. *Climatic Change : An Interdisciplinary, International Journal Devoted to the Description, Causes and Implications of Climatic Change*, 161(3), 433–449. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02711-8>
45. Malmir, T., Lagos, D., & Eicker, U. (2023). Optimization of landfill gas generation based on a modified first-order decay model: a case study in the province of Quebec, Canada. *Environmental Systems Research*, 12(1), 6.
46. Mar, K. A., Unger, C., Walderdorff, L., & Butler, T. (2022). Beyond CO₂ equivalence: the impacts of methane on climate, ecosystems, and health. *Environmental Science and Policy*, 134, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.027>
47. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 55–63. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00120-1)
48. Mellor, P., Lord, R. A., João E, Thomas, R., & Hursthouse, A. (2021). Identifying non-agricultural marginal lands as a route to sustainable bioenergy provision - a review and holistic definition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110220>
49. Michailos, S., Walker, M., Moody, A., Poggio, D., & Pourkashanian, M. (2021). A techno-economic assessment of implementing power-to-gas systems based on biomethanation in an operating waste water treatment plant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104735>
50. Miller, A., & Parkins, J. (2023). Contending With Equity Ownership In Indigenous Renewable Energy Projects in Alberta, Canada. *Journal of Rural and Community Development*, 18(2).
51. Moreau, L., Thiffault, E., Kurz, W. A., & Beaugard, R. (2023). Under what circumstances can the forest sector contribute to 2050 climate change mitigation targets? a study from forest ecosystems to landfill methane emissions for the province of Quebec, Canada. *Gcb Bioenergy*, 15(9), 1119–1139. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13081>
52. Ncube, A., Cocker, J., Ellis, D., & Fiorentino, G. (2021). Biogas from source separated organic waste within a circular and life cycle perspective. a case study in Ontario, Canada. *Environmental and Sustainability Indicators*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100134>
53. Nelson, B., Zytner, R. G., Dulac, Y., & Cabral, A. R. (2022). Mitigating fugitive methane emissions from closed landfills: a pilot-scale field study. *Science of the Total Environment: Part 2*, 851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158351>
54. Patrick, F., Sylvie, B., Rémi, M. C., Hélène, C., Pierre-Luc, D., & Claude, V. (2020). Achieving carbon neutrality for a future large greenhouse gas emitter in Quebec, Canada: a case study, 11(810), 810–810. <https://doi.org/10.3390/atmos11080810>
55. Puettmann, M., Sahoo, K., Wilson, K., Oneil, E., & Humboldt State Univ, Arcata, CA (United States). (2019). Life cycle assessment of biochar produced from forest residues using portable systems. *Journal of Cleaner Production*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119564>
56. Régie de l'énergie du Canada. Tables de conversion d'unités d'énergie (2016). <https://apps.cer-rec.gc.ca/Conversion/conversion-tables.aspx?GoCTemplateCulture=fr-CA>
57. Rijal, B., Gautam, S. H., & LeBel, L. (2020). The impact of forest disturbances on residual biomass supply: a long-term forest level analysis. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119278>
58. Ruiz, J. (2019). Modernisation de l'agriculture et occupation des terres agricoles au Québec (1951-2011). *Cahiers de géographie du Québec*, 63(179), 213-230
59. Sampo, S., Hannes, B., Jari, N., Fredric, M., Sara, T., Klaus, J. H., Judith, R., & Horst, F. (2022). Closing an open balance: the impact of increased tree harvest on forest carbon, 14(8), 989–1000. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12981>
60. Siol, C., Thrän, D., & Majer, S. (2023). Utilizing residual biomasses from agriculture and forestry: different approaches to set system boundaries in environmental and economic life-cycle assessments. *Biomass and Bioenergy*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106839>
61. Sreekumar, A., Mohan, O., Kurian, V., Mvolo, C., & Kumar, A. (2023). A review of canadian wood conversion technologies for the production of fuels and chemicals. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101(8), 4331–4359. <https://doi.org/10.1002/cjce.24820>
62. Subbarao, P. M. V., D' Silva, T. C., Adlak, K., Kumar, S., Chandra, R., & Vijay, V. K. (2023). Anaerobic digestion as a sustainable technology for efficiently utilizing biomass in the context of carbon neutrality and circular economy. *Environmental Research*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116286>
63. Steele, P., Puettmann, M. E., Penmetsa, V. K., & Cooper, J. E. (2012). Life-cycle assessment of pyrolysis bio-oil production. *Forest Products Journal*, 62(4), 326-334.
64. Stermann, J., Moomaw, W., Rooney-Varga, J. N., & Siegel, L. (2022). Does wood bioenergy help or harm the climate? *Bulletin of the Atomic Scientists*, 78(3), 128–138. <https://doi.org/10.1080/00963402.2022.2062933>

65. Tahereh, M., Saeed, R., & Ursula, E. (2020). Improving municipal solid waste management strategies of montréal (Canada) using life cycle assessment and optimization of technology options, 13(5701), 5701–5701. <https://doi.org/10.3390/en13215701>
66. Vergé, X. P. C., Dyer, J. A., Desjardins, R. L., & Worth, D. (2009). Greenhouse gas emissions from the canadian pork industry. *Livestock Science*, 121(1), 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.05.022>
67. Walker, Kornelsen, Lewis, Martin, Masuda, Richmond, Root, Tait, N., & Castleden. (2019). Renewable energy and energy autonomy: how indigenous peoples in Canada are shaping an energy future. *Environmental Reviews*, 27(1), 95–105. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0024>
68. Walker, X. J., Baltzer, J. L., Cumming, S. G., Day, N. J., Ebert, C., Goetz, S., Johnstone, J. F., Potter, S., Rogers, B. M., Schuur, E. A. G., Turetsky, M. R., & Mack, M. C. (2019). Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. *Nature : International Weekly Journal of Science*, 572(7770), 520–523. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1474-y>
69. Wang, H., Zhang, S., Bi, X., & Clift, R. (2020). Greenhouse gas emission reduction potential and cost of bioenergy in British Columbia, Canada. *Energy Policy*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111285>
70. Wikipédia. (2023, 07 août). *Porc*. Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Porc#:~:text=Les%20porcs%20sont%20abattus%20%22C3%20,%20%20C3%83%20A2ge%20de%206%20mois>.
71. Wilberforce, T., Baroutaji, A., Soudan, B., Al-Alami, A. H., & Olabi, A. G. (2019). Outlook of carbon capture technology and challenges. *Science of the Total Environment*, 657, 56–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>
72. Whitmore, J. et P.-O. Pineau, 2023. État de l'énergie au Québec 2023, Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, préparé pour le gouvernement du Québec. https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2023/05/EEQ2023_WEB.pdf
73. WSP Canada inc. et Deloitte S.E.N.C.R.L. (2018). Production québécoise de gaz naturel renouvelable (GNR) : un levier pour la transition énergétique, Évaluation du potentiel technico-économique au Québec (2018-2030). [PDF]. Étude financée et coordonnée par Énergir.
- Rapport: https://drive.google.com/file/d/1W7enM1Rra-DNV1rhZkNnTS22X0rN3jZl/view?usp=drive_link
 - Communiqué de presse : <https://www.newswire.ca/fr/news-releases/transition-energetique--23-du-gaz-naturel-pourrait-etre-de-source-renouvelable-au-quebec-des-2030-700910591.html>
 - Fiche synthèse : https://mma.prnewswire.com/media/787501/nergir_Transition_energetique_2_3_du_gaz_naturel_pourrait_tr.pdf?p=pdf
74. WSP Canada inc. (2021). *Inventaire de la biomasse disponible pour produire de la bioénergie et portrait de la production de la bioénergie sur le territoire québécois*. [PDF]. Étude réalisée pour le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/energie/ED-inventaire-biomasse-bioenergies-WSP-2021-MERN.pdf?1668615164>
75. Yu, Z., Ma, H., Liu, X., Wang, M., & Wang, J. (2022). Review in life cycle assessment of biomass conversion through pyrolysis-issues and recommendations. *Green Chemical Engineering*, 3(4), 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2022.08.002>

UQÂM

