

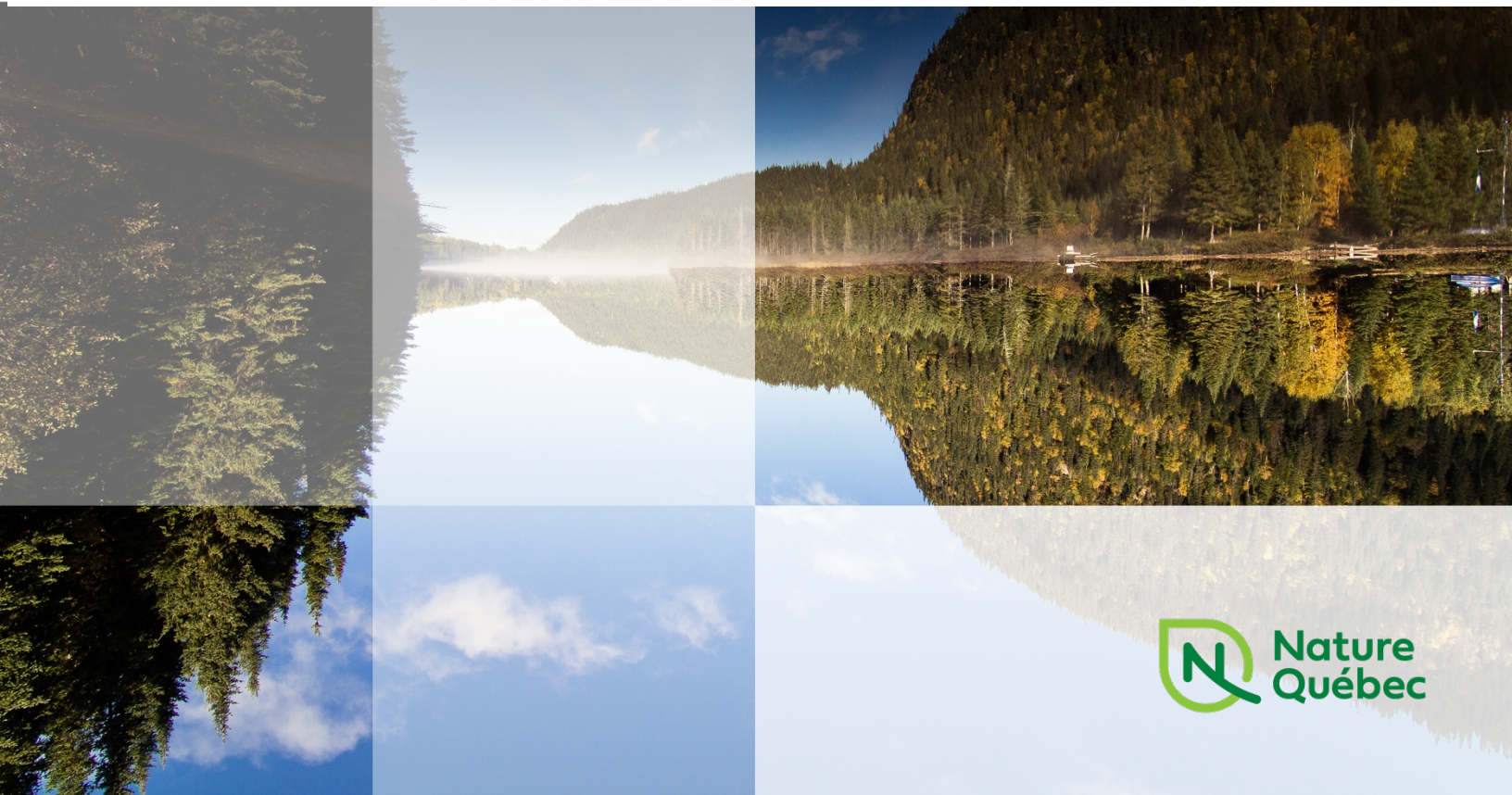


Mémoire de Nature Québec concernant

LA STRATÉGIE QUÉBÉCOISE SUR L'HYDROGÈNE VERT ET LES BIOÉNERGIES

Remis au Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

21 janvier 2022





Dossier Énergie et climat

Rédaction

Anne-Céline Guyon, *chargée de projet climat*

Emmanuelle Rancourt, *chargée de projet énergie et biomasse*

Theleli Abbas, *spécialiste énergie et biomasse*

Pierre Ross, *expert-bénévole*

François Cantin, *administrateur*

Révision

Alice-Anne Simard, *directrice générale*

Crédit photo couverture

Guillaume Bouchard

À propos de Nature Québec

Nature Québec est un organisme national sans but lucratif œuvrant à la conservation des milieux naturels et à l'utilisation durable des ressources depuis 1981. Appuyée par un réseau de scientifiques, son équipe mène des projets et des campagnes autour de 4 axes : la biodiversité, la forêt, l'énergie et le climat, ainsi que l'environnement urbain. L'organisme regroupe plus de 90 000 membres et sympathisant-es, 40 groupes affiliés et est membre de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Partout au Québec, Nature Québec sensibilise, mobilise et agit en vue d'une société plus juste, à faible empreinte écologique et climatique, solidaire du reste de la planète.

Pour en savoir plus : naturequebec.org

+ NOTRE VISION

Nature Québec agit en vue d'une société plus juste, à faible empreinte écologique et climatique, solidaire du reste de la planète. L'organisme oriente ses actions pour que le Québec aime ses milieux naturels, en ville comme en région, les protège et les reconnaisse comme essentiels à son épanouissement.

+ NOTRE MISSION

Nature Québec encourage la mobilisation citoyenne, intervient dans le débat public, informe, sensibilise et réalise des projets afin que notre société :

- ▶ **Valorise la biodiversité**
- ▶ **Protège les milieux naturels et les espèces**
- ▶ **Favorise le contact avec la nature**
- ▶ **Utilise de façon durable les ressources.**

Table des matières

Introduction	5
Section 1 : Hydrogène vert.....	6
Fabrication et consommation d'énergie	6
Surplus électriques au Québec.....	6
Usages prioritaires.....	7
Usages industriels	8
Transport routier	12
Transport maritime.....	16
Transport aérien	17
Enjeux de sécurité publique	17
Énergir et l'hydrogène.....	18
Formation de la main-d'œuvre et transition juste.....	20
Hydrogène vert : Conclusion.....	21
Section 2 : Bioénergies.....	23
Matières premières.....	23
Pertinence de conversion	26
Applications	26
Besoins en recherche	27
Bioénergies : Conclusion.....	28
Références.....	29

Introduction

Une stratégie à penser d'abord et avant tout dans une perspective de descente énergétique.

La stratégie proposée dans le document “Consultation sur l'hydrogène vert et les bioénergies” (Gouvernement du Québec, 2021) propose une approche de l'usage de l'hydrogène (H_2) avant tout commerciale, plutôt que de viser une réduction réelle des émissions de gaz à effet de serre (GES) au Québec. Le difficile objectif d'atteindre la carboneutralité en 2050 en utilisant l'énergie électrique du Québec nécessite de s'attarder avant toute chose à déterminer quelles sont les façons optimales d'utiliser chaque kilowattheure (kWh) d'électricité produit au Québec, pour ensuite choisir les options les plus performantes et respectueuses des limites des écosystèmes naturels. À la lecture du document de consultation, l'accent choisit par le gouvernement, et qu'on devine par l'énoncé “Créer de la richesse et rayonner à l'international”, laisse entendre qu'il y a peut-être méprise à propos de la réelle cible qu'il nous faut atteindre.

L' H_2 n'existe pas sur terre à l'état de molécule pure. Elle est toujours associée, soit à l'oxygène pour produire de l'eau, ou à du carbone dans les hydrocarbures. Pour obtenir de l' H_2 , il faut briser ces molécules. Cette opération demande une grande quantité d'énergie qui ne sera récupérée qu'en faible partie à cause de divers facteurs chimiques et physiques incompressibles. L' H_2 est un vecteur d'énergie et non une source. Il faut donc l'utiliser avec parcimonie et pour des usages où aucune autre solution n'est possible.

Dans ce mémoire, nous analysons les usages proposés dans le document de consultation, et démontrons que pour la grande majorité d'entre eux, les pertes énergétiques de l'ordre de 70% (Mercure, 2021) inhérentes au processus de fabrication-utilisation de l' H_2 , le coût lui aussi très important des équipements requis pour l'hydrolyse, et les sommes astronomiques en fonds publics nécessaires à la mise en place des infrastructures impactent négativement les finances publiques d'une part, et ne permettent pas d'autre part, d'atteindre nos objectifs de réduction de GES.

Au surplus, l' H_2 est un puissant gaz à effet de serre indirect, et ses effets néfastes sont loin d'être négligeables. Les caractéristiques physiques de la molécule d'hydrogène

complicité sérieusement sa conservation et son transport, et les fuites sont difficiles à contrôler. Lors de sa libération, sa puissance est deux cents fois plus élevée que celle du CO_2 . La puissance de l'hydrogène en tant que gaz à effet de serre indirect est telle qu'elle pourrait ruiner les différents efforts visant à décarboner la planète. Ainsi, les avantages de l' H_2 par rapport aux combustibles fossiles s'amointrissent, même lorsqu'il est généré grâce à une électricité renouvelable (Kurmayer, 2021).

Une multitude de nouveaux projets visant à utiliser les surplus des capacités actuelles d'Hydro-Québec se réalisent actuellement ou sont en voie d'être lancés. L'électrification massive des cinq millions d'automobiles et de camions légers par l'usage de batteries, processus qui englobera bientôt aussi les taxis, camions et autobus urbains, véhicules d'urgence et autres, la conversion à l'électricité d'une part importante des usages du gaz naturel, tel le chauffage, et l'électrification de moult processus industriels, auront un impact important sur les capacités actuelles et futures d'Hydro-Québec.

Éviter les importantes pertes d'énergies comme celles qu'occasionne inévitablement la production-utilisation d' H_2 est donc primordial. L'usage direct de l'électricité est la voie la plus judicieuse et efficace à suivre, tant pour réduire les émissions de GES que du point de vue économique.

« La puissance de l'hydrogène en tant que gaz à effet de serre indirect est telle qu'elle pourrait ruiner les différents efforts visant à décarboner la planète. »

Section 1 : Hydrogène vert

Fabrication et consommation d'énergie

Il se produit actuellement très peu d'hydrogène vert. "Currently, there is no significant hydrogen production from renewable sources: green hydrogen has been limited to demonstration projects" (IRENA, 2020). La raison pour laquelle il suscite autant d'engouement s'appuie sur deux prémisses.

La première est que les beaux jours des énergies fossiles sont comptés et qu'il faut préparer immédiatement l'après-fossile. La seconde est la certitude que le prix pour produire et consommer de l'hydrogène vert ira en baissant et se positionne comme l'alternative la mieux placée, environnementalement et économiquement, pour remplacer les fossiles. On assiste donc à une course mondiale où tout est à faire. Et comme la réduction du coût de fabrication de l'hydrogène vert dépend beaucoup du prix de l'électricité, le Québec conclut qu'il est en bonne position pour entreprendre l'aventure.

Produire un kilogramme d'hydrogène vert nécessiterait entre 48 et 60 kWh d'électricité. Marcel Lacroix, de l'Université de Sherbrooke, mentionne +/- 50 kWh au kg (Lacroix, s.d.). Exprimé en kJ, on obtient +/- 180 000 kJ par kg d'hydrogène. Mais la combustion ne dégage que 141 000 kJ par kg d'hydrogène. Produire de l'hydrogène vert se fait donc à perte si on tient compte de la quantité d'électricité entrant versus la quantité sortante. Cette perte, si on n'arrive pas à l'éliminer technologiquement, doit être prise en compte dans le coût de l'électricité.

Surplus électriques au Québec

Avant de lancer le Québec dans une coûteuse et énergivore production d'H₂ vert, il importe de connaître quelles quantités d'énergie sont disponibles et de prioriser les usages possibles afin de tirer le maximum de réduction des émanations de GES de chaque térawattheure (TWh).

En 2020, le volume d'électricité annuel disponible est estimé à 32 TWh (Pineau et Bouchet, 2020). Ces "surplus d'électricité" correspondent à l'électricité que le Québec peut produire au-delà du volume permettant de répondre aux besoins de la clientèle québécoise et de respecter les engagements contractuels d'exportation long terme.

Dans son « Plan pour une économie verte », déposé en 2020, le gouvernement du Québec fait de l'électrification de son économie une priorité dans la lutte pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les principaux secteurs visés sont le transport léger (voitures électriques, autobus, REM) et la conversion du chauffage résidentiel et commercial (bâtiments) (Gouvernement du Québec, 2021).

Diverses options s'offrent au Québec pour utiliser ces surplus (Pineau et Bouchet, 2020; Lecavalier, 2020) :

- ▶ Électrification par batterie de 2 millions de véhicules, soit 35 % du parc automobile québécois.
 - ▶ 6 TWh, sur la base d'une consommation annuelle de 3 MWh par véhicule
- ▶ La mise en service du Réseau express métropolitain (REM)
 - ▶ 0,4 TWh, une fois la mise en service complète effectuée

- ▶ La conversion à l'électricité de l'ensemble des usages au gaz naturel au Québec considérés comme « convertibles »
 - ▶ 43 TWh, sur la base d'installation d'équipements électriques conventionnels (plinthes, fournaies, bouilloires)
 - ou**
 - ▶ 28 TWh, sur la base de technologies plus avancées et écoénergétiques (ex. pompes à chaleur)
- ▶ 20 nouveaux centres de données installés au Québec. On prévoit que la consommation des centres de données sera multipliée par un facteur de neuf d'ici 2029.
 - ▶ 5 TWh, sur la base d'une puissance appelée de 30 MW par centre
- ▶ 200 nouveaux gros producteurs en serre installés au Québec
 - ▶ 2 TWh, sur la base d'une consommation annuelle de 10 GWh par producteur
- ▶ 1 nouvelle aluminerie au Québec
 - ▶ 4 TWh, sur la base de la consommation de l'aluminerie ABI
- ▶ 10 nouveaux centres de chaînes de blocs installés au Québec
 - ▶ 3,5 TWh, sur la base d'une puissance appelée de 40 MW par centre
- ▶ 10 électrolyseurs pour la production d'hydrogène vert
 - ▶ 4 TWh, sur la base d'une puissance appelée de 50 MW par électrolyseur

Les possibilités d'électrification dépassent donc largement la quantité de TWh disponibles. De plus, toutes les options mentionnées, sauf les électrolyseurs, utilisent directement l'électricité, donc minimisent les pertes. Bien sûr, on reconnaît que l'énergie utilisée par les centres de chaînes de blocs ne va pas dans le sens d'une économie sobre en énergie, preuve que bien des choix de société restent à faire.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De donner priorité aux projets utilisant directement l'électricité et minimisant les pertes telles celles occasionnées par la création-utilisation d'H₂**

- **Que la production d'H₂ vert demeure réservée à un usage à l'intérieur des frontières du Québec afin de remplacer le gaz naturel, là où les solutions d'électrification directes sont impossibles.**

Usages prioritaires

Considérant :

- ▶ L'importance du chantier d'électrification du Québec pour atteindre la carboneutralité au plus tard en 2050 et la nécessité d'utiliser chaque TWh à bon escient;
- ▶ La perte d'efficacité énergétique à laquelle conduit la production d'hydrogène vert;

Des usages prioritaires de l'hydrogène vert devront être établis. Pour ce faire, établir certains critères quant à leur sélection nous semble nécessaire.

Critères de sélection des usages prioritaires :

- ▶ S'assurer que le processus de conversion à l'hydrogène vert du secteur ou de l'industrie concerné s'inscrive avant tout dans une démarche plus globale de sobriété énergétique puis d'efficacité;
- ▶ S'assurer que les différentes initiatives s'inscrivent dans une analyse par cycle de vie avantageuse en termes de réduction de GES;
- ▶ Sélectionner des secteurs et usages qui perdureront dans un monde décarboné, mais aussi respectueux des écosystèmes naturels et des limites biophysiques de la planète;
- ▶ Éviter que les usages sélectionnés ne viennent verrouiller l'utilisation d'énergies fossiles;
- ▶ Utiliser l'H₂ que comme énergie de substitution et que lorsqu'il n'y a aucune autre option possible

Usages industriels

L'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde est quasi exclusivement utilisé pour des usages industriels dans la chimie et le raffinage.

L'hydrogène sert à plus de 80 % à la fabrication d'ammoniac, un intrant à l'industrie des engrais, ainsi qu'au raffinage des produits pétroliers, afin de désulfurer les carburants. Le reste est utilisé pour d'autres productions chimiques, des explosifs, des nettoyeurs, des fluides frigorigènes, pour la synthèse de matières plastiques, pour certains processus de l'industrie du verre et pour la fabrication de circuits imprimés électroniques. 60 millions de tonnes d'hydrogène sont produites par année dans le monde (Planète Énergies, 2014) et 99 % de cet hydrogène provient d'hydrocarbures, comme le gaz naturel. Malheureusement, ce procédé libère du carbone qui se mélange à l'oxygène de l'air et mène à des émanations de gaz à effets de serre (CO_2). L'Agence Internationale de l'Énergie estime à 830 Mt CO_2 les émissions de CO_2 directement associées à la production d'hydrogène (Philibert, 2021).

La production d' H_2 vert est énergivore et coûteuse. Pour fabriquer une tonne d'hydrogène vert, il faut 60 000 kWh. Au tarif réservé aux grandes entreprises d'Hydro-Québec (tarif L de 3,28 cents le kilowattheure), il en coûte \$2400 la tonne. L'électrolyse coûte deux à trois fois plus cher que le procédé par hydrocarbure (Gamache, 2021).

L'hydrogène n'est pas indispensable pour répondre aux besoins de chaleur de l'industrie d'une manière décarbonée. L'électricité peut pourvoir à la quasi-totalité des usages. Contrairement à une idée répandue, mais démentie par les fours à arc des aciéries, il n'est pas de température de procédé si haute qu'elle serait inaccessible à l'électricité et imposerait le recours à un combustible – hydrogène ou autre. Les techniques nombreuses – résistance directe, infrarouge, induction, microondes, radiofréquences, plasmas, etc. – permettent des gains d'énergie, de temps, de qualité, très appréciables. Pour les températures plus basses, jusqu'à 280°C, les pompes à chaleur divisent l'énergie nécessaire par trois ou plus, la recompression mécanique de vapeur elle, les divisent par cinq à dix (Philibert, 2021).

CIMENTERIES

La production de ciment représente environ 10 % du dioxyde de carbone (CO_2) d'origine humaine. En moyenne, sur la planète, chaque tonne de ciment fabriqué émet aussi une tonne de GES. Et comme le ciment est l'un des composants essentiels du béton, le matériau le plus utilisé sur la planète, le problème des émissions est très préoccupant (Tremblay, 2021). L'énergie nécessaire au procédé représente environ 40% des émissions, alors que 60 % proviennent du calcaire lui-même, qui libère du carbone sous forme de CO_2 lorsqu'il se transforme en ciment (Gauthier, 2018). Ce dernier processus est inhérent à la fabrication du ciment et la seule technologie permettant d'en réduire les émissions est la capture du carbone pendant le procédé.

La fabrication du ciment implique que la pierre calcaire moulue soit chauffée à 1500 degrés Celsius et passe à l'état de lave. Cette chaleur, obtenue le plus souvent en brûlant des hydrocarbures, émet de très importantes quantités de GES. Au cours du chauffage, le carbonate de calcium de la pierre se sépare en oxyde de calcium, d'une part, et en dioxyde de carbone, d'autre part. Ce carbone se retrouve aussi dans l'atmosphère (Gauthier, 2018).

Il existe plusieurs façons de réduire les émissions de GES liés à la fabrication du ciment. L'utilisation de carburants plus écologiques pour produire la chaleur requise en est une. Certaines cimenteries brûlent de la biomasse, des pneus, du bois, des résidus de la construction ou encore des huiles usées (Gauthier, 2018).

En Angleterre, des tests sont en cours pour utiliser de l' H_2 comme combustible dans les brûleurs de ciment (Tremblay, 2021). Les quantités nécessaires d' H_2 sont évidemment gigantesques, augmentant les coûts du même ordre. Comme mentionné précédemment, l' H_2 ici n'est pas indispensable puisque des alternatives très avantageuses existent. De plus, l'usage de l' H_2 dans les cimenteries, à cause des quantités importantes de kWh qu'il requière, priverait d'autres applications plus rentables écologiquement d'un apport d'énergie essentiel.

Des tests avec les brûleurs au plasma en ce sens sont en cours (Tremblay, 2021). Au Québec, cet usage direct de l'hydroélectricité permettrait de diminuer de beaucoup le bilan carbone des cimenteries.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **Que l'accent soit mis sur l'accélération de la recherche ciblant l'utilisation du chauffage au plasma pour la production de ciment. Cette**

utilisation de l'électricité est celle qui génère le moins de pertes d'énergie pour un maximum de réduction des émissions de GES.

SIDÉRURGIE

La sidérurgie représente à elle seule plus de 7% des émissions mondiales de CO₂, une proportion appelée à croître. En moyenne dans le monde, chaque tonne d'acier produite entraîne le relâchement de 1,85 tonne de CO₂ (Tremblay, 2021). Chaque étape nécessaire à la transformation du minerai de fer en acier (extraction, transport, réduction, aciérie, etc.) conduit à des émissions significatives de GES.

Afin de réduire ces émissions, un nouveau procédé consiste à utiliser de l'hydrogène au lieu du monoxyde de carbone (CO), comme agent réducteur du minerai. On produit alors un fer « préréduit » qui peut être ensuite utilisé comme charge dans les fours à arcs électriques. L'emploi de l'hydrogène permet de libérer de l'eau à la place du dioxyde de carbone qui est rejeté par les processus actuels.

À titre d'exemple, l'émission totale pour une tonne d'acier va de 500 kg de CO₂ avec de l'hydrogène produit par reformage du gaz naturel et capture du CO₂ à moins de 200 kg de CO₂ si l'hydrogène est produit par hydrolyse. Ce résultat est remarquable comparé à celui de la filière classique (usine intégrée avec haut fourneau et convertisseur) qui émet environ 1850 kgCO₂ /tHRC (Wagner, 2008).

Le principal frein au développement de l'emploi d'hydrogène dans la métallurgie est le coût actuel de ce gaz. Il faudrait quelque 90 millions de tonnes d'hydrogène pour décarboner la sidérurgie mondiale (Philibert, 2021).

La mise en place de procédés qui remplacent le gaz naturel utilisé dans la purification du minerai de fer par de l'hydrogène est une application qui s'avère intéressante pour de l'H₂ vert fabriqué au Québec.

Pour l'obtention des températures nécessaires, la méthode la plus propre est celle qui utilise le four à arc électrique. Cette technique est beaucoup plus écologique que celle qui utilise du charbon. Elle permet de réduire de moitié les émissions lorsqu'utilisée dans les meilleures conditions (Tremblay, 2021).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **Que l'accent soit mis sur la conversion des aciéries dans l'usage d'arc électrique pour la production de chaleur**
- **Que lorsque l'H₂ pour purification du minerai de fer est utilisé, il serait optimal que l'usine d'hydrolyseur soit située dans le voisinage immédiat du lieu de fabrication de l'acier afin de minimiser les étapes de compression, de transport de l'H₂ ainsi que les pertes en énergie et en molécules inhérentes à ces processus.**

ALUMINERIES

L'aluminium est produit par électrolyse à partir de l'alumine extraite de la bauxite (Aluminium France, s.d.). Les tarifs avantageux octroyés par Hydro-Québec aux alumineries sont la principale raison de leur implantation au Québec.

La fabrication d'aluminium utilise de l'électricité de façon directe pour le processus d'électrolyse. Toutefois, du mazout lourd est utilisé afin de cuire les blocs de carbone, conducteurs essentiels au procédé de fabrication de l'aluminium (Alouette, 2020).

Des recherches très récentes révèlent qu'il est possible de produire de l'H₂ à partir de restes d'aluminium. En effet, des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) ont développé une technique qui permet de produire de l'hydrogène à partir d'eau et d'aluminium, et ce sans le moindre apport extérieur d'énergie (Gauthier, 2021).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De participer à la recherche pour le remplacement du chauffage au mazout par le chauffage à l'électricité**
- **De s'intéresser à la recherche sur la production d'H₂ à partir d'aluminium, puisque le Québec est un important producteur de cette matière**

RAFFINAGE DU PÉTROLE

Les sources fossiles d'énergie, comme le pétrole, contiennent naturellement du soufre. La combustion de carburants soufrés produit des oxydes de soufre (SO_x). Ces gaz irritants provoquent de graves problèmes respiratoires.

L'hydrogène permet d'éliminer ce soufre lors du raffinage des carburants par un procédé de désulfuration. L'hydrogène est introduit à haute température et haute pression lors du raffinage. Il réagit avec le soufre contenu

dans les molécules d'hydrocarbures pour former un nouveau composé : le sulfure d'hydrogène (H_2S) qui est retiré. Ce sulfure d'hydrogène peut ensuite réagir avec de l'oxygène pour donner du soufre qui a son tour est utilisé par la suite comme matière première dans l'industrie (Air Liquide, s.d.).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **Que des usines d'hydrolyse soient situées dans le voisinage immédiat des lieux d'utilisation dans les raffineries afin de minimiser les étapes de compression et de transport de l' H_2 , puisque l'industrie lourde du raffinage est une grande consommatrice d' H_2 .**

ÉLECTRONIQUE

En électronique, l'hydrogène sert de gaz vecteur (gaz permettant de transporter des gaz actifs) pour des applications diverses comme la fabrication de composants électroniques. Il assure une excellente protection contre les impuretés et l'oxydation (Air Liquide, s.d.).

L'industrie de la fabrication de composants électroniques est presque inexistante au Québec. En ce sens, la demande en H_2 est très faible.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **La demande d' H_2 pour cette industrie au Québec étant faible, s'il fallait réserver une partie de l' H_2 produit ici à des fins d'utilisation dans des composantes électroniques, cet H_2 serait exporté à presque 100%. Comme nous avons établi que l' H_2 s'exporte mal sans pertes importantes et comporte aussi des risques de sécurité importants, il est préférable de ne pas réserver d' H_2 à cette fin.**

VERRE

Dans l'industrie du verre, l' H_2 est indispensable à la fabrication du verre plat utilisé notamment pour les écrans plats. La majeure partie du verre plat utilise le procédé « Float » pour lequel l'hydrogène de haute pureté constitue une atmosphère de protection (Air Liquide, s.d.).

L'industrie de la fabrication de verre est presque inexistante au Québec. La demande en H_2 pour cette industrie est très faible.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **La demande d' H_2 pour cette industrie au Québec étant faible, s'il fallait réserver une partie de l' H_2 produit ici à des fins d'utilisation dans la fabrication de verre, cet H_2 serait exporté à presque 100%. Comme nous avons établi que l' H_2 s'exporte mal sans pertes importantes et comporte aussi des risques de sécurité importants, il est préférable de ne pas réserver d' H_2 à cette fin.**

AMMONIAC

L'hydrogène produit aujourd'hui sert à plus de 80 % à la fabrication d'ammoniac. L'ammoniac entre dans la composition d'engrais chimique. 200 millions de tonnes de fertilisants sont utilisées chaque année. Deux pourcents de la consommation mondiale d'énergie est dédiée à la fabrication d'ammoniac, la principale forme d'engrais azoté (Deluzarche, 2018). Cet H_2 est produit à partir d'hydrocarbures à 99% actuellement.

Malheureusement, la moitié des engrais chimiques est gaspillé, dispersé par le vent lors de sa pulvérisation ou bien lessivé par la pluie lorsqu'il pleut. Transformé en nitrates, l'engrais pollue les nappes d'eau souterraines, les rivières et les océans, aboutissant à l'eutrophisation des cours d'eau et à la création de gigantesques « zones mortes », privées d'oxygène (Deluzarche, 2018).

Des alternatives existent. Plusieurs entreprises commercialisent des moyens de fertiliser la terre qui sont en accord avec la protection de l'environnement et qui permettent d'obtenir des rendements agricoles équivalents à ceux obtenus avec les engrais chimiques azotés. À cette fin, ils utilisent les probiotiques. La recherche a permis de développer des fertilisants naturels à base de probiotiques à appliquer sur les cultures céréalières. Ces produits s'appliquent dans le sillon lors de la plantation. Les microbes créent alors une liaison symbiotique avec les racines des plantes qui sont ainsi capables de fixer l'azote. De plus, comme les microbes adhèrent aux racines, ils ne sont pas lessivés lors des pluies comme l'engrais chimique. Ce qui permet à la fois de mieux calculer les doses et d'utiliser moins de produits. Une seule application suffit en début de saison : nul besoin d'asperger continuellement de l'engrais sur les champs. Ceci représente un gain de temps et d'argent non négligeable pour les agriculteurs (Deluzarche, 2018).

L'agriculture probiotique permet donc déjà d'obtenir des résultats à la fois écologiques et économiquement avantageux sans l'usage d'engrais chimique. La littérature concernant les avancées des recherches sur

l'agriculture probiotique affirme que les avantages sont tels que les engrais chimiques sont tout simplement voués à disparaître (Deluzarche, 2018).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De favoriser et mettre l'accent sur la recherche et la production d'une agriculture sans engrais chimiques au Québec.**
- **De ne pas orienter la production d'H₂ vert en fonction de la production d'engrais azotés (ammoniac) au Québec**

L'HYDROGÈNE DANS LES BÂTIMENTS

Certains envisagent l'usage d'H₂ pour chauffer des bâtiments. L'écart d'efficacité si on le compare avec l'usage de l'électricité est considérable. La chaîne hydrogène apporte environ 50% de l'énergie électrique initiale sous forme de chaleur dans un bâtiment. Mais une pompe à chaleur électrique, elle, puise la chaleur dans le milieu environnant (air, eau, sol), et délivre facilement 3 kWh (ou plus) de chaleur par kWh électrique consommé. L'écart de rendement est donc de 1 à 6 (Philibert, 2021).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De faciliter les conditions d'accès à l'usage de pompes à chaleur électrique partout où c'est possible. Cette avenue est de loin supérieure au chauffage électrique par plinthe et surclasse complètement l'usage d'H₂.**
- **De ne pas orienter la production d'H₂ vert en fonction du chauffage des bâtiments au Québec**

EXPORTATION et INDUSTRIE LOURDE MONDIALE

L'entreprise privée et le gouvernement du Québec, comme énoncé dans le document "Consultation sur l'hydrogène vert et les bioénergies" (Gouvernement du Québec, 2021) se montrent très sensibles à la demande mondiale d'H₂. En fait, une multitude d'industries lourdes au niveau mondial pourraient profiter de l'H₂ produit au Québec. Toutefois l'H₂ s'exporte mal, génère des pertes importantes d'énergies et de molécules d'H₂ et comporte des risques de sécurité importants (Howard, Whitby and Winter, 2021).

L'hydrogène comprimé n'a que 15 % de la densité énergétique du diesel. Pour une quantité d'énergie équivalente, il prend sept fois plus de volume. Pour rendre le coût du transport par bateau acceptable, il faut transformer l'hydrogène en ammoniac (NH₃), dont la

densité énergétique est plus élevée. Il demeure que les risques environnementaux en cas de naufrage de ces gigantesques cargos remplis d'ammoniac sous pression sont importants, d'autant plus que cette substance est très toxique pour les organismes aquatiques (Gouvernement du Québec, 2021).

Les pertes sont un gaspillage net d'énergie et le contrôle de l'usage que feront les clients de l'H₂ produit ici est impossible. De plus, l'H₂ produit ici ne le sera pas sans une aide en fonds publics importante. Il n'est pas opportun d'utiliser les taxes des citoyens d'ici pour favoriser une commercialisation générant de telles pertes et qui plus est, peut facilement être remplacée par d'autres solutions plus écologiques.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De planifier, développer et réserver la production d'H₂ du Québec aux besoins spécifiques du Québec.**

« L'hydrogène n'est pas indispensable pour répondre aux besoins de chaleur de l'industrie d'une manière décarbonée. L'électricité peut pourvoir à la quasi-totalité des usages. »

Transport routier

Le gouvernement québécois s'est fixé l'objectif d'atteindre en 2030 une réduction de 37,5 % de gaz à effet de serre (GES) par rapport au niveau de 1990. Électrifier les transports est la voie la plus directe pour atteindre l'objectif fixé par le GIEC pour limiter les changements climatiques (SG2B, s.d.).

Le gouvernement a annoncé sa volonté de voir 1,5 million de véhicules électriques sur nos routes d'ici 2030, soit 20% du parc automobile québécois. De plus, tous les véhicules neufs vendus seront électriques à l'horizon 2035, ce qui demandera une grande quantité d'énergie électrique.

Le secteur des transports au Québec émet 34 MT de CO₂, soit 43% des émissions (Gasser, 2019), dont 17 MT provenant du sous-secteur du transport intensif de marchandises ou de voyageurs (Transition énergétique Québec, 2021). De plus, les émissions provenant du transport routier ont augmenté de 35 % depuis 1990 ; au Canada, seule l'industrie des sables bitumineux affiche une croissance supérieure de GES (WWF, 2012). Le Québec a consommé en 2017 plus de 8,8 milliards de litres d'essence et plus de 3 milliards de litres de diesel pour l'usage routier (Lemelin, 2019).

- ▶ Les 5 millions de véhicules privés du Québec parcourent en moyenne 13000 km/an et émettent 3 tonnes par an de CO₂
- ▶ Les 8300 taxis du Québec parcourent en moyenne 60 000 km/an et émettent 14 tonnes par an de CO₂ chacun
- ▶ Les autobus urbains du Québec émettent 62,8 tonnes par an de CO₂ chacun
- ▶ Les 158 000 camions lourds du Québec émettent 100 Tonnes par an de CO₂ chacun (Diot, 2021; Baillargeon, 2021)

La conversion de ces véhicules pour qu'ils utilisent des piles à H₂ conduit à une consommation électrique ahurissante. Ainsi, les véhicules privés consommeraient 99 kg par an d'H₂, sur une base de 0,76 kg/100km, les taxis consommeraient 456 kg par an d'H₂, et les camions consommeraient 10 tonnes par an d'H₂, en moyenne sur la

base de 80 kg d'H₂ pour 500 à 1200 km pour un camion de classe 8 (Transition énergétique Québec, 2021).

La résultante est que le besoin en H₂ s'établirait à 5,1 MT/an. Cela nécessiterait une capacité d'électrolyse de l'ordre de 34 GW et une consommation proche de 300 TWh, soit près du double de la production actuelle d'Hydro Québec. L'investissement nécessaire pour la construction des électrolyseurs de type Capex (PEM) serait de \$47 milliards, à raison d'un coût de \$1500 par kW (Transition énergétique Québec, 2021).

Ces chiffres montrent qu'il faut prioriser les secteurs qui offrent le plus haut rendement énergétique ainsi que les meilleures réductions de GES par dollar investi.

La documentation scientifique démontre que les véhicules à hydrogène nécessitent jusqu'à trois fois plus d'électricité par kilomètre que les véhicules à batteries. L'électrolyse absorbe environ 30% de l'énergie. Il faut quelque 50 kWh d'électricité pour obtenir un kilogramme d'hydrogène, dont le pouvoir calorifique est 33,33 kWh. Il faut ensuite de l'énergie pour comprimer cet hydrogène, le transporter, et le stocker. Enfin, il faut transformer l'énergie en électricité dans une pile à combustible, dont le rendement maximal est d'environ 60% (Philibert, 2021).

Lorsque des piles à H₂ sont utilisées dans des véhicules routiers, 77% de l'énergie utilisée pour la fabrication de l'H₂ par électrolyse est perdue (Fiches-Autos, 2020). Cette règle s'applique pour tous les types de véhicules, qu'ils soient auto, camions légers ou lourds. Par contre, l'usage de batteries n'occasionne que des pertes de 10 à 30% de l'énergie investie. Mieux vaut directement utiliser le courant pour l'introduire dans une batterie plutôt que de convertir en hydrogène, pour ensuite reconvertir cet hydrogène en électricité pour le moteur électrique (Fiches-Autos, 2020). Puisque l'usage de batteries permet d'alimenter 3 fois plus de véhicules avec la même quantité d'énergie, c'est donc l'avenue "batterie" qu'il faut privilégier quand c'est techniquement et économiquement possible, c'est-à-dire ajusté aux conditions d'usage souhaité (durée de stockage, dimensionnement, temps de recharge) (Bodineau et Sacherm 2020).

TRANSPORT URBAIN DE PERSONNES

De nombreuses études comparant l'usage de l'H₂ versus l'usage de batteries pour l'électrification des véhicules routiers lourds ont été produites en Amérique, en Europe et ailleurs dans le monde. S'inspirer de l'expérience acquise dans d'autres pays peut permettre de faire ici les choix les plus judicieux. Ainsi, il est possible de comparer la solution

hydrogène et la solution batteries et estimer les coûts que représentent les diverses solutions existantes pour décarboner le transport urbain, ainsi que le coût de la tonne de CO₂ évitée.

Les résultats d'une analyse européenne comparant les coûts et les performances sur 20 ans de trois possibilités en supposant utiliser une électricité sans émissions de CO₂, soit continuer à utiliser des bus urbains diesel, utiliser l'hydrogène obtenu à partir d'électrolyse ou utiliser des bus à batteries, sont les suivants (Livet, 2021) :

Les émissions de CO₂ des bus diesel sont estimées à 210 kt et sont diminuées à 10 kt en s'affranchissant du diesel, que ce soit par l'H₂ ou par les batteries.

Les coûts de l'électricité utilisée vont du simple dans le cas de l'usage de batteries à presque le triple pour le cas de l'H₂ (un rapport de 1 à 2,73).

Les coûts totaux, incluant les coûts d'achat des bus, les coûts d'entretien sur 20 ans, le coût des infrastructures nécessaires va aussi du simple dans le cas de l'usage de batteries à un facteur de 2,73 dans le cas de l'hydrogène.

Le coût de la tonne de CO₂ évitée est quant à lui de 500 €/t pour la solution H₂ dans le cas d'une étude réalisée à Lyon en France si on compare cette solution à celle de conserver les bus diesel. Dans cette même étude, le coût de la tonne de CO₂ évitée est de -230 €/t pour la solution batterie si on compare cette solution à celle de conserver les bus diesel.

Le coût négatif (-230 €/t) de la tonne de CO₂ évitée dans la solution batteries indique qu'il est très rentable de remplacer les bus diesel par des bus électriques à batteries. Au contraire, le coût du CO₂ évité avec l'hydrogène est très élevé, soit de l'ordre de 500 €/t.

Il ressort de cette étude que choisir la voie hydrogène peut paraître « vert », car l'hydrogène est ressenti comme écologique, mais ce choix est économiquement désastreux (Livet, 2021).

La netteté des résultats obtenus dans le cas d'autobus urbains peut s'appliquer aux camions lourds urbains de classe 6 et 8 puisque les distances quotidiennes parcourues et les charges transportées sont semblables.

Au Québec, diverses compagnies dont Lion Électrique fabriquent une large gamme de véhicules électriques lourds urbains, camions de classe 6 et 8, autobus scolaires et autobus urbains (Lion, s.d.).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De privilégier l'usage de batterie pour le transport urbain de personnes**

TAXIS

Il y a environ 10 000 taxis en service au Québec (Métiers Québec, 2015). L'électrification par batterie des voitures taxis existe déjà dans plusieurs pays et a même déjà été implantée au Québec. Certaines compagnies fabriquent des voitures conçues exprès pour un usage commercial, animées par un groupe électrique comprenant une batterie au lithium-fer-phosphate de 80 kilowattheures (McKenna, 2019). La technologie est donc déjà en place. Il suffit d'une volonté politique pour aider et accélérer cette transition. Les sommes qui auraient été nécessaires à la construction d'hydrolyseurs et autres infrastructures nécessaires aux solutions H₂ pourraient être avantageusement affectées à l'accélération de la transition des voitures taxi vers l'usage de véhicules à batterie.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De privilégier et accélérer la conversion des taxis à l'usage de batterie**

AUTOBUS SCOLAIRES

Au Québec en 2013, plus de 523 000 élèves utilisent le transport scolaire chaque jour. Ils sont transportés par plus de 10 000 autobus réguliers, adaptés et berlines (Maignien, 2018) qui parcourent plus de 1 million de kilomètres par jour (Métiers Québec, 2015).

L'électrification du transport scolaire a un potentiel de réduction de 22 tonnes d'équivalent CO₂ annuellement par autobus. D'ici 2030, l'électrification de 65 % du parc d'autobus scolaires permettrait d'éviter près de 800 000 tonnes de GES (Ministère des Transports, s.d.).

Les autobus scolaires fonctionnant à batterie sont maintenant disponibles sur le marché. Ils représentent le meilleur rapport réduction des GES par dollar investi.

Les autobus scolaires à batterie représentent un autre avantage. Les autobus scolaires ne circulent principalement que pendant de courtes périodes avant et après la journée scolaire, et ne sont pas utilisés pendant les vacances. Ce comportement offre une opportunité unique, grâce à la technologie. Ces bus peuvent être utilisés comme une source d'énergie alternative à laquelle il est possible d'accéder pendant les périodes de forte demande. Ainsi

grâce à la technologie, un véhicule électrique peut être considéré comme une batterie externe. S'il est nécessaire de produire davantage d'électricité, une société de services publics peut accéder à cette énergie directement à partir du véhicule, réduisant ainsi la demande de pointe en énergie (Attrix, 2021).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De privilégier et accélérer la conversion des autobus scolaires à l'usage de batterie.**

AUTOBUS URBAINS

Neuf sociétés publiques de transport en commun (Montréal, Québec, Laval, Longueuil, Gatineau, Sherbrooke, Lévis, Saguenay et Trois-Rivières) desservent autant d'agglomérations regroupant un total de 27 municipalités. En 2012, elles ont assuré plus de 558 millions de déplacements de plus de 36,8 millions de passagers en transport régulier, ainsi que plus de 5,6 millions de déplacements de près de 370 000 passagers en transport adapté (Métiers Québec, 2015).

Ces autobus consomment collectivement environ 80 millions de litres de diesel annuellement (Lemelin, 2019). Toutefois, selon une étude sur les GES évités par le transport collectif, chaque tonne de CO₂ émise par la Société de Transport de Montréal (STM) permet d'en éviter 20 à Montréal (Golder Associés, 2016). Les émissions des véhicules n'ont pas seulement un impact direct sur le changement climatique, elles contribuent également à réduire la santé publique en raison de la pollution de l'air qu'elles provoquent. Ces impacts sont plus perceptibles dans les zones urbaines à forte densité de population, où les bus sont principalement utilisés (Attrix, 2021).

La supériorité de l'approche des autobus urbains à batterie à longue autonomie et à charge rapide n'est plus à démontrer. Ces autobus conviennent parfaitement à l'électrification par batterie, car ils ont des itinéraires établis, se déplacent dans une zone géographique restreinte et sont de taille importante, ce qui leur permet de transporter des batteries de grande taille. De plus, leur taux d'utilisation élevé permet de bénéficier davantage de la réduction des coûts de carburant, ce qui fait baisser leur coût total de possession.

Dans le cadre du projet Cité Mobilité, la STM exploite déjà depuis 2017 trois bus 100% électriques à recharge rapide alimentés par deux stations de recharge situées aux extrémités de la ligne 36 Monk. Après un an de service, le projet Cité Mobilité avait permis d'éviter 13 tonnes de GES en parcourant près de 95 000 km (STM, 2019).

L'électrification par batterie de l'ensemble du parc d'autobus urbain du Québec aura un impact significatif sur le réseau d'Hydro-Québec. Le net avantage de l'électrification par batterie sur l'électrification à l'H₂ permet d'électrifier près de 3 fois plus de véhicules pour une même quantité d'énergie et réduit d'autant les investissements nécessaires.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De privilégier et accélérer la conversion des autobus urbains à l'usage de batterie.**

CAMIONNAGE URBAIN

Le transport urbain de marchandises contribue considérablement aux problèmes environnementaux, tels que les émissions de gaz et les nuisances sonores. Il représente près de 30 % des émissions de dioxydes d'azote et près de la moitié des émissions de particules dues aux transports en ville (Dabanc, González-Feliu & Ville, 2010). Il engendre également des problèmes de sécurité puisque les véhicules de livraison, en raison de leurs dimensions, de leur maniabilité et des opérations de chargement/déchargement sur la voie publique, provoquent de nombreux accidents (OCDE, 2003).

Les livraisons fréquentes et en mode « juste à temps » et la croissance du commerce en ligne qui multiplie les flux de livraisons aux particuliers imposent de mettre en place des solutions pour réduire les impacts (OCDE, 2003).

Le groupage permet d'améliorer l'utilisation du système de transport en réduisant le nombre de parcours des véhicules, en augmentant l'efficacité et en diminuant les coûts financiers et environnementaux du transport (OCDE, 2003).

L'usage de véhicules à batterie est l'option de motorisation la plus pertinente pour le transport urbain de marchandises. L'autonomie limitée des batteries électriques, problématique pour les trajets de longue distance, n'est pas un obstacle à l'électrification de ces véhicules qui parcourent en majorité de faibles distances (inférieures à 100 km), et plus encore lorsqu'ils sont utilisés pour des livraisons du « dernier kilomètre » (Sénat, s.d.; Ministère des Transports, 2018).

L'électrification par batterie de l'ensemble du parc de véhicules lourds de transport urbain du Québec aura un impact significatif sur le réseau d'Hydro-Québec. Le net avantage de l'électrification par batterie sur l'électrification à l'H₂ permet d'électrifier près de 3 fois plus

de véhicules pour une même quantité d'énergie et réduit d'autant les investissements nécessaires.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De privilégier et accélérer la conversion des camions urbains à l'usage de batterie.**

CAMIONNAGE LONGUE DISTANCE

En premier lieu, il est essentiel de réduire le transport longue distance, conséquence directe de la surconsommation de produits manufacturiers, responsables de 70% des émissions de GES à l'échelle mondiale.

L'électrification par batterie du transport routier de marchandises sur de longues distances est encore mal adaptée en raison des besoins en autonomie de ce type de véhicule, même si la recherche en ce domaine progresse rapidement.

Entre autres solutions, le transport ferroviaire consomme dix fois moins d'énergie par kilomètre. Il coûte aussi moins cher : un seul chauffeur de locomotive conduit cent wagons (Baillargeon, 2021).

Si on choisissait de ne décarboner que 10% du camionnage lourd au Québec, soit 8600 camions émettant 0,8 MT/an de CO₂ par l'usage de l'H₂ vert, cela demanderait 90 kT/an d'H₂, soit la capacité d'électrolyse de près de 0,6 GW et une consommation d'énergie de 5 TWh, soit l'équivalent de la somme des centrales la Romaine-1 et 2. L'investissement nécessaire serait de 900 millions \$ (Transition énergétique Québec, 2021).

La recherche pour produire des batteries plus performantes et moins lourdes fait des avancées importantes à chaque année. Plutôt que d'investir dans des infrastructures importantes pour la conversion de camion longue distance à l'H₂, il est préférable de concentrer nos efforts sur l'électrification par batterie des autres types de véhicules et d'attendre l'apparition de batteries plus performantes avant d'électrifier les camions longues distances.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **Le camionnage longue distance représente moins de 50% des effectifs opérant au Québec (Métiers Québec, 2015). Il apparaît opportun de concentrer les efforts d'électrification par batterie sur l'autre 50%, celui des véhicules**

lourds urbains, comprenant les camions de classe 6 et 8. Ajoutons à ceux-ci les autobus urbains et les autobus scolaires.

AUTOS PERSONNELLES ET MOBILISATION URBAINE SANS AUTO

L'électrification par batterie des véhicules est nécessaire, mais elle ne pourra permettre seule d'obtenir les réductions de GES en transport indispensables à l'atteinte des objectifs fixés par les gouvernements. Il est nécessaire d'accroître la mobilité des personnes, tout en réduisant les déplacements en auto solo. Pour ce faire, il faut de nouvelles mesures d'écofiscalité afin d'influencer les comportements de mobilité en faveur du transport collectif et actif. Ces mesures d'écofiscalité doivent aussi permettre de lever de nouveaux revenus dédiés aux transports en commun afin d'accroître significativement l'offre de service (STM, 2019).

Les investissements publics qui seraient nécessaires pour la mise en place d'infrastructures de production d'H₂ seraient beaucoup plus efficaces et rentables s'ils étaient plutôt investis dans l'accentuation des transports collectifs.

La distribution des émissions de GES a été établie à 17,24 millions de tonnes pour les véhicules automobiles et camions légers, alors que les véhicules lourds sont responsables de 9,73 millions de tonnes d'émission de GES. Nous avons donc une répartition de 64% des émissions de GES du secteur des transports routiers attribuables aux véhicules automobiles et camions légers, contre 36% pour les camions lourds (Lemelin, 2019).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De privilégier et accélérer la conversion des voitures personnelles à l'usage de batterie, tout en mettant de l'avant des politiques et des mesures d'écofiscalité afin de décourager l'utilisation de l'auto solo et encourager l'utilisation des transports collectifs et actifs.**

« La documentation scientifique démontre que les véhicules à hydrogène nécessitent jusqu'à trois fois plus d'électricité par kilomètre que les véhicules à batteries. »

Transport maritime

Entre 80 % et 90 % du commerce international se fait par voie maritime (Bolduc et Ayoub, 2000). Si le transport maritime international était un pays, il serait le sixième ou septième émetteur mondial de CO₂.

Sur le plan des gaz à effet de serre, les émissions de CO₂ de l'industrie maritime représentent environ un milliard de tonnes par an, soit environ 3 % de l'ensemble des émissions mondiales (Damgé, 2018). Plus de 60 000 navires naviguent sur la surface du globe dans le cadre du libre-échange (Bompola, 2019).

Les cargos et porte-conteneurs utilisent l'un des carburants les plus sales au monde, un résidu visqueux du pétrole. Ce pétrole « bunker » est ce qui reste une fois que les autres produits pétroliers – essence, naphta ou diesel – plus légers, ont été raffinés. Seul l'asphalte utilisé pour les routes est plus épais (Damgé, 2018). Le transport maritime utilise ce carburant parce qu'il est le moins cher.

Les émanations des navires sont des résidus de métal, de la cendre, et beaucoup de soufre. Le carburant rejette ainsi beaucoup de NO_x et SO_x (oxydes d'azote et oxydes de soufre). « *Importants polluants de l'air, ils accélèrent la formation de particules fines et ultra-fines* », explique l'association écologiste France Nature Environnement. Longtemps utilisé par l'industrie, notamment pour faire tourner des centrales électriques, le pétrole bunker a été progressivement cantonné au transport maritime en raison des pluies acides qu'il provoquait (Damgé, 2018).

Lorsque la teneur en soufre est de 0,1 % du carburant, un porte-conteneurs produit autant d'oxydes de soufre qu'un million de voitures (Damgé, 2018).

Décarboniser le transport maritime mondial est une entreprise difficile. La trajectoire de décarbonisation visant l'atteinte du 1,5°C de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) repose sur quatre mesures clés, à savoir l'électrification indirecte en utilisant des carburants verts à base d'hydrogène, l'inclusion de biocarburants avancés, l'amélioration de l'efficacité énergétique des navires et la réduction de l'activité sectorielle en raison de changements systémiques dans la dynamique du commerce mondial (IAEA, s.d.).

Des initiatives existent pour réduire la pollution de ces navires, par exemple en mélangeant au diesel du gaz

naturel ou du méthanol. Cette voie est prometteuse pour rendre le transport plus propre, et elle doit continuer à être encouragée, mais elle ne permet pas, actuellement, de faire naviguer un bateau avec une propulsion 100% verte (Jormot, 2018). Des petits bateaux à hydrogène circulent déjà, mais des armateurs envisagent d'utiliser des piles à combustible pour propulser des bateaux à fort tonnage.

L'impact majeur de l'utilisation de l'H₂ pour la propulsion des navires outre le coût des transformations des mécanismes de propulsion et de stockage nécessaires est la compétitivité du prix de l'hydrogène « propre ». L'H₂ produit à partir d'électrolyse coûte de 8 à 12 fois plus cher que le mazout actuellement utilisé. Si on ajoute les difficultés d'approvisionnement en H₂ vert, qui n'est produit actuellement qu'à petite échelle, et les quantités astronomiques que nécessite la marine marchande, cette solution n'est pas applicable dans un avenir rapproché. De plus, la tentation pour les armateurs d'utiliser de l'H₂ produite à partir de méthane, moins cher, mais beaucoup plus polluant représente un enjeu important. Les armateurs ne se donnent actuellement même pas la peine d'utiliser du pétrole moins polluant que le « bunker » à des fins d'économie, ils sont encore loin d'utiliser l'H₂ vert.

Jusqu'à récemment, le mazout lourd représentait 86% du carburant marin utilisé à l'échelle mondiale, selon l'Organisation maritime internationale (ClearSeas, 2020).

La mondialisation des entreprises et la délocalisation de la production ont entraîné un trafic maritime intense (Bolduc et Ayoub, 2000) et les impacts écologiques directs alarmants de ce trafic sont maintenant bien connus. Les impacts indirects tels l'agrandissement ou la création de nouveaux ports de transbordement (Port Montréal, s.d.; Bastien, 2021) pour supporter l'intensification de ce commerce, parfois implantés dans des milieux naturels et fragiles doivent aussi être pris en compte. L'usage d'H₂ pour propulser les navires n'est pas une solution, il ne s'avère être qu'une fuite en avant.

L'IRENA reconnaît qu'outre les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique des navires, la solution passe aussi par la réduction de l'activité de la marine marchande (IAEA, s.d.). De plus, des plans pour la mise en place d'un fonds de recherche et développement obligatoire pour développer des technologies zéro carbone et le développement d'une taxe carbone pour le transport maritime afin d'accélérer la transition vers des carburants zéro carbone plus chers sont essentiels selon l'IRENA. De même, des réglementations sévères et urgentes doivent forcer les armateurs à utiliser du pétrole de meilleure qualité et produisant moins de polluants.

Une réduction substantielle de la consommation, et donc des marchandises transportées, est la seule clé réellement efficace pour réduire les émissions mondiales de GES. Ainsi les faibles quantités d'H₂ vert produit au Québec ne doivent pas contribuer à l'accroissement de l'échange mondial des marchandises, et nous ne devons pas produire plus d'H₂ vert pour servir cette industrie. Cette dernière, devenue gigantesque et immensément néfaste, fait partie du problème et non de la solution.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De ne pas utiliser l'H₂ vert du Québec pour alimenter les navires de la marine marchande mondiale.**

Transport aérien

Le transport aérien s'intéresse également à l'hydrogène. Si de nombreux projets sont en développement chez les principaux constructeurs (Airbus, Boeing), les vols commerciaux 100 % hydrogène sont probablement encore lointains (Hairy, 2021), peut-être à l'horizon 2035-2040.

La pollution induite par le trafic aérien est importante. La réduction des vols, que ce soit par affaire ou pour des vacances fait déjà partie des recommandations pour réduire cette pollution. Les efforts les plus rentables écologiquement doivent porter en ce sens. Le carburant à l'H₂ pour les avions se réalisera trop loin dans le temps pour y mettre des efforts dès maintenant.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **De ne pas utiliser l'H₂ vert du Québec pour alimenter les avions commerciaux.**

Enjeux de sécurité publique

Les propriétés physico-chimiques de l'hydrogène présentent plusieurs risques qu'il est indispensable de comprendre et

prendre en compte avant d'aller de l'avant avec le développement de cette filière (ADEME, 2015)

- ▶ Propension aux fuites : la molécule d'H₂ est de très petite taille et présente une faible viscosité induisant une probabilité de fuite importante comparativement à d'autres gaz combustibles. Les propriétés de la molécule présentent aussi une grande perméation à travers les matériaux, accentuant encore davantage le risque de fuites;
- ▶ Probabilité d'inflammation plus élevée : même sans flamme ou étincelle, la probabilité d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est très élevée, car l'énergie d'inflammation de la molécule est 10 fois inférieure à celle du propane ou du gaz fossile;
- ▶ Forte diffusité de l'hydrogène dans l'air : ceci réduit les risques d'explosion à l'air libre en cas de fuite dans un milieu non confiné;
- ▶ Combustion plus rapide : l'H₂ brûle 7 fois plus vite que le méthane favorisant la transition d'une déflagration vers une détonation;
- ▶ Flamme très peu visible, mais peu radiative: le cœur de la flamme supérieur à 2000°C est presque invisible en plein jour ce qui présente un danger supplémentaire pour les équipes d'intervention. Toutefois, elle transmet peu d'énergie aux corps étrangers limitant le risque de propagation du feu par effet thermique.
- ▶ Fragilisation de matériaux métalliques : les atomes peuvent avoir tendance à pénétrer certains alliages métalliques, endommageant leur structure et accélérant la propagation des microfissures. Cela peut engendrer des ruptures brutales de ces matériaux.

Considérant les risques évoqués et que ces derniers sont présents à chacune des étapes nécessaires à la filière, production, transport et stockage, nous recommandons :

- Que la production d'hydrogène vert soit décentralisée et se fasse au plus près des industries où il sera utilisé afin de diminuer les risques inhérents à son transport. Cette décentralisation permettra également d'éviter i) d'éventuels risques de corrosion de structures de transport de type gazoduc non conçues préalablement pour le transport d'hydrogène vert et ii) le développement d'un réseau spécifique d'hydrogénoducs qui aurait un impact direct sur la fragmentation des milieux naturels due aux emprises des pipelines.
- Que les premiers intervenants en sécurité publique des territoires où la filière de production s'implantera soient formés aux différents risques qui y sont associés.
- Que les résidents habitant à proximité des installations de production de l'hydrogène vert et des industries l'utilisant soient avertis des dangers et qu'un plan d'intervention soit élaboré et leur soit distribué.

Énergir et l'hydrogène

Dans un objectif de verdissement du gaz, Énergir a demandé à la Régie de l'énergie en novembre 2021 l'autorisation d'évaluer la possibilité d'injecter jusqu'à 50 % d'hydrogène dans son réseau gazier.

Faits établis par le Regroupement des organismes environnementaux en énergie (ROÉE), dont fait partie Nature Québec :

- La concentration en hydrogène à injecter dans les canalisations d'Énergir doit être limitée à une valeur maximale de 10%. Au-delà de cette valeur, des transformations importantes sont nécessaires

pour le réseau de distribution du gaz ainsi que pour les consommateurs pour assurer la sécurité et le bon fonctionnement des équipements. Toutefois, une étude du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) conclut que la capacité du réseau actuel à tolérer de l'hydrogène se situe à la hauteur de 2%.

- La très faible densité de l'hydrogène sera à considérer par Énergir, car le remplacement du méthane par de l'hydrogène sera un problème pour conserver une densité énergétique par mètre cube vendu aux clients. La pression dans les conduites, si elles ne sont pas remplacées, devra être augmentée, ce qui augmentera l'énergie perdue et sera un problème pour les utilisateurs. La régulation sera complètement à refaire.
- L'hydrogène a une vitesse de flamme laminaire bien supérieure à celle du méthane. Le transfert de chaleur entre la flamme et l'enceinte sera modifié par cette différence, ce qui impose des modifications aux brûleurs pour être en mesure de s'adapter au changement de mélange combustible. Des coûts importants pour les utilisateurs peuvent en découler.
- En considérant une concentration énergétique de 10% d'hydrogène dans le mélange, la perte de rendement est de 25%, et se traduit en une perte énergétique annuelle de 1,31 TWh pour Hydro-Québec.
- L'énergie nécessaire pour produire la fraction de 10% d'hydrogène dans le gaz naturel représente 5,5% de toute l'énergie produite par Hydro-Québec.
- La quantité de CO₂ évité par l'ajout d'hydrogène est faible. Pour une fraction de 10%, il y a 1,71 M tonne de CO₂ d'évitée par année sur un bilan provincial total en 2019 de 84 M tonne.
- L'H₂ affecte les métaux, diminue leur résistance et fuit beaucoup plus facilement que le gaz. Comme Énergir vise à utiliser les canalisations actuelles, et non le remplacement de ses canalisations, les coûts de préventions des fuites et d'entretien des canalisations sont très importants.

Selon le ROÉE, cette voie comporte des risques très sérieux pour la sécurité des usagers, relève d'un non-sens économique, en plus d'être complètement inefficace d'un point de vue énergétique (ROÉE, 2021).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **Que Québec renonce à poursuivre le projet d'alimenter le réseau d'Énergir avec de l'H₂ vert produit par électrolyse au Québec**

CORROSION DES TUYAUX, FUITES ET DANGERS

Cette section analyse les interactions hydrogène-métal et souligne les dommages potentiels que l'H₂ produit lorsqu'en contact avec les alliages métalliques, tels que l'acier, l'aluminium ou le titane puisque l'hydrogène impacte les alliages métalliques en les fragilisant.

L'hydrogène, du fait de sa petite taille atomique, peut être facilement absorbé et peut diffuser en profondeur dans un réseau métallique cristallin beaucoup plus facilement que n'importe quel autre atome en solution solide.

Lorsque la source d'hydrogène affecte une microstructure sous contraintes ou présentant des ségrégations, les interactions hydrogène/métal peuvent conduire à la fragilisation du métal et à une fissuration fragile.

L'hydrogène est susceptible de prendre des chemins déviés, des « courts-circuits » de diffusion qui lui permettent de pénétrer plus profondément dans un alliage. Il peut notamment y avoir diffusion le long des joints de grains ou encore à travers les réseaux de dislocations.

L'hydrogène peut affaiblir le métal selon plusieurs mécanismes : l'affaiblissement des liaisons entre atomes, la diminution de la ductilité ou encore la formation de phases fragiles.

La science des matériaux recherche des matériaux plus résistants à la fragilisation par l'hydrogène, mais ce travail est rendu délicat par la difficulté de mesurer ou d'observer l'hydrogène de manière expérimentale et à l'échelle atomique.

La petite taille de la molécule d'hydrogène lui permet de s'échapper à travers des ouvertures de taille extrêmement faible, ce qui accroît le risque de fuite dans les canalisations enfouies et dans les appareils utilisant ce gaz. L'hydrogène est incolore et inodore, et donc difficile à détecter. De plus, l'hydrogène est un gaz hautement explosif. L'énergie requise pour l'enflammer est 10 fois plus faible que pour le gaz naturel. Cette caractéristique rend l'utilisation de l'hydrogène plus risquée (ROÉÉ, 2021).

L'ensemble de ces impacts est important et doit être pris en compte dans les coûts globaux de la production, du stockage et du transport de l'H₂ (Hairy, 2021).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **Que des analyses poussées et chiffrées soient conduites pour évaluer concrètement les coûts des impacts de l'H₂ sur les conduites, réservoirs et autres contenants utilisés dans la chaîne de production-utilisation de l'H₂. Il sera important que ces coûts soient pris en compte dans les cas où l'usage de H₂ est visé plutôt que l'usage de l'énergie électrique directe par batteries.**

FRAGMENTATION DES MILIEUX NATURELS

Les impacts écologiques négatifs attribués à l'industrie du gaz naturel sont nombreux. Un de ceux-ci, et non le moindre, est le passage de conduites de gaz et des chemins d'entretien à travers les forêts, les boisés et les milieux humides (Vanderheyden, 2010), pour rejoindre les diverses communautés, parfois éloignées et les alimenter. Ces conduites et chemins fragilisent et fragmentent les milieux naturels, les appauvrissent et au final ont un impact négatif sur la biodiversité qu'elle abrite.

Le fait d'ajouter quelques pourcentages d'H₂ au gaz naturel crée un faux sentiment de verdissement de cette industrie, mais en réalité, l'impact de l'ajout d'H₂ est très marginal sur les émanations de GES. Toutefois, ce faux verdissement pourrait servir à favoriser l'expansion du réseau gazier au Québec.

Le gaz naturel n'est pas une énergie de transition comme l'industrie le proclame. Le gaz naturel obtenu par fragmentation génère une pollution semblable à celle du charbon. L'ajout d'H₂, même produit par de l'énergie hydroélectrique, est un mirage et ne résiste pas aux analyses sérieuses de réduction des GES produites à ce jour.

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **L'objectif premier que Québec doit se donner est d'être à l'écoute de la science, et viser une réduction progressive, mais agressive de l'utilisation des hydrocarbures, y compris le gaz naturel. L'utilisation de façon directe de l'électricité sans passer par le vecteur H₂ est la voie à suivre.**

RISQUE DE VERROUILLAGE DE L'INDUSTRIE DU GAZ DE FRACTURATION

L'introduction de l'H₂ dans les canalisations de gaz naturel nécessitera des investissements très importants. Les différents rapports du GIEC concernant les changements climatiques confirment que ces derniers sont principalement dus à l'utilisation des hydrocarbures. La tendance mondiale vise donc une réduction de l'usage de ceux-ci, que ce soit le pétrole, le gaz ou le charbon. Si des investissements importants sont faits dans l'optique d'introduire de l'H₂ dans les canalisations de gaz naturel, le besoin de rentabiliser ces investissements en y faisant circuler de grandes quantités de gaz et d'H₂, et en allongeant leur période d'utilisation, entrera en conflit avec nos objectifs de décroissance et d'abandon progressif de la filière gaz, et nous éloigneront ainsi d'une cible de carboneutralité.

Nous sommes donc en face d'une situation où l'ajout de 2% d'H₂ (ROÉÉ, 2021) aura un impact négligeable sur la réduction des GES de la filière gaz, mais nécessitera des investissements importants en fonds publics et en infrastructure pour la production, l'entreposage et le transport d'H₂. En somme, une situation perdant-perdant.

Le "verdissement" du gaz naturel que propose Énergir en y ajoutant de l'H₂ est donc une forme de piège permettant de continuer à distribuer du gaz de fracturation et favorisant principalement cette industrie. L'électrification directe permet d'atteindre de meilleurs rendements énergétiques, coûte moins cher, est plus sécuritaire et, surtout, ne nous emprisonne pas dans une dépendance aux hydrocarbures en cette période d'urgence climatique (ROÉÉ, 2021).

Considérant ces faits, nous recommandons :

- **Que Québec renonce à poursuivre le projet d'alimenter le réseau d'Énergir avec de l'H₂ vert produit par électrolyse au Québec**

« Selon le ROÉÉ, cette voie comporte des risques très sérieux pour la sécurité des usagers, relève d'un non-sens économique, en plus d'être complètement inefficace d'un point de vue énergétique. »

Formation de la main- d'œuvre et transition juste

À l'heure actuelle il n'existe pas de main-d'œuvre qualifiée au Québec dans le domaine.

Considérant ceci, nous recommandons de :

- ▶ S'assurer de développer des programmes de formations dans les établissements d'enseignement proches des lieux où les technologies seront déployées;
- ▶ S'assurer d'un cadre réglementaire pour la formation de la main-d'œuvre relative aux enjeux de sécurité;
- ▶ Prioriser la requalification de la main-d'œuvre des secteurs à haute intensité carbone vers ces filières de décarbonisation.

Hydrogène vert : Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons passé en revue certaine des principales études permettant de déterminer dans quels domaines l'usage d' H_2 produit à partir d'hydrolyse crée un net avantage sur d'autres formes d'énergies. Nous avons aussi déconstruit plusieurs faits vantant les avantages de l' H_2 vert, mais qui en fait ne se révèlent finalement qu'être des solutions qui augmentent les émissions de GES au lieu de participer à leur élimination.

Nous avons vu que l'hydrogène ne produit pas d'énergie par lui-même. Il stocke une énergie qu'il a fallu produire. L'hydrogène sous pression est donc une énergie stockée, que la pile à combustible libère. Les pertes d'énergie induites par le combo production-utilisation de l' H_2 sont suffisamment importantes, jusqu'à 75%, pour que son utilisation ne soit réservée que pour des applications où son usage est indispensable.

L'industrie des engrais utilise de l' H_2 pour produire de l'ammoniac, ingrédient de base des engrais chimiques. Ainsi, dans ce cas, l'usage d' H_2 produit en utilisant de l'hydroélectricité permet de réduire substantiellement les GES si on le compare à l' H_2 obtenu par fracturation de molécules de méthane. Toutefois, ces engrais sont une cause importante de pollution. L'industrie produit maintenant des engrais biologiques conduisant à des récoltes aussi abondantes que celles produites par engrais chimiques, mais sans les effets néfastes de pollution de ces dernières. Sachant cela, il y a lieu de se demander s'il n'est pas plus intéressant de suivre la voie biologique plutôt que d'investir dans des infrastructures d'hydrolyse coûteuses, et qui dans ce cas, génèrent des pollutions importantes qui vont jusqu'à menacer la vie dans les cours d'eau.

Divers types d'industries voient dans l' H_2 un combustible permettant de remplacer le gaz naturel pour obtenir les températures élevées nécessaires à leur processus de transformation de la matière. Des recherches récentes et en cours démontrent toutefois que l'usage de l'électricité directe pour la production de plasma permet d'obtenir ces

températures élevées sans les pertes d'énergies inhérentes à la production et utilisation de l' H_2 .

De même, l' H_2 peut certes produire l'énergie nécessaire au fonctionnement des véhicules automobiles, qu'ils soient camions lourds et légers, bus ou autre. Toutefois, les pertes inévitables d'énergie liées à l'utilisation de l' H_2 font que l'usage de batterie pour ces mêmes véhicules permet d'en faire rouler jusqu'à 3 fois plus avec la même quantité de KWh.

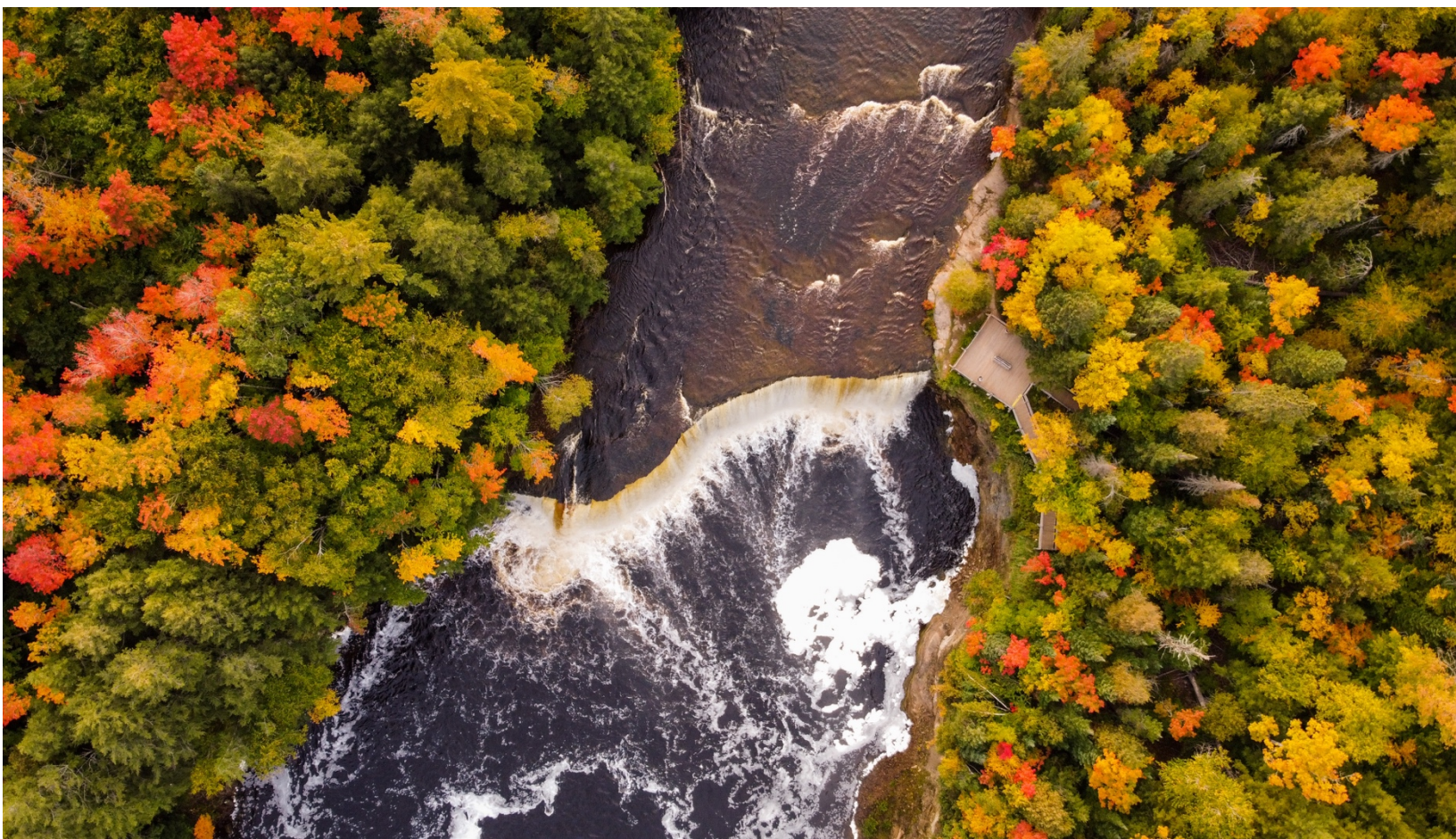
Il ne faut pas négliger le fait que la production d' H_2 est extrêmement dispendieuse. Si dispendieuse en fait, qu'elle ne s'approche pas d'une quelconque rentabilité économique, de sorte que le privé doit faire lourdement appel aux fonds publics pour le développement de la filière. Selon diverses sources, l'investissement en capital nécessaire pour permettre la transition vers une économie de l'hydrogène se chiffre en milliers de milliards de dollars. Nous croyons que ces fonds publics seraient beaucoup plus bénéfiques à l'ensemble de la population si elles sont investies dans l'électrification directe des processus.

Les investissements publics importants qui sont nécessaires pour produire l' H_2 vert pourraient plutôt avantageusement servir à financer l'efficacité énergétique. La population et l'industrie hésitent à investir dans l'efficacité énergétique parce que ces investissements prennent souvent beaucoup de temps avant de s'avérer rentables. Pourtant, collectivement et écologiquement, les "négawatts" sont extrêmement rentables.

La consommation d'électricité augmentera de façon très significative au Québec dans un avenir rapproché parce qu'un grand nombre de processus industriels transitent du gaz naturel à l'électricité. De plus, la forte demande en électricité durant les heures de pointe est déjà un enjeu important pour le réseau électrique québécois. Il importe donc de rentabiliser au maximum écologiquement chaque kilowattheure produit. Le Québec compte bien sûr encore quelques rivières à harnacher et bien d'autres portions de territoire à couvrir d'éoliennes afin de produire davantage de KWh, mais la population voit maintenant de plus en plus les bienfaits de la présence de milieux naturels et de rivières vierges. Il importe donc de rentabiliser écologiquement les installations déjà en place afin de conserver un équilibre "nature vs énergie" permettant de satisfaire le plus grand nombre.

Conscient et très sensible aux immenses bienfaits que des milieux naturels apportent à la santé physique et mentale de la population du Québec, Nature Québec travaille activement depuis plus de 40 ans à leur préservation et à leur mise en valeur. La production d'énergie électrique est un enjeu au Québec puisqu'elle a, entre autres, un impact direct sur la qualité des milieux naturels. Il importe donc d'en analyser minutieusement chaque usage afin de le rentabiliser écologiquement. En ce sens, **l'hydrogène vert constitue un mirage dont le Québec doit se détourner rapidement parce qu'il réunit toutes les conditions pour mettre en péril d'autres usages essentiels de l'électricité.**

« Il ne faut pas négliger le fait que la production d'H₂ est extrêmement dispendieuse. Si dispendieuse en fait, qu'elle ne s'approche pas d'une quelconque rentabilité économique, de sorte que le privé doit faire lourdement appel aux fonds publics pour le développement de la filière. »



Section 2 : Bioénergies

Matières premières

Chaque type de biomasse doit être utilisé d'une manière intelligente pour avoir un meilleur rendement. L'efficacité de conversion de la biomasse en une forme d'énergie utilisable dépend de la technologie utilisée et du produit final (Paré, Bernier, Thiffault, Titus, 2011). La question qu'on se pose: quel type de biomasse est le meilleur pour quel type de potentiel énergétique?

BIOMASSE FORESTIÈRE

La biomasse forestière résiduelle est l'ensemble des déchets laissés sur le sol ou en marge des chemins par l'industrie forestière ainsi que les résidus de l'industrie de la transformation du bois qui n'ont aucune valeur commerciale. Cette ressource est abondante et disponible au Québec. Selon la Fédération des producteurs forestiers du Québec, la biomasse disponible dans les cimes des arbres récoltables seulement en forêt privée est estimée à 3,2 millions de tonnes métriques anhydres. En ce qui concerne la disponibilité de la biomasse forestière dans les forêts publiques, elle est estimée à 4,5 millions de tonnes pouvant être récupérées (Castonguay, 2016). En tout, la quantité de biomasse forestière au Québec est de 7,7 millions de tonnes anhydres, d'après la Terre de chez nous, mais toute la biomasse disponible n'est pas récupérable. C'est en Mauricie, en Outaouais et au Nord-du-Québec que les volumes disponibles sont les plus élevés. Dans les deux premières régions, aucun permis de récolte de la biomasse forestière résiduelle n'a encore été octroyé, tout comme c'est le cas dans les régions de la Capitale-Nationale, de l'Estrie, de la Côte-Nord et de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine. C'est en Abitibi-Témiscamingue (62,7 %) et au Saguenay-Lac-Saint-Jean (26,4 %) que la proportion de la biomasse forestière résiduelle attribuable est la plus largement récupérée.

La biomasse forestière résiduelle se trouve, après traitement et conditionnement, sous forme de plaquettes, de granules ou de bûches. La combustion directe de ce type de biomasse permet de produire séparément de la chaleur

et de l'électricité ou les deux simultanément, ce qui est appelé la cogénération. Le processus de conversion de la biomasse forestière en énergie par combustion directe est très court, ce qui réduit les pertes d'énergie et permet d'avoir un rendement très intéressant allant jusqu'à 85 %.

Plusieurs recherches démontrent que cette technologie reste la meilleure façon pour convertir la biomasse forestière et combler les besoins en énergie thermique (chauffage ou cogénération) du Québec (MRNF & CRIQ, 2011, p.129). Malgré la maturité de la technologie et son développement en Europe, au Québec la filière de la biomasse forestière rencontre plusieurs problèmes qui l'empêchent de se développer:

- ▶ Aucune normalisation et certification des produits (idem): différentes qualités du combustible d'un fournisseur à un autre (taux d'humidité, granulométrie)
- ▶ Plusieurs entraves techniques et un manque de compétences des fournisseurs
- ▶ Manque d'assistance et de suivis après implantation des installations (souvent le consommateur se retrouve seul face aux multiples problèmes qui surviennent après l'installation)
- ▶ Manque de connaissances et de formations techniques
- ▶ Des consommateurs méfiants à cause des multiples lacunes.

L'utilisation de la biomasse forestière pour la production d'autres types de biocarburants (autre que la biomasse solide) doit démontrer une bonne faisabilité technique, économique, énergétique et écologique. Des recherches sérieuses doivent se faire afin de mener une analyse complète du cycle de vie de tout produit.

BIOMASSE AGRICOLE

Lorsqu'on parle de la biomasse agricole, on pense tout de suite à la production d'éthanol à partir de culture massive de maïs et de céréales. Ce sujet a fait couler déjà beaucoup d'encre depuis que le gouvernement a décidé d'introduire 5 % d'éthanol dans l'essence en 2010, ce qui représentait la réduction de seulement 0,2 % des émissions de GES (Guilbeault, Sarier & Drizi, 2007). Le scénario de l'éthanol

ne s'arrête pas à 5 %, car le gouvernement pense que si on augmente la quantité d'éthanol dans l'essence de 10 à 15 %, cela pourrait aider à atteindre les objectifs climatiques de réduction des GES. Si on se base sur les données des années précédentes, l'introduction de ces quantités d'éthanol dans l'essence aiderait seulement à réduire entre 0,4 à 0,6 % des émissions de GES.

Afin de pouvoir juger un produit ou une technologie et valider sa pertinence et son efficacité, il faut faire une analyse sérieuse du cycle de vie, ainsi que tenir compte d'études du bilan énergétique, écologique et économique. Le concept de cycle de vie est une approche systémique du début à la fin pour réfléchir à la technologie. Ce concept repose sur la reconnaissance du fait que toutes les étapes du cycle de vie (acquisition des matières premières, fabrication, transformation et formulation, transport et distribution, utilisation, réutilisation et entretien, recyclage et gestion des déchets) ainsi que toutes les phases du cycle de vie (préexploitation, exploitation et post-exploitation) ont des répercussions économiques, environnementales et énergétiques (Puppan, 2002). La compréhension de toutes les étapes et phases du cycle de vie permet de mieux appréhender les conséquences des choix technologiques. Si l'on ne tient pas compte des concepts du cycle de vie, on risque de négliger des répercussions négatives imprévues.

Plus précisément, le concept de cycle de vie est basé sur la reconnaissance des éléments suivants :

- ▶ Une perspective du début à la fin de vie du produit est importante pour toute évaluation. Des perspectives plus spécifiques au site, "en bout de chaîne", "à l'intérieur de l'usine" ou "en fin de vie du produit" peuvent être limitatives, car elles ne reconnaissent pas la gamme complète des implications en amont et en aval des actions spécifiques au site.
- ▶ Pour toute technologie (produit, service ou activité), des demandes de matériaux, d'énergie, de travail et d'argent sont imposées aux matières premières, l'acquisition des matières premières, la fabrication, le traitement, la formulation, le transport, la distribution, l'utilisation, la réutilisation, l'entretien, le recyclage et la gestion des déchets sur le pays et dans le monde entier. De plus, chacun de ces processus peut avoir des impacts indirects sur l'économie, l'environnement et l'énergie.
- ▶ Les dimensions temporelles et spatiales des impacts économiques, environnementaux et énergétiques doivent être prises en compte.
- ▶ Un concept intrinsèquement intégratif, tel que le concept de cycle de vie, est le meilleur moyen de

permettre l'évaluation des impacts économiques, environnementaux et énergétiques (Puppan, 2002).

La production des biocarburants de 1^{re} génération aurait des impacts considérables sur plusieurs secteurs. Dans son analyse d'impact réglementaire, le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles met en garde sur les problèmes qui peuvent survenir au développement de cette filière:

« L'application de cette réglementation pourrait également avoir des impacts sur les secteurs agricole et forestier en raison d'une demande accrue en carburants renouvelables produits à partir de biomasses agricoles (produits agricoles et résidus) et forestières au Québec. Cette réglementation pourrait notamment engendrer une augmentation de la production de maïs grain sur le territoire agricole québécois au détriment d'autres cultures. Cette production, lorsqu'elle n'est pas encadrée sur le plan agronomique, peut causer la dégradation des sols par l'appauvrissement du taux de matière organique (retrait des résidus de culture), l'augmentation de l'utilisation d'engrais minéraux azotés et de pesticides et, par conséquent, une détérioration de la qualité de l'eau et de la biodiversité, ainsi que l'émission plus importante de GES, notamment le protoxyde d'azote. En outre, l'utilisation de grands volumes de maïs-grain traditionnellement utilisé pour l'alimentation animale à des fins de production de carburants renouvelables pourrait occasionner une augmentation des coûts de l'alimentation des élevages pour environ 12 000 entreprises agricoles. Ce chiffre inclut notamment 5 742 exploitations laitières, 1 546 fermes porcines, 3400 fermes d'élevage de bovins et de veaux de boucherie et 650 productions de poulets et dindons. » (MERN, 2019)

Il faut prendre ces risques au sérieux et faire une analyse d'impact complète comme stipulé ci-haut.

Prix des matières premières et agricoles

L'effet entraîné par la fabrication d'éthanol sur le prix des grains et oléagineux, s'il se traduit positivement pour les producteurs de grandes cultures, ne produit pas le même effet chez les éleveurs. Ces derniers, qui dépendent du maïs et des autres céréales pour alimenter leur bétail, voient leurs coûts de production augmenter sans nécessairement pouvoir récupérer cette augmentation par la suite. Le coût de l'alimentation animale augmente puisque l'impact se fait ressentir sur le prix de l'ensemble des grains. À terme, l'augmentation du prix des grains risque également de faire augmenter les prix à la consommation des denrées alimentaires fabriquées à base de céréales et, bien entendu, ceux des viandes. La

demande de produits agricoles de base pour la production de biocarburants constitue donc un changement majeur par rapport à la situation qui prévalait sur ces marchés antérieurement (CRAAQ, 2008).

Bilan écologique de la production et la consommation de l'éthanol

Pour avoir un biocarburant liquide prêt à l'emploi, il faut passer par plusieurs transformations chimiques et physiques de la matière, le processus commence à partir de la production des fertilisants jusqu'à la conversion du biocarburant en énergie dans le moteur. Tout au long de ce processus, une consommation en énergie fossile est nécessaire pour la production des engrais, des grains, la machinerie agricole, le transport, le séchage des grains, la transformation des grains pendant la fermentation, etc. La rentabilité de cette filière fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques. Il a été démontré à maintes reprises que la consommation en énergie fossile tout au long de ce processus est 29 % supérieure à l'énergie contenue dans l'éthanol (Chavanne et Frangi, 2008; Shonkwiler, 2012). En d'autres mots, pour produire une quantité d'énergie équivalente d'éthanol, il faut utiliser 29 % plus d'énergie fossile. Si on ajoute à cela les propriétés énergétiques de l'éthanol, le bilan énergétique est encore plus négatif. D'après l'analyse de Bruno Detuncq du Regroupement vigilance hydrocarbures Québec et ancien professeur de l'École Polytechnique de Montréal : « Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) [de l'éthanol] est de 26 980 kJ/kg, tandis que celui de l'essence est d'environ 42 700 kJ/kg, soit une baisse de 37 % du PCI de l'éthanol par rapport à l'essence. La conséquence est que pour parcourir une distance de 100 km, il faut plus de carburant contenant de l'éthanol que si on utilisait une essence sans éthanol. Donc sur un trajet de 1000 km, il sera nécessaire de faire le plein plus souvent. Au total, il n'y a pas ou peu de réduction de GES émis. Ce qui est important ce n'est pas la production de CO₂ par litre, mais la production de CO₂ par kilomètre parcouru. » (Detuncq, 2021)

Disponibilité des terres agricoles

Sur l'ensemble du territoire québécois (1,668 million km²), seulement 2 % (AlloProf, s.d.) des terres sont agricoles, dû à la nature nordique de la province. Les terres les plus fertiles du Québec se situent majoritairement sur les rives du Saint-Laurent. L'ensemble de ces terres est réparti comme suit (FADQ, 2013):

- ▶ 824 000 ha en cultures fourragères
- ▶ **402 000 ha en maïs-grain**
- ▶ 277 000 ha en soja
- ▶ Le restant des terres (5 %) est dédié aux cultures fruitières et légumières ainsi qu'aux arbres de

Noël, aux pépinières, aux serres et à la culture de gazon

Une tonne de grains permet de produire entre 350 et 450 litres d'éthanol, entre 300 et 325 kg de drêches et 350 kg de dioxyde de carbone. Avec un hectare de maïs (9 t/ha), on peut donc produire plus ou moins 3 600 litres d'éthanol (CRAAQ, 2008). Entre 2010 et 2019, le nombre d'essenceries est passé de 2 985 à 2 821, soit une baisse de 5,49 %, et le volume annuel de ventes est passé de 8 585 ML à 9 103 ML, soit une hausse de 6,03 % (Régie de l'énergie du Québec, 2020). Un mélange d'essence contenant 15 % d'éthanol correspond à 1365,45 millions de litres de biocarburant (Riopel, 2021). En se basant sur ces données, il faut 379 292 ha des terres consacrées à la culture du maïs-grain si la demande et la quantité d'essence restent la même. Donc la plupart des terres dédiées au maïs-grain au Québec seraient consacrées à la production énergétique afin de répondre aux objectifs proposés. Le restant des terres serait-il suffisant afin de répondre aux besoins alimentaires du Québec? Avec la croissance démographique et technologique, la demande énergétique est toujours en hausse, ce qui impliquerait une hausse éventuelle de la demande en éthanol.

BIOMASSE MUNICIPALE OU URBAINE

Par définition ce type de biomasse représente les boues des stations d'épuration des eaux usées municipales et les déchets organiques putrescibles provenant des secteurs résidentiel, municipal, commercial et institutionnel. D'après les statistiques d'Hydro-Québec, la quantité de biomasse urbaine disponible sous forme de boues de stations d'épuration des eaux usées municipales est de 223 796 tonnes métriques sèches par an et la quantité des résidus domestiques putrescibles disponible est de 669 665 tonnes métriques sèches par an (Hydro-Québec, 2014). Au total, la disponibilité de la biomasse urbaine est de seulement 893 461 tonnes métriques sèches par an. L'utilisation et la valorisation énergétique de ces déchets sont une bonne alternative pour la production de biocarburant de 2e génération. Contrairement à la 1re génération cette dernière n'est pas en concurrence avec la production alimentaire et ne causera pas des problèmes à long et à court terme. Bien que la technologie se trouve à un niveau de maturité moins avancé, elle est considérée comme offrant de meilleurs rendements énergétiques que la première génération, en plus de ne pas entrer en conflit avec la chaîne alimentaire. Elles sont, par conséquent, les voies actuellement privilégiées par la recherche. Les biocarburants qui en résultent peuvent être du bioéthanol, du biodiesel, du biobutanol ou du biométhane.

Une technologie en instance de brevet d'Enerkem est un procédé de chimie verte (gazéification) qui permet à l'entreprise de produire un biocarburant de deuxième génération en deux étapes. Dans un premier temps, le carbone contenu dans les matières résiduelles est recyclé chimiquement pour produire un gaz synthétique pur appelé syngaz. Ce dernier est principalement constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Dans une seconde étape, à l'aide de catalyseurs, le gaz épuré est transformé en biocarburant liquide. En moins de cinq minutes, les déchets destinés à l'enfouissement deviennent des carburants propres pour le transport ou des produits chimiques renouvelables à valeur ajoutée. Le biocarburant d'Enerkem a l'avantage d'être non toxique, soluble dans l'eau et facilement biodégradable. Une autre caractéristique de la technologie d'Enerkem est son faible coût de production par rapport à d'autres méthodes telles que l'enfouissement, qui nécessitent des investissements plus importants. Elle est fabriquée à partir de matières premières de faible valeur, nécessite une énergie de faible intensité (température, pression et électricité) et emploie des équipements de haute technologie. Dans le cadre d'un processus de développement technologique rigoureux, l'innovation a été développée, testée et validée dans une installation pilote et une usine de démonstration d'Enerkem en Estonie et est maintenant mise en œuvre à l'échelle commerciale à Edmonton, en Alberta. Outre l'éthanol, le procédé Enerkem peut également produire du bioéthanol, qui est un élément clé dans la production d'une variété de produits chimiques renouvelables tels que les solvants, les bioplastiques et les textiles (Innovation Développement MTL, 2017). Le développement et la croissance des technologies de biocarburant de 2^e génération reposent sur la recherche scientifique. Des avancées prometteuses se profilent à l'horizon au Québec et tous les efforts doivent y être concentrés.

Pertinence de conversion

RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

Le rendement énergétique est un point essentiel dans chaque conversion. Si le processus de conversion passe par plusieurs étapes, à chaque étape, il y a des pertes, ce qui diminue le rendement final. Quand on parle de pertes énergétiques, on parle aussi de pertes monétaires. Étant donné que chaque transformation menant à la fabrication de biocarburants comporte des pertes d'énergie importantes (et des coûts supplémentaires), il n'est pas pertinent que la biomasse forestière soit utilisée au Québec

puisque cette matière brute peut être utilisée directement à des fins de chauffage, impliquant moins de transformations et donc un meilleur rendement énergétique. Son usage dans le secteur des bioénergies ne servirait, dans ce cas, qu'à « cannibaliser » un usage plus efficace de la ressource de base.

COÛTS ÉNERGÉTIQUES

Si les coûts de production de biocarburants sont élevés, les coûts de consommation seront aussi élevés. Les consommateurs doivent s'attendre à des augmentations dans leurs différentes factures et non uniquement le prix des combustibles. De plus, les coûts d'exploitation diffèrent d'une technologie à une autre.

Applications

ÉLECTRICITÉ ET CHAUFFAGE

Les bioénergies devraient être utilisées pour des applications qui ne peuvent pas être électrifiées ou qui ne sont pas compatibles avec une source d'énergie plus performante. Ainsi, les bioénergies ne sont pas pertinentes pour le chauffage, car la biomasse forestière brute a un meilleur rendement énergétique et est donc plus performante. De plus, utiliser les bioénergies pour créer de l'électricité est un non-sens puisqu'au Québec nous avons un accès privilégié à l'hydroélectricité qui a, elle aussi, un bien meilleur rendement.

EXPORTATION

Avec une production limitée des biocarburants de première génération, le Québec peut à peine répondre à une petite partie de ses besoins en biocarburant, de ce fait l'exportation de cette énergie liquide n'est pas envisageable prochainement. Par contre, le développement technologique de cette industrie peut réserver une meilleure place mondiale pour le Québec dans ce domaine. Plusieurs entreprises et programmes de recherches se lancent essentiellement dans le développement d'équipements à la fine pointe de la technologie afin de valoriser des déchets et des sous-produits d'aucune valeur ajoutée pour la production de biocarburants et de bioproduits. Ce savoir-faire permettra au Québec de tailler sa place parmi les grands joueurs, mais cette course technologique ne doit pas se faire au détriment de l'environnement et de la durabilité de l'industrie.

Besoins en recherche

Le besoin en recherche se fait sentir particulièrement dans des études d'impacts et d'analyses du cycle de vie des technologies liées aux biocarburants. Malgré les efforts des universités et des établissements de recherches dans ce domaine, on ne trouve que des hypothèses et les données utilisées proviennent souvent d'autres pays, alors que les conditions diffèrent d'un pays l'autre. Comme mentionné ci-haut, des recherches sérieuses et des analyses de cycle de vie doivent être faites sur les bioénergies et sur la capacité des terres agricoles et forestières à répondre à ces nouveaux usages potentiels sans mettre en péril les usages actuels.



Bioénergies : Conclusion

Dans ce mémoire, les différentes matières premières pouvant devenir des intrants au processus de fabrication de bioénergies ont été évaluées selon leur durabilité et impact. La pertinence des applications proposées a aussi été remise en question puis les lacunes au niveau de la recherche liée à cette filière ont été soulevées.

La biomasse forestière résiduelle est abondante au Québec et la valorisation énergétique et écologique de cette ressource dans une perspective de développement durable et économique peut apporter des bénéfices importants, comme atteindre nos objectifs climatiques et développer l'économie régionale. Par contre, son application la plus pertinente demeure le chauffage direct et non son usage comme intrant au processus de fabrication de biocarburants.

La production des biocarburants de **1re génération** implique l'utilisation massive des terres agricoles pour la production d'énergie au détriment de la production alimentaire, ce qui engendrerait plusieurs problèmes à court et à long terme. L'utilisation massive des terres pour la production du maïs entraînerait:

- ▶ L'utilisation à grande échelle d'engrais et de pesticides qui polluent le sol et les eaux souterraines
- ▶ La destruction des milieux naturels et des écosystèmes environnant ces cultures

- ▶ La croissance de la demande en plantes destinées à la production d'énergie, ce qui mènerait à une croissance de la monoculture
- ▶ Une consommation importante de carburant fossile dans tout le processus de production des biocombustibles (de la production d'engrais destinés aux cultures du maïs passant par les opérations sur le terrain jusqu'au séchage des grains et le broyage, etc.)

La production des biocarburants et bioproduits de **2^e génération** peut s'avérer une alternative prometteuse pour fabriquer une certaine quantité de biocarburant. Cette filière avance dans la bonne direction, mais le tout doit être réalisé à la suite de et en accord avec des études et recherches adéquates.

L'énergie ayant le moins d'impact néfaste pour la planète restera toujours celle qu'on ne produit pas, il s'agit également de la moins coûteuse. Avant tout ajout ou substitution énergétique, il est donc primordial de prioriser la réduction à la source, la décroissance et l'efficacité énergétique. Il est très important d'adopter des solutions collectives réalistes afin d'atteindre nos objectifs climatiques.

« L'énergie ayant le moins d'impact néfaste pour la planète restera toujours celle qu'on ne produit pas, il s'agit également de la moins coûteuse. »

Références

- ▶ **ADEME. 2015:** *Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène*. Agence de la transition écologique.
<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-information-securite-production-decentralise-hydrogene-8505.pdf>
- ▶ **AIR LIQUIDE. s.d.** : *Ses applications*. Air Liquide. <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/applications-lhydrogene>
- ▶ **ALLOPROF. s.d.** : *Le territoire agricole du Québec*. AlloProf. <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/geographie/le-territoire-agricole-du-quebec-g1047>
- ▶ **ALOUETTE. 2020** : *Aluminerie Alouette bénéficiera de gaz naturel liquéfié*. Alouette.
<https://www.alouette.com/medias/communiques?id=2428&pg=0>
- ▶ **ALUMINIUM FRANCE. s.d.** : *Production et transformation*. Aluminium France.
<https://www.aluminium.fr/production-et-transformation/>
- ▶ **ATTRIX. 2021** : *Les bus électrique : plus qu'un simple arrêt sur la route de l'électrification*. Attrix.
<https://attrix.ca/fr/blog/les-bus-electriques-plus-quun-simple-arret-sur-la-route-de-lelectrification/>
- ▶ **BAILLARGEON, Stéphane. 2021** : *Au Québec gît l'énergie*. Le Devoir.
<https://www.ledevoir.com/societe/consommation/656058/un-monde-serie-un-monde-cheap-ci-git-l-energie>
- ▶ **BASTIEN, Daniel. 2021** : *Port de Montréal à Contrecoeur : une pétition pour demander une évaluation du BAPE*. La Relève. <https://www.lareleve.qc.ca/2021/10/01/port-de-montreal-a-contrecoeur-une-petition-pour-demander-une-evaluation-du-bape/>
- ▶ **BODINEAU, Luc et SACHER, Pierre. 2020** : *Rendement de la chaîne hydrogène*. ADEME.
<https://bibliaire.ademe.fr/mobilite-et-transport/1685-rendement-de-la-chaîne-hydrogene.html>
- ▶ **BOLDUC, David et AYOUB, Antoine. 2000** : *La mondialisation et ses effets : revue de la littérature*. Université Laval.
https://www.cms.fss.ulaval.ca/recherche/upload/antoine_ayoub/fichiers/2000-11_La_mondialisation_et_ses_effets.pdf
- ▶ **BOMPOLA, Heritier N. 2019** : *Amélioration de l'efficacité énergétique des navires*. Mémoire. Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Département de mathématiques, informatique et génie, 168 p.
- ▶ **CASTONGUAY, Alain. 2016**: *La biomasse est disponible, mais des contraintes subsistent*. La Terre de chez nous.
<https://www.laterre.ca/utiliterre/biomasse-disponible-contraintes-subsistent>
- ▶ **CHAVANNE, Xavier et FRANGI, Jean-Pierre. 2008** : *Le rendement énergétique de la production d'éthanol à partir de maïs*. Comptes Rendus Geoscience 340 (5), p. 263-287.
- ▶ **CLEARSEAS. 2020**: *Carburants marins: qu'est-ce que le mazout lourd?* ClearSeas.
<https://clearseas.org/fr/blogue/carburants-marins-quest-ce-que-le-mazout-lourd/>
- ▶ **CRAAQ. 2008** : *La production d'éthanol à partir de grains de maïs et de céréales*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. <https://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC029.pdf>
- ▶ **DABLANC, Laetitia; GONZÁLEZ-FELIU, Jesús et VILLE, Sandrine. 2010** : « L'organisation du transport des marchandises en ville : jusqu'où les politiques municipales peuvent-elles juridiquement aller ? Le cas de Vicence (Italie) et les leçons à retenir pour les villes européennes », *Politiques et management public* 27(4)
<http://journals.openedition.org/pmp/2861>
- ▶ **DAMGÉ, Mathilde. 2018** : *Un cargo pollue-t-il autant que toutes les voitures françaises ?* Le Monde.
https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/11/14/un-cargo-pollue-t-il-autant-que-toutes-les-voitures-francaises_5383604_4355770.html
- ▶ **DELUZARCHE, Céline. 2018** : *Cette startup veut remplacer les engrais chimiques par des probiotiques*. Futura-Sciences. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/fertilisation-cette-startup-veut-remplacer-engrais-chimiques-probiotiques-48070/>
- ▶ **DETUNCQ, Bruno. 2021** : *Règlement du Québec concernant les combustibles à faible intensité carbone : Courte analyse de la situation*. Regroupement vigilance hydrocarbures Québec.
- ▶ **DIOT, Stéphane. 2021** : *L'hydrogène vert pour la mobilité lourde : Une bouffée d'air frais!* Hydrolux.
<https://hydrolux.ca/lhydrogene-vert-pour-la-mobilite-lourde-une-bouffee-dair-frais/>
- ▶ **FADQ. 2013** : *Valeur des terres agricoles dans les régions du Québec*. La Financière agricole du Québec.
<https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/bulletins/valeur-terres-agricoles-2013.pdf>

- ▶ **FICHES-AUTO. 2020:** *La voiture à hydrogène est-elle viable ?* Fiches-auto. <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/hydrogene/s-2361-la-voiture-a-hydrogene-est-elle-viable-.php>
- ▶ **GAMACHE, Valérie. 2021 :** *Hydrogène vert : le Québec ne veut pas rater son coup.* Radio-Canada. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1844495/hydrogene-electricite-strategie-jomathan-julien>
- ▶ **GASSER, Marc-Olivier. 2019 :** *Abandonner aujourd'hui les engrais chimiques est-il possible?* Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. <https://www.irda.qc.ca/fr/nouvelles-et-evenements/abolir-engrais-possible/>
- ▶ **GAUTHIER, Antoine. 2021 :** *Des chercheurs produisent de l'hydrogène à partir de restes d'aluminium.* Journal du Geek. <https://www.journaldugeek.com/2021/08/18/des-chercheurs-produisent-de-lhydrogene-a-partir-de-restes-daluminium/>
- ▶ **GAUTHIER, Philippe. 2018:** *Réduire les émissions de GES liées à la production du ciment.* Énergie et environnement. <https://energieetenvironnement.com/2018/12/01/reduire-les-emissions-de-ges-liees-a-la-production-du-ciment/>
- ▶ **GOLDER ASSOCIÉS. 2016 :** *Étude sur les GES évités par le transport collectif.* Société de transport de Montréal. <https://www.stm.info/fr/a-propos/informations-entreprise-et-financieres/developpement-durable/etude-sur-les-ges-evites-par>
- ▶ **GOVERNEMENT DU QUÉBEC. 2021 :** *Plan pour une économie verte 2030.* Gouvernement du Québec. <https://www.quebec.ca/gouv/politiques-orientations/plan-economie-verte>
- ▶ **GOVERNEMENT DU QUÉBEC. 2021.** *Consultation sur l'hydrogène vert et les bioénergies.* Gouvernement du Québec. [https://consultation.quebec.ca/processes/strategie-hydrogene-vert-bioenergies?locale=fr#:~:text=La%20consultation%20se%20d%C3%A9roule%20du,de%20discussion%20\(sur%20invitation\)%3B](https://consultation.quebec.ca/processes/strategie-hydrogene-vert-bioenergies?locale=fr#:~:text=La%20consultation%20se%20d%C3%A9roule%20du,de%20discussion%20(sur%20invitation)%3B)
- ▶ **GUILBEAULT, Steven; SARIER, Éric et DRIZI, Habiba. 2007:** *Nourrir le monde ou les autos : L'avenir des bioénergies au Québec.* Greenpeace. <http://caaaq.gouv.qc.ca/userfiles/File/Memoire%20Laurentides-Montreal%20special/15-29-L-Greenpeace.pdf>
- ▶ **HAIRY, Patrick. 2021 :** *La fragilisation par l'hydrogène des métaux.* Metal Blog. <https://metalblog.ctif.com/2021/01/04/la-fragilisation-par-lhydrogene-des-metaux/>
- ▶ **HOWARD, Janet; WHITBY, Scott & WINTER, Guy. 2021:** *L'hydrogène dans la transition énergétique : cette fois, c'est différent.* Fasken. <https://www.fasken.com/fr/knowledge/2021/06/14-hydrogen-in-the-energy-transition-this-time-is-different>
- ▶ **HYDRO-QUÉBEC. 2014 :** *Filière d'énergie renouvelable : l'énergie de la biomasse.* Hydro-Québec. <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/fiche-biomasse.pdf>
- ▶ **IAEA. s.d. :** *Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA).* IAEA. <https://www.iaea.org/fr/laiea/agence-internationale-pour-les-energies-renouvelables-irena>
- ▶ **Innovation Développement MTL. 2017 :** *Des biocarburants de nouvelle génération émergent à Montréal.* Ville de Montréal. <https://ville.montreal.qc.ca/idmtl/des-biocarburants-de-nouvelle-generation-emergent-a-montreal/>
- ▶ **IRENA. 2020:** *Green Hydrogen, A Guide to Policy Making.* International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf
- ▶ **JORMOT, Julien. 2018 :** *L'hydrogène peut-il révolutionner le transport maritime?* Les smart grids. <https://les-smartgrids.fr/hydrogene-revolutionner-transport-maritime/>
- ▶ **KURMAYER, Nikolaus J. 2021:** *Scientists warn against global warming effect of hydrogen leaks.* Euractiv. <https://www.euractiv.com/section/energy/news/scientists-warn-against-global-warming-effect-of-hydrogen-leaks/>
- ▶ **LACROIX, Marcel. s.d.:** *Hydrogène.* Université de Sherbrooke. <http://marcellacroix.espaceweb.usherbrooke.ca/ENERGIE/HYDROGENE.pdf>
- ▶ **LECAVALIER, Charles. 2020 :** *Où sont passés nos surplus d'électricité?* Le Journal de Québec. <https://www.journaldequebec.com/2020/12/06/ou-sont-passees-nos-surplus-deelectricite>
- ▶ **LEMELIN, Richard. 2019:** *Électrification du Québec : des objectifs de réduction de pétrole et de GES réalisables?* Roulez électrique. <https://roulezelectrique.com/electrification-du-quebec-des-objectifs-de-reduction-de-petrole-et-de-ges-realisables/>
- ▶ **LION. s.d.:** *Le choix brillant.* Lion. <https://thelionelectric.com/fr>
- ▶ **LIVET, Frédéric. 2021:** *Coût de la tonne de carbone évitée en remplaçant des bus diesel urbains, Comparer solutions hydrogène et batteries : Exemple de Dijon.* INIS 52 (35). <https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=52083531>

- ▶ **MAIGNIEN, Aude. 2018** : *Le transport scolaire, comment ça marche?* Immigrant Québec. <https://immigrantquebec.com/fr/actualites/conseils-d-experts/le-transport-scolaire-comment-ca-marche>
- ▶ **MCKENNA, Alain. 2019**. *E-Taxi: 2000 taxis électriques chinois en route vers Montréal*. La Presse. https://plus.lapresse.ca/screens/07a52b84-7e07-480e-9cef-d43dd5fbfcab__7C__0.html
- ▶ **MERCURE, Philippe. 2021** : *Avant de tout miser sur l'hydrogène vert*. La Presse. <https://www.lapresse.ca/contexte/editoriaux/2021-11-28/avant-de-tout-miser-sur-l-hydrogene-vert.php>
- ▶ **MERN. 2019** : *Analyse d'impact réglementaire : Projet de règlement concernant le volume minimal de carburant renouvelable dans l'essence et le carburant diesel*. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/energie-ressources-naturelles/publications-adm/lois-reglements/allegement/AIR_Projet__reglement_volume_carburant_MERN.pdf?1570737693
- ▶ **MÉTIERS QUÉBEC. 2015** : *Portrait de l'industrie du transport*. Métiers Québec. <https://www.metiers-quebec.org/portraits/transport2.htm>
- ▶ **MINISTÈRE DES TRANSPORTS. 2018** : *Portrait statistique et économique : Le camionnage au Québec*. Ministère des Transports. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/statistiques/Documents/portrait-statistique.pdf>
- ▶ **MINISTÈRE DES TRANSPORTS. s.d.** : *Programme d'électrification du transport scolaire*. Ministère des Transports. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/aide-finan/electrification/programme-electrification-transport-scolaire/Pages/programme-electrification-transport-scolaire.aspx>
- ▶ **MRNF et CRIQ. 2011** : *Profil des produits forestiers - technologies de bioénergies à base de biomasse forestière*. Ressources naturelle et Faune Québec & Centre de recherche industrielle Québec. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/entreprise/bioenergies-biomasse.pdf>
- ▶ **OCDE. 2003** : *Transport urbain de marchandises : les défis du XXI^e siècle*. Organisation de coopération et de développement économique. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/03deliveringf.pdf>
- ▶ **PARÉ, David; BERNIER, Pierre; THIFFAULT, Evelyn; TITUS, Brian D. 2011** : *Le potentiel de la biomasse forestière comme source d'énergie pour le Canada*. The Forestry Chronicle 87(3). <https://pubs.cif-ifc.org/doi/pdf/10.5558/tfc2011-024>
- ▶ **PHILIBERT, Cédric. 2021** : *Tout savoir sur l'hydrogène, ses bons et ses moins bons usages*. Révolution énergétique. <https://www.revolution-energetique.com/dossiers/tout-savoir-sur-lhydrogene-ses-bons-et-ses-moins-bons-usages/>
- ▶ **PINEAU, Pierre-Olivier et BOUCHET, Christophe. 2020** : *Les surplus électriques au Québec*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie HEC Montréal. https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2020/10/RAPPORT_SurplusElectQc.pdf
- ▶ **PLANÈTE ÉNERGIES. 2014** : *Les multiples utilisations de l'hydrogène*. Planète Énergies. <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-multiples-utilisations-de-l-hydrogene>
- ▶ **PORT MONTRÉAL. s.d.** : *Expansion du port de Montréal : Nouveau terminal à Contrecoeur*. Port Montréal. <https://www.port-montreal.com/fr/le-port-de-montreal/projets/terminal-contrecoeur>
- ▶ **PUPPAN, Daniel. 2002** : *Évaluation environnementale des biocarburants*. Periodica polytechnica sciences sociales et de gestion 10(1), p. 95-116.
- ▶ **RÉGIE DE L'ÉNERGIE DU QUÉBEC. 2020** : *Portrait du marché québécois de la vente au détail d'essence et de diesel : recensement des essenceries en opération au Québec au 31 décembre 2019*. Régie de l'énergie du Québec. http://www.regie-energie.qc.ca/documents/autres/RecensementEssenceries2019-27_novembre2020.pdf
- ▶ **RIOPEL, Alexis. 2021** : *L'éthanol pour l'essence va exercer une pression énorme sur le secteur agricole*. Le Devoir. <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/608421/agriculture-l-ethanol-va-exercer-une-pression-énorme-sur-le-secteur-agricole>
- ▶ **ROÉE. 2021** : *Évaluation des conséquences possibles pour Hydro-Québec par utilisation de l'électrolyse de l'eau pour alimenter le réseau d'Énergir en Hydrogène*. Regroupement des organismes environnementaux en énergie.
- ▶ **ROÉE. 2021** : *Hydrogène : la dangereuse, couteuse et inefficace lubie d'Énergir*. Regroupement des organismes environnementaux en énergie.
- ▶ **SÉNAT. s.d.** : *Transport de marchandises face aux impératifs environnementaux*. Sénat. <http://www.senat.fr/rap/r20-604/r20-6048.html>
- ▶ **SG2B. s.d.** *Électrifier les véhicules: l'autoroute de la réduction des GES*. Alterum. <https://www.alterum.energy/fr/article/l%C3%A9lectrification-des-v%C3%A9hicules-lautoroute-vers-la-r%C3%A9duction-des-ges-au-qu%C3%A9bec>
- ▶ **SHONKWILER, Vanessa P. 2012** : *Les agrocarburants de première génération : un bilan mitigé*. INRA Sciences sociales, INRA - Institut national de la recherche agronomique, 1/2012.

- ▶ **STM. 2019** : *Mémoire de la STM sur le Plan d'électrification et de changements climatiques*. Société de transport de Montréal. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/rapports-consultation/memoires/stm.pdf?1606237733>
- ▶ **TRANSITION ÉNERGÉTIQUE QUÉBEC. 2021**: *L'hydrogène*. Transition énergétique Québec. <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/expertises/hydrogene>
- ▶ **TREMBLAY, Janic. 2021**: *Décarboner le monde: les défis de l'industrie lourde*. Radio-Canada. <https://ici.radio-canada.ca/recit-numerique/3218/cop26-decarboner-ciment-acier-monde-industrie-lourde>
- ▶ **VANDERHEYDEN, Kees. 2010** : *L'exploration et l'exploitation du gaz de shale dans la vallée du Richelieu*. Centre de la Nature du mont Saint-Hilaire. https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/Gaz_de_schiste/documents/DM15.pdf
- ▶ **WAGNER, Damien. 2008** : *Étude expérimentale et modélisation de la réduction du minerai de fer par l'hydrogène*. Institut National Polytechnique de Lorraine. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21096935>
- ▶ **WWF. 2012** : *Stratégies de réduction des émissions du transport routier*. World Wildlife Fund. http://awsassets.wwf.ca/downloads/wwf_transport_routier_2012_oct_8_1.pdf