

Vers le net zéro: Élaborer une Feuille de route pour la décarbonisation du secteur ferroviaire au Canada

Décembre 2022

RENONCIATION

L'information, les concepts et les recommandations présentés dans ce document reposent sur l'information disponible au moment de la préparation de ce document. L'action ou l'inaction en fonction des opinions et de l'information présentées dans ce document relèvent de l'unique responsabilité du lecteur, et le Delphi Group et Pollution Probe ne sont pas responsables des dommages ou des pertes causées par l'utilisation de l'information et des opinions contenues dans ce document. Toute l'information est fournie « en l'état », sans aucune garantie ou condition de quelque nature que ce soit. Ce document peut comprendre des inexactitudes, des omissions ou des fautes typographiques.

Tous droits réservés © 2022 The Delphi Group et Pollution Probe

Tous droits réservés. L'utilisation de toute partie de ce document, qu'elle soit reproduite, stockée dans un système d'extraction ou transmise sous quelque forme ou moyen que ce soit (notamment électronique, mécanique, photographique, par photocopie ou enregistrement), sans l'autorisation écrite préalable du Delphi Group et de Pollution Probe constitue une infraction à la Loi sur le droit d'auteur.



434, rue Queen, bureau 500
Ottawa, ON, K1R 7V7
Canada

Tel.: (613) 562-2005
Fax: (613) 562-2008
www.delphi.ca



902 – 130 Queens Quay Est
Toronto, ON, M5A 0P6
Canada

Tel: (416) 926-1907
Fax: (416) 926-1601
www.pollutionprobe.org

Pour obtenir plus d'information

Cara LaRoche
Directrice de la Mobilité
durable
clarochelle@delphi.ca

Steve McCauley
Directeur principal,
Politiques
smccauley@pollutionprobe.org

Derek May
Gestionnaire principal de
projet
dmay@pollutionprobe.org

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce au soutien de l'Association des chemins de fer du Canada et de Transports Canada. Le Delphi Group et Pollution Probe sont les seuls responsables du contenu de ce rapport. L'inclusion des noms de toutes les organisations externes est précisée uniquement à des fins de reconnaissance et ne constitue pas une approbation du contenu.



Railway Association
of Canada

Association des chemins
de fer du Canada



Transports
Canada

Transport
Canada

Table des Matières

RENONCIATION.....	2
REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE.....	8
1. INTRODUCTION.....	12
1.1 <<RAIL PATHWAYS INITIATIVE>>.....	12
1.1.1 RÉSULTATS DE LA PHASE 1 : DOCUMENT D'ORIENTATION.....	13
1.1.2 OBJECTIFS DE LA PHASE 2 : FEUILLE DE ROUTE DE LA DÉCARBONISATION.....	14
2. CADRE D'ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE.....	15
2.1 CONCEPTION DU CADRE D'ÉVALUATION ANALYTIQUE.....	15
2.1.1 STRUCTURE DU CADRE.....	16
2.2 VAGUES (ÉTAT DE PRÉPARATION COMMERCIALE)	17
2.3 COÛTS.....	17
2.3.1 DÉVELOPPEMENT.....	18
2.3.2 MISE EN ŒUVRE.....	18
2.3.3 EXPLOITATION.....	19
2.3.4 PONDÉRATION DES FACTEURS LIÉS AUX COÛTS.....	20
2.4 POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE.....	20
2.4.1 DEGRÉ DE RÉDUCTIONS POSSIBLES.....	20
2.4.2 DEGRÉ D'ADOPTION PRÉVU.....	20
2.4.3 PONDÉRATION DES FACTEURS RELATIFS AU POTENTIEL DE DÉCARBONISATION.....	22
2.5 DÉFIS.....	22
2.5.1 EXPLOITATION.....	23
2.5.2 RAVITAILLEMENT.....	24
2.5.3 SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE.....	24
2.6 CADRE D'ÉVALUATION ANALYTIQUE.....	25
3. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DE 2021.....	27
3.1 SÉLECTION DES TECHNOLOGIES.....	27
3.1.1 MESURES D'EFFICIENCE.....	27
3.1.2 CARBURANTS ALTERNATIFS.....	28
3.1.3 PROPULSION ALTERNATIVE.....	28
3.2 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE.....	29
3.2.1 SOMMAIRE DE LA CATÉGORIE DES CARBURANTS ALTERNATIFS.....	30
3.2.2 SOMMAIRE DE LA CATÉGORIE DE LA PROPULSION ALTERNATIVE.....	32
3.3 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DU BIODIESEL (B20).....	34
3.4 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DU DIESEL RENOUVELABLE PRODUIT PAR HYDROGÉNATION (DRPH).....	36
3.5 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DE LA BATTERIE ÉLECTRIQUE.....	38
3.6 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DE L'ÉLECTRICITÉ CATÉNAIRE.....	40
3.7 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DE LA PILE À HYDROGÈNE.....	42

4. ÉLABORATION D'UNE FEUILLE DE ROUTE	44
4.1 FEUILLE DE ROUTE TECHNOLOGIQUE	44
COMBINAISON DU CARBURANT	
ALTERNATIF ET DE LA PROPULSION ALTERNATIVE	45
COMBINAISON DES OPTIONS DE PROPULSION ALTERNATIVE	47
ÉVALUATION CONTINUE REQUISE	47
4.2 CONSIDÉRATIONS NON LIÉES À LA TECHNOLOGIE	49
4.2.1 MODÈLES DE COÛT CHANGEANTS	49
OPTIONS DE FINANCEMENT DU	
DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE	49
OPTIONS DE FINANCEMENT POUR LA MISE	
EN ŒUVRE DES TECHNOLOGIES	52
TIRER PROFIT DES PARTENARIATS	52
4.2.2 INTEROPÉRABILITÉ NORD-AMÉRICAINE	53
4.2.3 COMPÉTITION POUR LES RESSOURCES ET ENTRE LES MODES	53
4.2.4 ÉQUITÉ SOCIALE	55
4.3 FEUILLE DE ROUTE DE LA DÉCARBONISATION DU	
SECTEUR FERROVIAIRE : PLAN DE MISE EN ŒUVRE	55
4.3.1 ÉLÉMENTS CLÉS POUR LA COLLABORATION	56
TECHNOLOGIE	56
RÉGLEMENTATION	57
ÉLABORATION DE POLITIQUES ET DE PROGRAMMES	57
4.3.2 PLAN DE TRAVAIL DES INTERVENANTS	58
4.3.3 RECOMMANDATIONS	60
ÉVALUATIONS TECHNIQUES	60
SUPERVISION DE LA MISE EN ŒUVRE	61
ÉLABORATION D'UN PROGRAMME	62
ANNEXE A – LISTE DES ENTRETIENS MENÉS	64
ANNEXE B – MESURES DE RÉDUCTION IDENTIFIÉE	66
ANNEXE C – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE : BIODIESEL (B20)	67
1. COÛT	67
A. DÉVELOPPEMENT	67
B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL	68
C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE	70
D. EXPLOITATION	71
2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE	72
A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES	72
B. ADOPTION/ APPLICABILITÉ	74
3. DÉFIS	76
A. EXPLOITATION	76
B. RAVITAILLEMENT	78
C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE	79
ANNEXE D – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE :	
DIESEL RENOUVELABLE PRODUIT PAR HYDROGÉNATION (DRPH30)	82

1. COÛT.....	82
A. DÉVELOPPEMENT.....	82
B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL.....	83
C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE.....	84
D. EXPLOITATION.....	85
2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE.....	86
A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES.....	86
B. ADOPTION/APPLICABILITÉ.....	88
3. DÉFIS.....	89
A. EXPLOITATION.....	89
B. RAVITAILLEMENT.....	91
C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE.....	92
ANNEXE E – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE : BATTERIE ÉLECTRIQUE...	94
1. COÛT.....	94
A. DÉVELOPPEMENT.....	94
B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL.....	95
C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE.....	97
D. EXPLOITATION.....	99
2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE.....	101
A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES.....	101
B. ADOPTION/ APPLICABILITÉ.....	104
3. DÉFIS.....	106
A. EXPLOITATION.....	106
B. RAVITAILLEMENT.....	107
C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE.....	109
ANNEXE F – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE: ÉLECTRICITÉ CATÉNAIRE.....	111
1. COÛT.....	111
A. DÉVELOPPEMENT	111
B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL.....	112
C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE.....	113
D. EXPLOITATION.....	116
2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE.....	118
A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES.....	118
B. ADOPTION/APPLICABILITÉ.....	120
3. DÉFIS.....	121
A. EXPLOITATION.....	121
B. RAVITAILLEMENT.....	123
C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE.....	124
ANNEXE G – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE : PILE À HYDROGÈNE.....	126
1. COÛT.....	126
A. DÉVELOPPEMENT.....	126
B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL.....	128
C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE.....	130

D. EXPLOITATION.....	132
2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE.....	136
A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES.....	136
B. ADOPTION/APPLICABILITÉ.....	139
3. DÉFIS	142
A. EXPLOITATION.....	142
B. RAVITAILLEMENT.....	143
C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE	146

SOMMAIRE

Le transport ferroviaire a toujours été très efficient, pour les marchandises comme pour les passagers. Depuis 26 ans, il est de plus en plus efficient, en partie grâce aux efforts déployés par le secteur et à un protocole d'entente (PE) de longue durée entre l'Association des chemins de fer du Canada (ACFC) et Transports Canada. La décarbonisation profonde du secteur ferroviaire peut contribuer considérablement à l'atteinte des objectifs de réduction des GES du Canada, mais cela est compliqué par la nature du matériel et des opérations ferroviaires. Diverses technologies peuvent contribuer à l'augmentation de la décarbonisation du secteur, mais la plupart sont naissantes et toutes posent des défis considérables. Aussi, il n'existe pas de voie claire et unique vers une décarbonisation profonde. Le secteur ferroviaire canadien relève le défi d'élaborer une voie à suivre. Les deux chemins de fer marchandises de grande ligne et un chemin de fer d'intérêt local ont récemment annoncé des projets pilotes pour tester des technologies de propulsion alternative, et le principal chemin de fer de passagers du Canada a annoncé des plans pour électrifier la majeure partie de ses opérations.

L'objectif du <<Rail Pathways Initiative>> était d'élaborer une feuille de route pour la décarbonisation du secteur ferroviaire à l'aide des technologies faibles en carbone émergentes. Cela comprenait notamment l'élaboration d'un cadre pour évaluer les possibilités de réduction des GES dans le secteur ferroviaire canadien, ainsi qu'une stratégie pour l'appliquer afin de guider le processus décisionnel sur la décarbonisation au cours des années et des décennies à venir.

Ce travail repose sur la compréhension que l'atteinte du net zéro dans le secteur ferroviaire se fera en trois « vagues » imbriquées : les améliorations de l'efficacité, l'utilisation de carburants faibles en carbone, et la propulsion alternative. L'efficacité est et devrait rester un objectif permanent des activités de décarbonisation. Bien que les améliorations de l'efficacité doivent demeurer une priorité, elles ne sont pas le point central de ce rapport, qui étudie des options offrant un potentiel de décarbonisation plus profonde. Les carburants alternatifs (faibles en carbone), qui ne permettront probablement pas une décarbonisation complète à eux seuls, sont une solution de court à moyen terme attrayante, surtout s'ils sont combinés au développement de technologies de propulsion alternative. Ces dernières devraient être la solution ultime à la décarbonisation, mais il faudra des années, ou même des décennies, avant qu'elles soient pleinement viables sur le plan commercial.

Le Cadre d'évaluation analytique présenté à la section 7 a été conçu pour suivre le potentiel évolutif des carburants et des technologies de propulsion alternatifs. Comme nous l'avons précisé, ils sont actuellement mis à l'essai au Canada et au palier international, générant des données sur la performance, les émissions, les coûts et les défis connexes. On peut utiliser le Cadre pour analyser ces données, comparant les technologies selon une évaluation de leurs coûts actuels, du potentiel de réduction des émissions et des défis. Sur le plan des coûts, les trois domaines évalués par le Cadre sont liés au développement, à la mise en œuvre et à l'exécution. Le potentiel de réduction des émissions est réparti entre le potentiel par train (trains au diesel) et l'applicabilité aux voies principales, celles-ci étant responsables de la grande majorité des émissions ferroviaires au Canada. Les défis sont évalués selon trois catégories : exécution, ravitaillement et sécurité et conformité réglementaire. Ces catégories, ainsi que l'architecture du Cadre en général, ont fait l'objet d'un examen approfondi par d'éminents experts du secteur ferroviaire avant les évaluations initiales.

Le Cadre fournit une note combinée sur 100 pour chaque technologie évaluée. Ce n'est pas une prévision d'un futur potentiel, mais plutôt un aperçu de l'état actuel de chaque option de décarbonisation. La valeur des notes accordées par le Cadre devrait être réalisée, car il est réappliqué à intervalles réguliers, selon des données à jour, pour tracer la trajectoire de chaque option. En d'autres termes, chaque application du Cadre donne un « aperçu » de la note de l'état actuel de chaque option de décarbonisation, et la répétition de ces aperçus à intervalles réguliers précisera la trajectoire de chaque option, relativement aux autres, quant à sa viabilité pour décarboniser le secteur ferroviaire du Canada. Cela peut donner aux intervenants le temps de se préparer aux technologies les plus prometteuses. En raison du temps requis pour déployer une nouvelle infrastructure et mettre le matériel ferroviaire à niveau, la plateforme technologique qui remplacera les locomotives au diesel soit être déterminée d'ici 2035 au plus tard. Cela permettra au secteur ferroviaire de s'aligner sur l'objectif net zéro de 2050 du Canada. Dans l'intervalle, l'accélération de la RD&D sur le transport ferroviaire et la réapplication du Cadre peuvent contribuer à déterminer les options les plus prometteuses pour les chemins de fer canadiens.

Le Cadre a été utilisé pour produire les notes de 2021 des deux carburants alternatifs et des trois technologies de propulsion alternative les plus viables pour la décarbonisation profonde du secteur. Les carburants sont le biodiesel et le diesel renouvelable produit par hydrogénation (DRPH), et les technologies de propulsion sont la batterie électrique, l'électricité caténaire et la pile à hydrogène. Les résultats de cette évaluation initiale peuvent servir de base de comparaison pour les futures évaluations.

Catégorie d'évaluation	Carburant alternatif		Propulsion alternative		
	B20	HDRD30	Batterie électrique	Électricité caténaire	Pile à hydrogène
Coût	76	72	56	76	32
Potentiel de réduction du carbone	70	70	80	100	80
Défis	80	67	67	40	40
TOTAL	75	70	68	72	51

Les notes de 2021 illustrent la disponibilité commerciale actuelle de chaque option. Par exemple, les notes de l'électricité caténaire sont élevées comparativement aux batteries électriques et aux piles à hydrogène, indiquant que c'est une technologie commercialement disponible, déjà largement appliquée dans le monde entier. Pour cette même raison, les notes de l'électricité caténaire devraient rester raisonnablement stables quand le Cadre sera réappliqué. À l'inverse, les notes des batteries électriques et des piles à hydrogène auront plus de possibilités d'augmenter, car ce sont des technologies qui évoluent rapidement. Les projets pilotes canadiens susmentionnés, ainsi que d'autres projets réalisés aux États-Unis et à l'étranger, vont contribuer considérablement à l'avancement de ces technologies et fournir des données utiles pour les futures évaluations du Cadre. L'application régulière du Cadre dans les années à venir, sous la supervision d'un comité multilatéral, est l'une des principales recommandations de ce rapport. Le sommaire des évaluations de 2021 des cinq principales options de décarbonisation figure aux sections 9 à 14, et le détail de chaque évaluation figure aux annexes C à G.

La Feuille de route tient également compte des considérations clés non liées à la technologie, notamment le soutien financier dont les chemins de fer auront besoin pour continuer à tester les technologies émergentes et, au final, pour les intégrer à leurs parcs de véhicules, la nécessité de l'interopérabilité sur le continent et la décarbonisation simultanée de modes concurrents. Le Plan de mise en œuvre de la Feuille de route, à la section 17, regroupe les considérations techniques et non techniques dans le cadre d'un processus visant à accélérer la décarbonisation du secteur ferroviaire. De plus, il précise les rôles et responsabilités des principaux intervenants, reconnaissant que pour suivre ces voies, tous les principaux groupes d'intervenants devront collaborer sur les plans de la technologie, de la réglementation et du développement de politiques et de programmes. Il comprend les cinq recommandations suivantes :

1. Évaluer les options technologiques tous les 2 à 5 ans à l'aide du Cadre d'évaluation figurant à la section 7. Faire rapport sur les trajectoires relatives de chaque option à l'horizon 2030 et 2050. Les résultats de chaque évaluation devraient être publiés et partagés largement avec les intervenants du secteur ferroviaire partout en Amérique du Nord, s'il est possible de le faire tout en respectant la confidentialité des chemins de fer et des autres intervenants du secteur privé.
2. Renouveler le Protocole d'entente de longue date entre TC et l'ACFC en 2022. Faire référence aux conclusions des Phases 1 et 2 de l'Initiative, ce qui comprend le Cadre d'évaluation, les recommandations et les rôles et responsabilités des intervenants.
3. Former un Comité national de décarbonisation du secteur ferroviaire. Le Comité peut fixer des objectifs de décarbonisation, faire le suivi des progrès réalisés, superviser les futures applications du Cadre d'évaluation, déterminer les domaines optimaux pour un soutien gouvernemental, proposer des mesures à court et moyen terme appropriées, et collaborer avec les responsables américains pour aligner les approches et les actions de haut niveau.
4. Créer le poste de gestionnaire de projet pour soutenir le Comité de décarbonisation.
5. Créer un programme conjoint au gouvernement et au secteur pour soutenir et réaliser les possibilités de décarbonisation précisées dans la Feuille de route. Ce programme devrait viser exclusivement le secteur ferroviaire, reconnaissant les avantages inhérents de son efficacité par rapport aux autres modes de transport, et le rôle vital qu'il joue dans l'économie canadienne. Il devrait comprendre un volet sur le financement et un volet sur le rassemblement afin de soutenir la collaboration.

Il faut tenir compte d'une multitude de variables quand on élabore la voie la plus efficace vers la décarbonisation du secteur ferroviaire. Quand ces variables interagissent, le nombre de voies potentielles augmente considérablement. Cela rend l'élaboration de scénarios conventionnels de décarbonisation difficile et réduit la probabilité que tout scénario ou projection élaboré aujourd'hui se réalise. Ainsi, les informations et le Cadre présentés dans ce rapport sont fournis dans l'optique où ils vont continuer à produire des résultats utiles et à éclairer le processus décisionnel alors que le secteur ferroviaire, les technologies et pratiques connexes et le contexte global de la décarbonisation continuent à évoluer.

1. INTRODUCTION

1.1 <<RAIL PATHWAYS INITIATIVE>>

Avec plus de 49 000 kilomètres de voies ferrées partout au pays, trois compagnies de chemin de fer nationales et de nombreux chemins de fer régionaux et d'intérêt local qui transportent des marchandises et des voyageurs, l'immense réseau ferroviaire du Canada soutient à la fois l'économie nationale et la qualité de vie des citoyens. Les chemins de fer de classe 1 et d'intérêt local transportent plus de 320 milliards de dollars de marchandises, et les trains voyageurs déplacent plus de 100 millions de personnes par année.¹

Environ un quart des émissions de gaz à effet de serre (GES) du Canada proviennent du secteur des transports.² Autrefois dominées par le transport de voyageurs, les émissions de ce secteur proviennent de plus en plus du transport de marchandises. Les émissions dues aux marchandises devraient excéder les émissions dues aux voyageurs d'ici 2030.³ Sur une base tonnes-km, le train est le mode le plus utilisé pour transporter des marchandises au palier national (44 % par rapport à 33 % par camion). Pourtant, le secteur ferroviaire ne représente que 4 % des émissions de GES totales liées au transport au Canada,⁴ et 93 % des émissions totales découlent du transport de marchandises.⁵ Cela démontre l'efficacité énergétique de ce mode de transport.

En investissant constamment dans l'efficacité et la durabilité, les chemins de fer marchandises du Canada ont réduit l'intensité de leurs émissions de GES de plus de 40 % depuis 1990, et les chemins de fer voyageurs interurbains ont réduit l'intensité de leurs émissions de GES d'environ 55 %.⁶ Ces améliorations de l'efficacité sont largement dues à la mise à niveau des moteurs des locomotives et à l'efficacité opérationnelle, notamment l'exploitation ferroviaire précise. Alors que le Canada et le reste du monde se dirigent vers d'importantes réductions du carbone et, en définitive, le net zéro, tous les secteurs doivent voir au-delà de l'efficacité pour décarboniser les sources de l'énergie qu'ils consomment.

Depuis 1995, Transports Canada et l'Association des chemins de fer du Canada (ACFC) ont signé quatre protocoles d'entente (PE) pour fixer des objectifs volontaires de réduction des émissions des locomotives au Canada. Le plus récent, le PE 2018-2022, prévoit l'engagement à collaborer pour créer un « document élaborant une démarche globale pour harmoniser les initiatives du gouvernement et de l'industrie afin de réduire les émissions provenant du secteur ferroviaire ».

1 ACFC, 2022 (<https://www.railcan.ca/fr/>)

2 ECCC, 2020 (<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html>)

3 ECCC, 2016 (https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/main/ges-ghg/02d095cb-bab0-40d6-b7f0-828145249af5/3001-20unfccc-202nd-20biennial-20report_f_v7_lowres.pdf)

4 Transport Canada

5 ECCC, 2020 (https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/eccc/En81-4-2018-3-fra.pdf)

6 RAC, 2020 (https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2020/05/RailCan_EnvironmentalBrief_Final.pdf)

Le <<Rail Pathways Initiative>> en deux phases vise à tirer parti des succès obtenus jusqu'à présent par le PE grâce à des efforts de collaboration entre les secteurs public et privé pour cibler explicitement les réductions de GES du secteur ferroviaire canadien.

La Phase 1, terminée en 2020, visait à consigner les activités en cours et potentielles relatives à la décarbonisation du secteur ferroviaire dirigées par l'industrie et le gouvernement, ou par une collaboration entre les secteurs public et privé. La compréhension commune de l'état actuel de la décarbonisation du secteur ferroviaire au Canada, déterminée au cours de la Phase 1, visait à la fois à soutenir l'élaboration de l'Initiative et à servir d'outil de collaboration. En raison du coût élevé, de la longue durée de vie du matériel et des besoins énergétiques importants, ainsi que de la vaste étendue géographique du Canada, la décarbonisation de ce secteur présente des défis uniques. Elle nécessitera l'alignement et la coopération stratégique de tous les secteurs susmentionnés, dont les universités/ organisations de recherche, les fabricants de matériel, les producteurs de carburant/fournisseurs d'énergie, les exploitants ferroviaires et les organismes publics.

1.1.1. RÉSULTATS DE LA PHASE 1 : DOCUMENT D'ORIENTATION

La Phase 1 consistait à étudier l'état actuel des activités et des politiques de décarbonisation du secteur ferroviaire au Canada.⁷ Elle a permis de dresser l'inventaire des instruments législatifs et des activités qui influencent l'intensité carbone du secteur ferroviaire au Canada, notamment:

- ▶ Instruments fédéraux : règlements, politiques et programmes au palier fédéral ;
- ▶ Instruments provinciaux : règlements, politiques et programmes au palier provincial et territorial ;
- ▶ Initiatives fédérales et provinciales de recherche, de développement et de démonstration (RD&D), plus précisément dans des domaines comme les technologies, les carburants et les évaluations de faisabilité ;
- ▶ Activités du secteur ferroviaire canadien : activités du secteur visant à réduire l'intensité des émissions de GES des opérations ferroviaires.

Le Document d'orientation indique que le secteur ferroviaire du Canada réalise des activités de décarbonisation relatives à l'efficacité du carburant, aux carburants alternatifs, à la propulsion alternative, à l'infrastructure et au transfert modal. La catégorie la plus étudiée à ce jour est l'efficacité du carburant, principalement en raison du renouvellement du parc et de la mise en œuvre de logiciels et d'analyses de données relatifs à l'énergie et à l'optimisation des itinéraires. L'étude de l'utilisation de carburants alternatifs progresse également, de même que l'agrandissement de l'infrastructure pour améliorer la capacité et la fluidité du réseau. Depuis la fin de la Phase 1 en août 2020, les

⁷ Le Document d'orientation présente les meilleures pratiques de la décarbonisation internationale du secteur ferroviaire.

trois plus gros chemins de fer du Canada, la Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada (CN), le Canadien Pacifique (CP) et VIA Rail ont annoncé qu'ils vont se procurer des trains fonctionnant à l'électricité ou à pile à hydrogène. Les plus petits chemins de fer d'intérêt local se tournent activement vers des options zéro émission, le Southern Railway, en Colombie-Britannique, ayant annoncé la conversion d'une locomotive de manœuvre au diesel pour qu'elle fonctionne avec une pile à hydrogène.

1.1.2 OBJECTIFS DE LA PHASE 2 : FEUILLE DE ROUTE DE LA DÉCARBONISATION

La Phase 2 de l'Initiative a tiré profit du Document d'orientation, ainsi que du sérieux engagement des intervenants et de l'analyse de récentes études, afin d'élaborer une méthode pour définir la trajectoire vers la décarbonisation profonde du secteur ferroviaire. Cela a entraîné la définition d'une vision commune, le développement d'un cadre pour évaluer les possibilités de réduction des GES dans le secteur ferroviaire du Canada et l'élaboration d'une stratégie exhaustive pour diriger le processus décisionnel sur les voies de la décarbonisation au cours des années et des décennies à venir.

Tôt dans le processus, on a noté que les résultats des activités visant à établir des feuilles de route de ce genre peuvent vite devenir obsolètes s'ils ne sont pas accompagnés de cadres permettant de les mettre à jour régulièrement en fonction des nouveaux développements. Tous les intervenants visés voulaient éviter cela. Aussi, pour que le Cadre d'évaluation soit d'une utilité optimale, il devra être revu et réappliqué régulièrement au cours des prochaines années. La réapplication du Cadre en fonction de données concrètes découlant de projets pilotes presque terminés et d'autres tests fournira de l'information sur les trajectoires de préparation commerciale et le potentiel de réduction des GES des principales options de décarbonisation alors que la RD&D connexe s'intensifie. De plus, cela permettra de mettre en lumière des recommandations tangibles propres aux carburants ou aux technologies.

Comme nous l'avons précisé plus tôt, le PE de 2018-2022 prévoit un engagement à collaborer pour créer un « document élaborant une démarche globale pour harmoniser les initiatives du gouvernement et de l'industrie afin de réduire les émissions provenant du secteur ferroviaire ». Ce document définit une méthode d'évaluation des mesures potentielles de réduction des GES et précise le rôle des intervenants dans le cadre de l'utilisation de ces mesures pour réduire les émissions du secteur ferroviaire de manière significative. Ce faisant, il vise à orienter la politique gouvernementale et l'industrie, afin d'aider les législateurs de tous les paliers de gouvernement et de soutenir le secteur ferroviaire alors qu'il cherche à tenir les engagements climatiques du Canada.



2. CADRE D'ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE

2.1 CONCEPTION DU CADRE D'ÉVALUATION ANALYTIQUE

Le Cadre d'évaluation analytique a été créé comme un outil permettant d'évaluer les mesures de décarbonisation les unes par rapport aux autres. Il génère un « aperçu » de l'état actuel de chacune des technologies clés en matière de carburants et de propulsion alternatifs, qui devraient contribuer à la décarbonisation profonde du secteur. Appliqué régulièrement avant la détermination des options de décarbonisation les plus viables alors que ces technologies continuent à évoluer, il déterminera les trajectoires relatives de chacune d'elles et facilitera le processus décisionnel sur les options les plus prometteuses. Comme l'indique la section 15 de ce rapport, une fenêtre approximative pour continuer à tester et à évaluer les différentes options se situe entre 2022 et 2035, après quoi il faudrait accélérer l'abandon massif du diesel de pétrole afin d'atteindre l'objectif net zéro de 2050. Le Cadre d'évaluation repose sur les hypothèses suivantes, chacune ayant été validée par des entretiens avec les intervenants.

La trajectoire vers le net zéro pour le secteur ferroviaire se fera par « vagues » imbriquées.

Améliorations de l'efficacité : Les améliorations de l'efficacité du matériel et de l'infrastructure existants et nouveaux sont le point central des activités de décarbonisation jusqu'à présent et **doivent demeurer une priorité**. Toutes les améliorations de l'efficacité aideront à réduire le fardeau de la décarbonisation des technologies sur les carburants et la propulsion.

Carburants faibles en carbone : Par l'intermédiaire des règlements sur les carburants faibles en carbone/ renouvelables, les gouvernements fédéral et provinciaux exigent déjà un mélange minimal de jusqu'à 5 % de contenu renouvelable dans le diesel, et cela va continuer à augmenter. Comme certaines compagnies de chemin de fer commencent à subir une pression accrue de la part des investisseurs et d'autres groupes d'intervenants en faveur de la décarbonisation, les améliorations de l'efficacité peuvent être complétées par le mélange de carburants renouvelables et faibles en carbone au-delà des exigences.

Propulsion alternative : Alors que les chemins de fer cherchent à dépasser les limites de ce que peuvent offrir les carburants et moteurs à combustion faibles en carbone, l'électrification par l'intermédiaire de batteries ou de systèmes caténaires, ou de piles à hydrogène, va probablement prévaloir à long terme.

Ce sera différent pour les différents chemins de fer, et certaines vagues pourront être évitées.

Les cycles de service et gammes de puissance des locomotives, les profils d'utilisation et les zones opérationnelles varient en fonction des services fournis : navetteurs, voyageurs

interurbains, locomotives de manoeuvre de triage et trains de travaux, chemins de fer d'intérêt local et régionaux, et chemins de fer marchandises de classe 1. Aussi, tous les chemins de fer ne vont pas suivre la même trajectoire vers la décarbonisation profonde. Il importe également de noter que toutes les compagnies de chemin de fer n'ont pas des ressources comparables pour contribuer à la décarbonisation, les marges variant considérablement. Cela devrait influencer les taux et les délais d'adoption.

Le Cadre vise à identifier les mesures à court, moyen et long terme les plus susceptibles de permettre une décarbonisation profonde du secteur, et d'entraîner un examen plus approfondi de la manière dont les partenariats peuvent être exploités pour relever les défis connexes, notamment de nouveaux modèles de partage des coûts qui pourraient favoriser une mise en œuvre rapide.

2.1.1 STRUCTURE DU CADRE

PIERRES ANGULAIRES

Le Cadre d'évaluation repose sur trois pierres angulaires : coût, potentiel de décarbonisation et défis. Le choix des pierres angulaires et de leur pondération relative a été validé et peaufiné par des consultations avec les intervenants. Il faut tenir compte de chacune des pierres angulaires pour qu'une option de décarbonisation devienne commercialement viable, et si une option ne répond pas aux trois, elle ne pourra être mise en œuvre.

FACTEURS

L'objectif principal de la phase d'élaboration du Cadre consistait à identifier et à évaluer tous les facteurs pertinents au coût, au potentiel de décarbonisation et aux défis, en identifiant et étudiant leur interaction. Ces facteurs sont abordés plus en détail aux sections 4, 5 et 6 de ce rapport.

Pour chaque facteur, le Cadre propose une échelle de 1 à 5. Des critères spécifiques ont été définis pour chaque facteur, par l'intermédiaire d'entretiens avec des experts et de la documentation existante, afin d'assurer la cohérence du classement des mesures. Ces critères doivent être applicables au large éventail des mesures de décarbonisation qui seront évaluées à l'aide du Cadre.

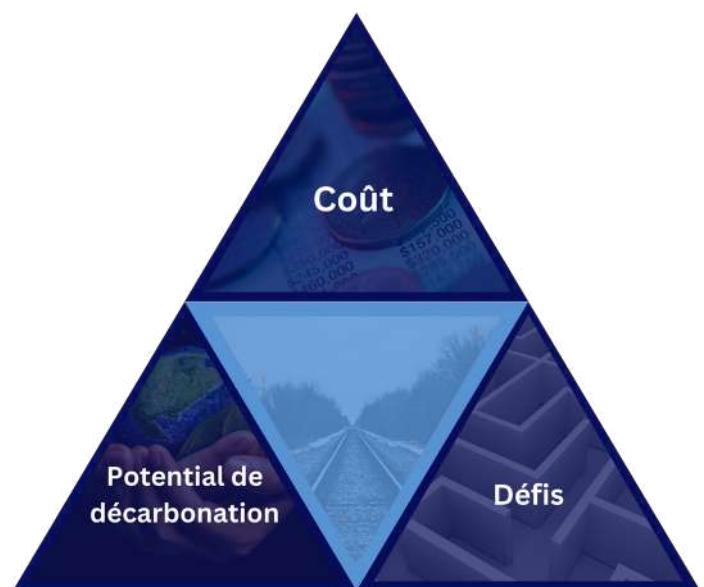


Figure 1: Pierres angulaires du Cadre d'évaluation

PONDÉRATION

Les mesures de décarbonisation de chaque vague sont comparées les unes aux autres sur la base des trois pierres angulaires que sont le coût, le potentiel de décarbonisation et les défis. Ces trois points sont pondérés de manière égale.

2.2 VAGUES (ÉTAT DE PRÉPARATION COMMERCIALE)

Le concept de vagues permet de comprendre et de prévoir la disponibilité commerciale de l'ensemble des mesures de décarbonisation du secteur ferroviaire au fil du temps. Le fait qu'une technologie donnée ne soit pas encore largement disponible sur le marché ne réduit pas sa valeur globale sur la voie de la décarbonisation. Au contraire, les technologies qui commencent seulement à être développées peuvent en fait être les plus prometteuses.

Il faut étudier l'état de préparation commerciale, ou plutôt le délai dans lequel une option de décarbonisation donnée devrait devenir commercialement disponible, pour assurer qu'une mesure particulière est évaluée par rapport à d'autres qui seront disponibles dans un délai similaire. On a donc utilisé l'état de préparation commerciale pour « trier » les mesures en trois délais qui, on l'a constaté par la suite, chevauchent étroitement les « vagues » décrites ci-dessus – l'efficacité, les carburants alternatifs et la propulsion alternative –, ce qui a entraîné un changement de terminologie, de l'état de préparation commerciale à la vague de décarbonisation.

Les trois délais correspondent aux jalons de 40 % à 45 % de réduction des GES d'ici 2030 et du net zéro d'ici 2050 :

- ▶ **Vague 1 : L'efficacité s'aligne sur le court terme:** De nombreuses mesures de cette catégorie sont actuellement utilisées dans le secteur ferroviaire, et de nouvelles mesures d'efficacité continueront d'être développées.
- ▶ **Vague 2 : Les carburants alternatifs s'alignent sur le moyen terme:** Ils sont actuellement utilisés dans des taux de mélange faibles. La technologie permettant d'utiliser des taux de mélange plus élevés est en cours de développement et devrait être commercialisée dans le contexte des applications ferroviaires d'ici 2030.
- ▶ **Vague 3 : La propulsion alternative s'aligne sur le long terme:** Bien que certaines options de propulsion alternative soient déjà utilisées, leur disponibilité commerciale à grande échelle pour toutes les applications ferroviaires canadiennes n'est pas prévue avant 2030.

2.3 COÛTS

Les coûts liés à la mise en œuvre de toute nouvelle mesure de décarbonisation peuvent être divisés en trois catégories : le développement, la mise en œuvre et l'exploitation.



2.3.1 DÉVELOPPEMENT

Les coûts de développement sont inexorablement liés aux niveaux de préparation commerciale. Les mesures de décarbonisation qui sont déjà disponibles sur le marché auront des coûts de développement faibles ou nuls. Les solutions comme l'augmentation du mélange de carburants renouvelables sont plus proches de la commercialisation, et les coûts seront probablement supportés par les fabricants de matériel et les chemins de fer, qui devront s'associer pour tester des mélanges plus élevés. Cette analyse s'applique donc principalement aux solutions à long terme et, à ce titre, elle se limite à celles qui offrent un potentiel de décarbonisation important.⁸

Les coûts pour développer une nouvelle mesure de décarbonisation (technologie et/ou carburant), de la conception à la commercialisation, comprennent le développement initial, les essais dans le cadre de projets pilotes et de démonstration, et la certification finale. Ces coûts peuvent s'élever à une centaine de millions de dollars dans certains cas.⁹ Le Cadre d'évaluation tient compte des coûts de développement en fonction de l'état de préparation commerciale actuel et de la complexité de l'adaptation de la technologie aux applications ferroviaires. Il ne tient pas compte de l'entité qui supportera ces coûts, alors que d'autres catégories de coûts tiennent compte uniquement des coûts supportés par les chemins de fer.

2.3.2 MISE EN ŒUVRE

Le Cadre d'évaluation tient compte des coûts en capital additionnels pour le matériel et des coûts d'infrastructure d'une mesure de décarbonisation donnée par rapport au scénario de base de la technologie diesel. Le Cadre traite ces deux secteurs de coûts séparément, car les coûts du matériel sont estimés par véhicule et l'infrastructure est un coût pour l'ensemble du parc de véhicules.

COÛTS EN CAPITAL

Lorsque l'adoption d'une mesure implique le remplacement du matériel ou de l'infrastructure du parc existant, les estimations des coûts en capital additionnels doivent tenir compte des différences dans la durée de vie prévue par rapport au scénario de base.

Lorsque les locomotives existantes peuvent être modifiées ou remises à neuf plutôt

⁸ Selon l'hypothèse que les chemins de fer vont viser des réductions de GES plus élevées alors que nous approchons de 2050 et par la suite.

⁹ Selon le trafic marchandises longue distance par hydrail (CRITUC, 2020).

que remplacées, les coûts en capital additionnels sont censés être plus faibles. Ainsi, lorsqu'une nouvelle technologie peut être mise en œuvre par la modernisation de matériel moins efficace pour qu'il produise moins d'émissions de GES, cela aura un effet favorable sur son classement.

Les critères d'évaluation sont fondés sur les coûts en capital additionnels existants par locomotive, variant de 0 \$ à plus de 5 millions de dollars. Le cadre devra être mis à jour régulièrement (p. ex. tous les 2 à 5 ans jusqu'en 2035 au moins) pour assurer qu'il continue à refléter les coûts existants.

EXIGENCES RELATIVES À L'INFRASTRUCTURE

Les exigences relatives à l'infrastructure peuvent comprendre les installations de mélange, l'infrastructure de distribution de carburant, l'infrastructure de ravitaillement en carburant, la mise à l'échelle de la distribution d'électricité et/ou l'infrastructure de charge.

2.3.3 EXPLOITATION

Jusqu'à présent, au Canada, les mesures de décarbonisation sont largement limitées à des options permettant d'accroître l'efficacité du carburant et aident donc les chemins de fer à réaliser des économies. Les mesures visant une décarbonisation plus profonde peuvent toutefois entraîner des coûts d'exploitation supplémentaires. On s'attendrait à une augmentation globale des coûts d'exploitation si le coût du carburant était plus élevé que le scénario de base de la technologie diesel (en tenant compte des augmentations prévues du coût du diesel en fonction des règlements fédéraux et provinciaux sur le carburant propre et de la tarification du carbone). L'augmentation des coûts de maintenance ou des dépenses dans d'autres domaines, par exemple les assurances, pourrait également contribuer, dans une certaine mesure, à une augmentation globale des coûts d'exploitation.

Les critères d'évaluation sont basés sur les économies/coûts d'exploitation additionnels existants. Ceux-ci devraient changer alors que la technologie évolue et que les prix des carburants changent en raison de politiques comme le Règlement sur les combustibles propres et la tarification du carbone. Le Cadre devra être mis à jour régulièrement pour assurer qu'il continue à refléter les coûts existants.

2.3.4 PONDÉRATION DES FACTEURS LIÉS AUX COÛTS

Le Cadre d'évaluation fournit quatre échelles de notation pour couvrir les trois facteurs : Développement ; Mise en œuvre – matériel ; Mise en œuvre – infrastructure ; et Exploitation. La pondération de ces quatre notes dépendra de la taille relative de chaque « catégorie » et de la manière dont les coûts connexes devraient être répartis entre les intervenants.

Le Cadre attribue une double part à la catégorie « Exploitation », car elle représente un coût permanent alors que les autres sont des coûts ponctuels ou intermittents. Il importe de le noter étant donné le caractère durable de la plupart des actifs ferroviaires.

2.4 POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE

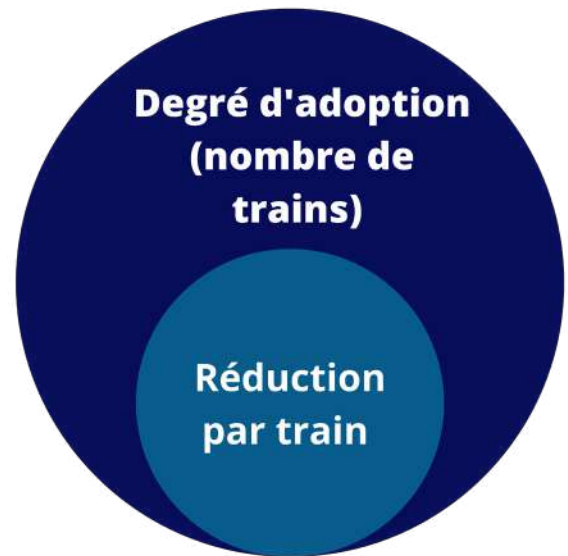
Le potentiel d'une nouvelle technologie ou d'un nouveau carburant pour réduire les émissions globales de GES du secteur ferroviaire dépendra des économies qui peuvent être réalisées par locomotive et de la mesure dans laquelle on peut s'attendre à ce que les chemins de fer adoptent la mesure en question.

2.4.1 DEGRÉ DE RÉDUCTIONS POSSIBLES

Le Cadre considère, par matériel, le degré de réduction possible selon la mise en œuvre d'une nouvelle technologie ou d'un nouveau type de carburant par rapport au scénario de base de la technologie diesel.

Quand on applique le Cadre pour comparer les options en matière de technologie ou de carburant, on doit tenir compte des émissions liées au cycle de vie. Cela inclut, le cas échéant, les matières premières, la production, la distribution, l'utilisation et la fin de vie. Une évaluation détaillée du cycle de vie des émissions de carbone n'entre pas dans le champ d'application du Cadre, mais les analyses examineront néanmoins l'échelle globale de

chacun de ces éléments clés, tels qu'ils s'appliquent à chaque option, et mettront en évidence tout sujet de préoccupation qui pourrait justifier un examen plus approfondi.



2.4.2 DEGRÉ D'ADOPTION PRÉVU

Le degré d'adoption prévu représente la mesure dans laquelle on peut s'attendre à ce que les chemins de fer utilisent la technologie ou le carburant en question. Les prévisions relatives à l'adoption doivent exclure les facteurs ou les défis liés aux coûts afin d'éviter un double comptage. Le degré d'adoption sera donc en grande partie influencé par la proportion du parc pour lequel la technologie ou le carburant représente une option viable.

APPLICABILITÉ DES SERVICES CLÉS

Le domaine ferroviaire canadien comprend un parc diversifié, réparti sur divers services. Il s'agit notamment de trains marchandises de grande et de petite ligne, de trains de manœuvre et de travaux, et de trains interurbains et de banlieue. Alors que certaines mesures de décarbonisation s'appliqueront à l'ensemble du parc canadien, d'autres seront limitées en fonction de facteurs comme les exigences en matière de puissance, les cycles de service et les zones d'exploitation.

Selon le rapport sur la Surveillance des émissions des locomotives de 2018, les émissions de GES des activités de marchandises représentent 95 % des émissions de GES totales du secteur ferroviaire du Canada : 87 % proviennent des opérations sur ligne principale.¹⁰ Le transport de marchandises utilise plus de locomotives que tout autre service, car il représente des distances considérablement plus longues chaque année, comme l'indiquent les tableaux 2 et 3.

Tableau 1 : Ventilation du parc de locomotives par service, 2018¹¹

<i>Ventilation du parc de locomotives par service</i>	<i>Nombre</i>	<i>% du Total</i>
<i>Activités de marchandises</i>		
<i>Locomotives pour le transport de marchandises de ligne</i>		
<i>Ligne principale</i>	2 531	67%
<i>Régionale</i>	130	3%
<i>Locale</i>	166	4%
<i>Locomotives pour les activités de transfert de marchandises</i>		
<i>Manœuvre de réseau en terminal et locomotives de travaux</i>	499	13%
<i>Voie d'aiguillage de grande ligne</i>	195	5%
<i>Total des activités de marchandises</i>	3 521	93%
<i>Activités de passagers</i>		
<i>Train de passagers</i>	234	6%
<i>UMD</i>	24	1%
<i>Manœuvre de réseau en terminal</i>	3	0%
<i>Total des activités de passagers</i>	261	7%
<i>Total – Activités de marchandises et passagers</i>	3 782	100%

¹⁰ Association des chemins de fer du Canada. 2021. Rapport sur la surveillance des émissions des locomotives : 2018. (https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2021/06/2018_LEM_Layout-FRENCH-rev6.pdf)

¹¹ Ibid.

Consommation de carburant des activités ferroviaires canadiennes	Litres (millions)	% du Total
Classe 1	1 949,92	87%
Régionale et locale	111,88	5%
Total du train de marchandises	2 061,80	92%
Manœuvre de réseau en terminal	51,56	2%
Trains de travaux	7,10	0%
Total des manœuvres de réseau en terminal et trains de travaux	58,66	3%
Total des activités de marchandises	2 120,46	95%
Interurbains – Total	52,77	2%
De banlieue	65,74	3%
Trains de tourisme et d'excursion	3,22	0%
Total des activités de passagers	121,72	5%
Total des activités ferroviaires	2 242,19	100%

Le cadre d'analyse en tient compte en attribuant un poids supplémentaire aux options de décarbonisation qui sont directement applicables aux opérations de marchandises sur les lignes principales. Il tient également compte de l'applicabilité indirecte au transport de marchandises en considérant que les trains de manœuvre et de travaux devraient permettre de tester et de perfectionner des technologies de propulsion alternative en vue d'une application future aux marchandises.

2.4.3 PONDÉRATION DES FACTEURS RELATIFS AU POTENTIEL DE DÉCARBONISATION

Le potentiel de décarbonisation de toute mesure sera le produit des réductions d'émissions possibles par matériel et de l'adoption de la mesure, selon le nombre d'unités. Ces deux facteurs doivent donc être évalués de manière égale.

2.5 DÉFIS

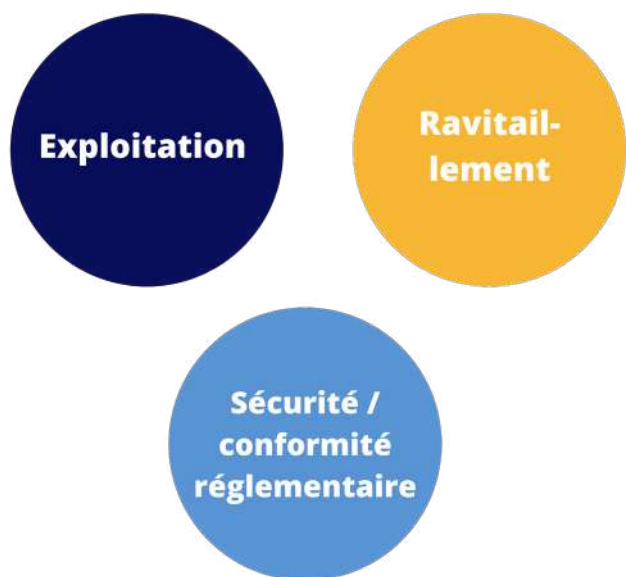
Comme ce sont des technologies nouvelles/perturbatrices, le déploiement à grande échelle de toutes les mesures de décarbonisation présente des difficultés inhérentes. Ces défis peuvent être classés en deux catégories, qui doivent être prises en compte dans le Cadre d'évaluation :

- Problèmes, qui peuvent être surmontés ;

¹² Ibid.

- Obstacles, qui ne peuvent pas être surmontés et représentent donc des risques qu'il faut gérer.

Dans le cadre de l'évaluation des défis, le Cadre évite le « double comptage » en omettant tout facteur lié au coût. Si les coûts élevés représentent incontestablement des défis importants, ils sont pris en compte dans le Cadre d'évaluation, à la section des coûts.



D'après les entretiens avec les experts, tous les défis identifiés pour les mesures de décarbonisation, nouvelles ou existantes, sont liés à la mise en œuvre et à l'exploitation, ce qui les place strictement sous la responsabilité des compagnies ferroviaires. Les défis ont été identifiés dans les domaines suivants : l'exploitation/performance, le ravitaillement et la sécurité/conformité réglementaire. Ces domaines peuvent être interconnectés, mais ne le sont généralement pas.

Malgré la nature disparate de ces défis, il fallait que le Cadre d'évaluation utilise des critères permettant de comparer les mesures de décarbonisation les unes aux autres et de les classer en fonction des défis de chacune. Pour ce faire, il a normalisé ces défis en considérant l'ampleur des impacts plutôt que les défis eux-mêmes.

2.5.1 EXPLOITATION

Le Cadre d'évaluation tient compte de divers défis opérationnels, notamment une complexité accrue, des problèmes de performance et des problèmes mécaniques et de maintenance. Compte tenu du large éventail des enjeux et des différents effets de ces enjeux entre les différents types d'opérations ferroviaires, il est difficile de définir des critères de classement objectifs. En raison de la nature dynamique et spécifique à la technologie/pratique des défis opérationnels, ceux-ci ont été évalués en fonction de niveaux de complexité élevé, modéré et faible, selon le jugement de l'équipe d'évaluation, en tenant compte de toutes les informations disponibles.

COMPLEXITÉ

Cette sous-catégorie comprend le plus large éventail d'enjeux. Il s'agit notamment de l'interopérabilité transfrontalière et interentreprises, des défis géographiques ou liés au terrain, des limitations de facteurs comme la portée, la hauteur des wagons et les configurations de chargement, et de l'impact sur les émissions locales des principaux contaminants atmosphériques (PCA).

PERFORMANCE

Les mesures de décarbonisation peuvent avoir un impact sur la performance des locomotives, d'une manière générale ou uniquement dans les climats froids. Pendant l'évaluation de ces impacts, le Cadre considère principalement la fiabilité. D'autres impacts, comme la complexité des opérations et l'augmentation des problèmes mécaniques ou de maintenance, sont examinés dans les deux autres sous-sections.

MÉCANIQUE/MAINTENANCE

Cela comprend les conséquences mécaniques potentielles des mesures de décarbonisation, notamment celles qui nécessitent des modifications aux pratiques ou aux calendriers de maintenance ou qui posent un risque pour les garanties. Pour évaluer cet aspect, le Cadre tient compte du fardeau potentiel pour les compagnies ferroviaires, ce qui comprend le scénario le plus défavorable de la perte d'un actif.

2.5.2 Ravitaillement

Les défis du ravitaillement en carburant liés au coût, ce qui comprend la portée de la nouvelle infrastructure de ravitaillement requise, sont abordés dans la section pertinente, sous la rubrique coût (Mise en œuvre – Infrastructure). Cette évaluation est donc strictement axée sur la disponibilité (ce qui comprend la complexité de la chaîne d'approvisionnement) et le temps nécessaire pour faire le plein ou la charge. Il s'agit notamment de la concurrence pour la technologie et/ou le carburant, de la qualité du carburant/de l'électricité, des interdépendances (p. ex. services publics, producteurs d'hydrogène ou fournisseurs de biocarburants), du stockage de l'énergie et de la flexibilité des opérations.

2.5.3 SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE

Les préoccupations liées à la sécurité des solutions potentielles de décarbonisation devraient être partiellement résolues par une formation accrue, qui pourrait porter à la fois sur les opérations ferroviaires et le ravitaillement.

La conformité réglementaire est vaste et couvre des domaines comme les émissions de PCA et le bruit et les vibrations, qui peuvent être améliorés par la technologie. Certaines solutions nécessiteront toutefois une réglementation supplémentaire, et le Cadre d'évaluation tient compte du fardeau que représente le respect de cette réglementation.

2.6 CADRE D'ÉVALUATION ANALYTIQUE

Le Cadre d'évaluation analytique repose sur une échelle de notation de 1 à 5 pour chacun des facteurs identifiés sous les trois pierres angulaires, 5 représentant la meilleure note. Les critères de chaque colonne sont utilisés pour attribuer une note au facteur en question à la mesure de décarbonisation évaluée.

Les notes sont ensuite pondérées dans chaque catégorie, on les multiplie par le facteur de pondération et on les additionne pour attribuer une note totale sur 100 à la mesure.

NOTE SELON	COÛT				POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE		DÉFIS		
	Développement	Mise en œuvre– Coût en capital	Mise en œuvre – Infrastructure	Exploitation	Potentiel de réduction	Adoption/ Applicabilité	Exploitation	Ravitaillement	Sécurité et conformité réglementaire
	Coût total pour développer, tester et certifier	Coût en capital additionnel par locomotive	Infrastructure de ravitaillement/charge additionnelle requise	Coût d’exploitation additionnel	Potentiel de réduction des GES	Proportion du parc	Complexité, performance, mécanique	Disponibilité (complexité de la chaîne d’approvisionnement comprise), temps	Safety concerns, regulatory compliance
5	Disponible sur le marché : pas de coût de développement	Pas de coût additionnel	Aucune infrastructure additionnelle requise	Économies de >20 %	>80%	Bien approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	Égal au diesel ou meilleur	Égal au diesel ou meilleur	Égal au diesel ou meilleur
4	Presque disponible sur le marché : coût de développement <10 M \$	Jusqu’à 1 million \$	Utilisation de l’infrastructure existante avec modifications	Économies de jusqu’à 20 %	50-80%	Partiellement approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	Faible complexité pour maintenir la fiabilité du système et l’infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	Complexité modérée pour la chaîne d’approvisionnement et/ou les exigences de ravitaillement	Formation et/ ou règlements additionnels requis
3	10-50M \$	1-3 million \$	Nouvelle infrastructure significative requise aux gares de triage seulement	Égal au diesel	30-50%	Bien approprié pour le matériel de triage	Complexité modérée pour maintenir la fiabilité du système et l’infrastructure existante et/ou entretenir le matériel	Chaîne d’approvisionnement complexe, >2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	Formation et certification et/ ou règlements additionnels requis
2	50-75M \$	3-5 million \$	Nouvelle infrastructure significative requise aux gares de triage et à d’autres endroits	Jusqu’à deux fois le coût du diesel	10-30%	Bien approprié pour le transport de passagers	Complexité élevée pour maintenir la fiabilité du système et l’infrastructure existante et/ou entretenir le matériel	Problèmes de disponibilité intermittents, jusqu’à 2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	Préoccupations de sécurité et/ ou règlements additionnels considérables requis
1	Développement significatif requis avec défis complexes : >75M \$	>5 million \$	Nouvelle infrastructure significative requise sur l’ensemble du réseau	>2x	<10%	Non approprié pour le transport de marchandises de grande ligne, et partiellement approprié pour le transport de passagers	Risque considérable pour la fiabilité. Risque considérable de perdre un bien.	Problèmes de disponibilité fréquents, jusqu’à 2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	Graves préoccupations de sécurité, notamment pour le public, et/ ou règlements additionnels complets requis
PONDÉ- RATION	6,7%	6,7%	6,7%	13,3%	16,7%	16,7%	11,1%	11,1%	11,1%
	33,3%				33,3%		33,3%		

3. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DE 2021

3.1 SÉLECTION DES TECHNOLOGIES

La liste exhaustive des options de décarbonisation identifiées par la recherche documentaire et les consultations figure à l'annexe B. Nous avons fait une évaluation préliminaire du potentiel de réduction des GES de toutes les options afin de dresser une liste limitée des options les plus viables. Les sélections découlant de l'évaluation des technologies ont été faites selon la viabilité évaluée de chaque option, déterminée par les entretiens avec les intervenants et les résultats de l'analyse documentaire, et selon les critères suivants.

3.1.1 MESURES D'EFFICIENCE

Il existe de nombreuses façons de continuer à améliorer l'efficacité des chemins de fer, notamment par l'amélioration de l'aérodynamisme des locomotives et des wagons, l'automatisation et des solutions fondées sur les données. Ensemble, ces mesures continueront à jouer un rôle essentiel dans la réduction de l'intensité carbone du secteur ferroviaire, mais elles ne devraient pas permettre d'atteindre une décarbonisation profonde. Un ensemble dynamique de mesures d'efficacité peut permettre de réduire considérablement les émissions, mais les évaluations préliminaires ont indiqué qu'aucune d'entre elles ne pouvait permettre une décarbonisation à un niveau permettant d'atteindre les objectifs nationaux de décarbonisation ou de suivre le rythme des mesures de décarbonisation prises par d'autres modes de transport terrestre de marchandises.

Cela ne diminue en rien l'importance et la valeur de cette vague, car toute amélioration de l'efficacité des chemins de fer réduira l'effort requis pour atteindre la décarbonisation en utilisant des carburants renouvelables et des technologies de propulsion alternative. Les mesures d'efficacité doivent demeurer prioritaires, car la réduction des besoins énergétiques des trains réduit les défis liés à l'abandon des carburants à base de pétrole. Comme ils l'ont toujours fait, les chemins de fer devraient continuer à investir dans les mesures d'efficacité qui sont avantageuses dans leur contexte spécifique : celles qui ont un délai de récupération raisonnable et qui devraient permettre de faire des économies à long terme. Les mesures spécifiques choisies varieront d'un chemin de fer à l'autre en fonction de ces facteurs.

Pour les raisons susmentionnées, nous n'avons pas fait d'évaluations techniques détaillées des mesures d'efficacité individuelles dans le cadre de cette étude. Sur les 25 experts consultés et les dizaines de ressources examinées dans le cadre de ce projet, rien n'a indiqué que les mesures d'efficacité pouvaient à elles seules permettre une décarbonisation profonde. Au contraire, diverses mesures d'efficacité existantes et émergentes joueront des rôles complémentaires aux carburants et aux technologies de propulsion alternative qui seront nécessaires pour réaliser le gros de la décarbonisation des réseaux ferroviaires.

3.1.2 CARBURANTS ALTERNATIFS

Liste courte : biodiesel et diesel renouvelable produit par hydrogénation (DRPH)

Selon le Règlement sur les combustibles renouvelables du Canada, « le biodiesel à base d'ester et le diesel renouvelable produit par hydrogénation (DRPH) sont tous les deux admissibles à titre de contenu renouvelable pouvant être utilisé pour répondre aux exigences du Règlement ».¹³

Les autres technologies de diesel renouvelable retenues sont visées par les évaluations plus vastes du biodiesel et du DRPH. Les carburants à base d'alcool se sont révélés moins appropriés que les carburants diesel renouvelables pour remplacer le diesel de pétrole dans les applications ferroviaires. Le gaz naturel n'est pas évalué, car il s'agit d'un carburant à base de pétrole qui nécessiterait d'importantes modifications aux locomotives et qui est moins performant pour la réduction des GES en raison des rejets de méthane et d'autres enjeux.¹⁴

Dans le but d'optimiser les avantages de l'utilisation de carburants renouvelables selon limitations actuelles, notamment les limitations techniques, le coût, la disponibilité et les préoccupations quant à l'utilisation des terres, les taux de mélange sélectionnés pour l'évaluation étaient le B20 (mélange de 20 % de biodiesel et de 80 % de diesel de pétrole) et le DRPH30 (mélange de 30 % avec du diesel de pétrole).

À la suite des consultations d'experts menées par l'équipe du projet, et à la lumière des considérations liées à la capacité de production actuelle et prévue de biocarburants, à la disponibilité des terres arables et des matières premières, à la compatibilité avec les locomotives et le matériel en service, et à la performance dans le climat canadien, on a déterminé qu'il ne serait pas possible de remplacer les quelque 2,25 milliards de litres de diesel de pétrole utilisés annuellement par le secteur ferroviaire canadien par des biocarburants purs. Les niveaux de mélange maximaux qui ont été jugés réalisables selon les considérations et les consultations susmentionnées sont le B20 et le DRPH30. Les évaluations techniques reflètent ces niveaux.

3.1.3 PROPULSION ALTERNATIVE

Liste courte: batteries électriques, électricité caténaire et piles à hydrogène

La liste exhaustive comprenait de nombreuses options bimodes. L'utilisation de mesures de propulsion alternative en conjonction avec du diesel n'a pas été évaluée séparément, mais sera soulevée plus loin dans ce rapport (ce ne sont pas des mesures uniques, mais plutôt des tremplins vers l'électrification complète). Chacune des trois technologies de propulsion alternative évaluées en détail s'est avérée techniquement capable d'alimenter l'ensemble du réseau ferroviaire canadien. De plus, il est possible de fournir l'énergie requise pour chacune des trois options en respectant le net zéro. C'est pourquoi ces

¹³ RNCAN, 2014. (<https://www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-transports-carburants-remplacement/etude-de-lutilisation-du-drph-comme-carburant-de-remplacement-en-amerique-du-nord/3662>)

¹⁴ CARB, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/msprog/tech/techreport/final_rail_tech_assessment_11282016.pdf)

technologies sont le point central des évaluations techniques détaillées de la propulsion alternative.

3.2 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE

Il importe de noter que les évaluations technologiques de cette Feuille de route ont été réalisées avec les meilleures informations disponibles en 2021. L'information sur les technologies qui ne sont pas encore commercialement disponibles, en particulier les options de propulsion alternative comme les batteries électriques et les piles à hydrogène, évolue rapidement. Afin d'assurer la cohérence des évaluations et de permettre une comparaison équitable, le Cadre doit être appliqué de manière uniforme, avec la meilleure information disponible.

Les notes sur 100, pour les pierres angulaires individuelles et pour l'ensemble, sont résumées au Tableau 3 et aux Figures 2 et 3. Des résumés par type de technologie suivent, et des évaluations détaillées des technologies figurent à l'annexe C.

Tableau 3 : Notes des évaluations pour les carburants et les technologies de propulsion alternative

	B20	DRPH30	Batterie électrique	Électricité caténaire	Pile à hydrogène
Coût	76	72	56	76	32
Potentiel de réduction du carbone	70	70	80	100	80
Défis	80	67	67	40	40
TOTAL	75	70	68	72	51



3.2.1 SOMMAIRE DE LA CATÉGORIE DES CARBURANTS ALTERNATIFS

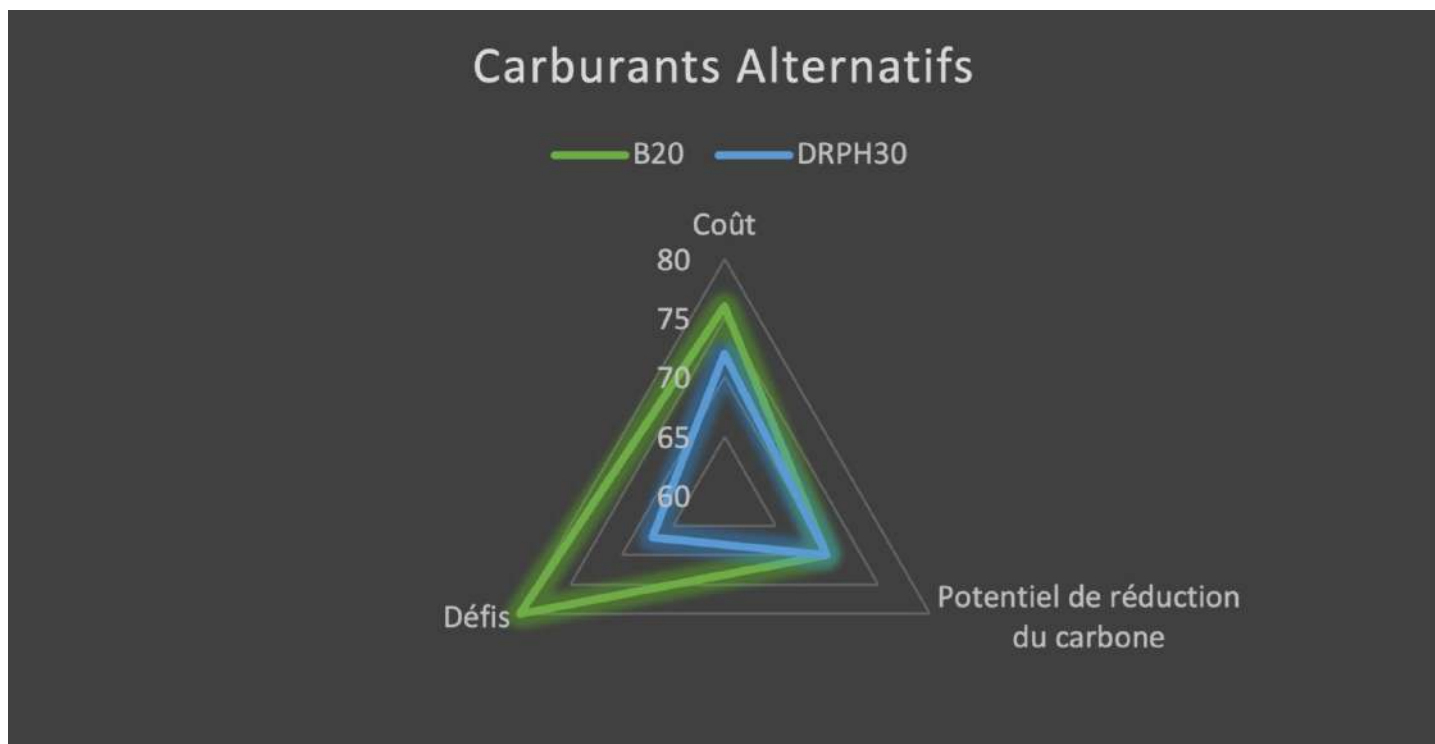


Figure 1: Carburants alternatifs, évaluation comparative

Dans les évaluations, le B20 égalait le DRPH30 quant au potentiel de réduction du carbone et le surpassait en ce qui a trait au coût et aux défis. Cela est dû en grande partie au manque actuel de DRPH au Canada et à son coût élevé.

L'un des principaux points forts du DRPH relativement au biodiesel est qu'il est chimiquement plus similaire au diesel de pétrole, et qu'il nécessite donc moins de pratiques opérationnelles et de matériel spécialisé pour être utilisé avec les locomotives existantes à des taux de mélange élevés. La grande similarité chimique avec le diesel de pétrole signifie également que le DRPH offre une meilleure performance par temps froid que le biodiesel, bien que d'autres essais soient nécessaires pour confirmer la performance par temps froid dans le contexte canadien. En outre, le DRPH peut être produit à partir d'une plus grande variété de matières premières que le biodiesel – notamment des matières premières non alimentaires qui peuvent être cultivées sur des terres marginales, ainsi que des déchets/résidus de l'agriculture, de la foresterie et du traitement des déchets solides municipaux.

Cependant, l'un des principaux points faibles du DRPH, et la principale raison pour laquelle il a reçu une note globale inférieure à celle du biodiesel dans cette évaluation, est lié à son manque actuel de disponibilité pour les chemins de fer canadiens.¹⁵ Bien que certains développements à petite échelle soient en cours de planification, le Canada ne dispose actuellement pas d'installation de production de DRPH.¹⁶ Le DRPH utilisé au

¹⁵ La majeure partie du DRPH produit en Amérique du Nord est actuellement destinée à la Californie en raison de ses objectifs de décarbonisation agressifs et de ses mandats pour tous les véhicules diesel lourds, ce qui comprend les locomotives.

¹⁶ Oil & Gas Journal, 2021. (<https://www.ogj.com/refining-processing/refining/article/14205421/covenant-energy-plans-renewable-diesel-refinery-in-saskatchewan>)

Canada est principalement importé des États-Unis, mais aussi de Finlande, des Pays-Bas et de Singapour.¹⁷ La disponibilité limitée du DRPH devrait se poursuivre sur une période prolongée, peut-être pendant plus d'une décennie. Cette contrainte entraîne des coûts de deux à quatre fois supérieurs à ceux du diesel de pétrole, ce qui limite les applications potentielles. C'est important, car la vague de carburants alternatifs est identifiée dans cette Initiative comme la principale solution pour que les chemins de fer atteignent les objectifs de 2030. Cela dit, la vague de carburants alternatifs devrait demeurer au moins jusqu'aux premiers stades de l'utilisation de la propulsion alternative, et probablement jusqu'au plein déploiement de la technologie de propulsion alternative¹⁸ Donc, alors que la situation évolue, il y aura probablement une place pour le DRPH. Dans l'intervalle, le biodiesel dans des mélanges allant jusqu'à B20, voire plus, constitue une excellente alternative, bien que des essais et des développements supplémentaires soient nécessaires pour garantir une utilisation sûre et efficace de ces mélanges plus élevés avec les locomotives existantes.

Il est également essentiel de noter que, bien que les biocarburants soient des tremplins utiles pour la décarbonisation et qu'ils contribuent à la réduction des émissions de carbone dans le secteur ferroviaire, il est très peu probable qu'ils permettent de réaliser une décarbonisation profonde à eux seuls. À l'avenir, ces deux carburants pourront être utilisés à des taux de mélange plus élevés (jusqu'à 100 % à certaines périodes de l'année, dans des applications pour lesquelles les technologies de propulsion alternative ne conviennent pas en tant que solutions autonomes), mais cela sera limité par la disponibilité. Certaines juridictions imposent déjà des plafonds à la quantité de biocarburants pouvant être utilisés pour le transport, afin de prévenir les conflits avec la production alimentaire et de limiter les changements additionnels à l'utilisation des terres. Par exemple, en Union européenne, la production et l'utilisation de biocarburants sont sujettes à la Directive sur l'énergie renouvelable (RED) et la Directive sur la qualité du carburant (FQD). La RED impose des limites strictes aux types de terres dont peuvent être extraites les matières premières pour les biocarburants, avec des considérations clés sur la biodiversité, les changements à l'utilisation des terres et les effets sur les cultures. Bien que les biocarburants qui ne respectent pas ces limites puissent être utilisés à court terme (jusqu'en 2030), leur utilisation ne peut pas être prise en compte dans les exigences de mélange de carburants renouvelables ou les objectifs de réduction des GES.¹⁹ Ces règles limitent l'utilisation d'une grande majorité des biocarburants conventionnels actuellement produits en Europe. Au Royaume-Uni, la Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) exige que les biocarburants comprennent 9,75 % de carburants combustibles pour le transport (sur route et hors route), mais la quantité totale de biocarburants dérivés de cultures agricoles ne peut dépasser 4 % (ce pourcentage diminuant à 3 % en 2026 et à 2 % en 2032). Cette mesure vise à éviter les conflits avec la production alimentaire et à encourager la production de biocarburants

17 The Western Producer, 2020. (<https://www.producer.com/crops/canola-growers-see-opportunity-in-biofuel-option/>)

18 Il devrait y avoir des contextes où la technologie de propulsion alternative est moins adaptée, ce qui pourrait entraîner une demande continue de carburants alternatifs jusqu'en 2050 et au-delà. La section 16 traite de ce sujet.

19 Commission européenne, 2020. (https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en)

dérivés de déchets.²⁰

Il importe également de noter que si les biocarburants produisent de faibles émissions nettes de GES, ils peuvent entraîner une augmentation des émissions de PCA, ce qui peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine.²¹ Dans le cas du biodiesel, les émissions de NOx peuvent être plus élevées que celles du diesel de pétrole. L'utilisation de biocarburants dans les zones densément peuplées risque donc d'être limitée à long terme, un facteur important à prendre en compte au moment du choix des applications optimales pour les carburants alternatifs.

3.2.2 SOMMAIRE DE LA CATÉGORIE DE LA PROPULSION ALTERNATIVE

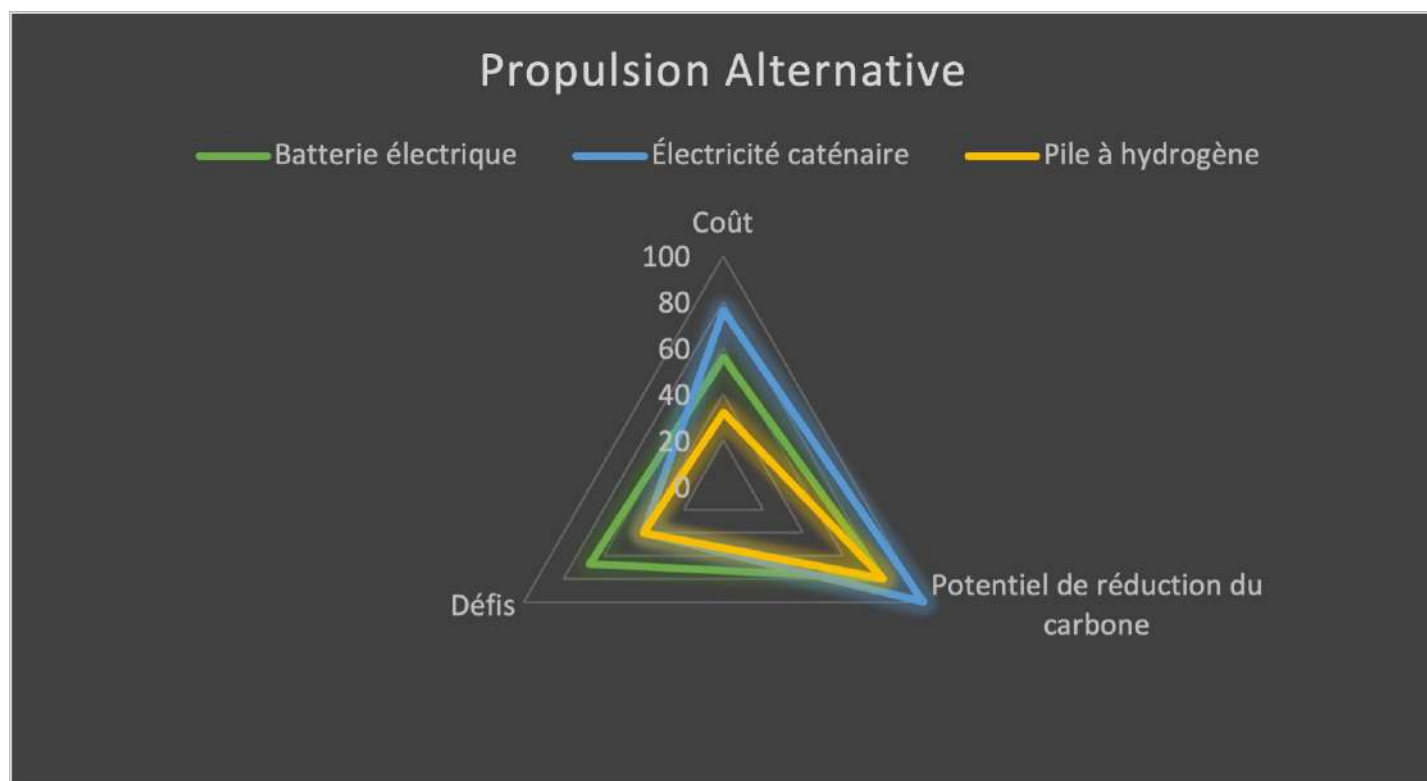


Figure 2: Technologies de propulsion alternative, évaluation comparative

Les technologies de propulsion alternative évoluent, et les notes relatives des technologies évaluées reflètent fortement les niveaux relatifs de maturité. La priorité immédiate dans ce domaine doit être la poursuite du développement et des essais, avec une réévaluation régulière pour comparer les trajectoires respectives de ces technologies. Les piles à hydrogène, les batteries électriques et l'électricité caténaire sont toutes techniquement réalisables pour déplacer tous les types de trains et, en théorie, chacune d'elles pourrait alimenter le réseau ferroviaire nord-américain de l'avenir. Cependant, la ou les technologies « gagnantes » pourraient dépendre des décisions prises par le secteur ferroviaire à court terme, selon la technologie de propulsion qui offre les plus grands avantages globaux à long terme.

20 Biofuels International, 2017. (<https://biofuels-news.com/news/uk-government-introduces-proposals-for-cap-on-crop-based-biofuels/>)

21 DieselNet, 2021. (https://dieselnet.com/tech/fuel_biodiesel_emissions.php)

L'électricité caténaire a la meilleure note globale et le potentiel de réduction du carbone le plus élevé, mais les défis connexes l'emportent sur ceux des batteries électriques. Cela est dû en grande partie au fait que la technologie est mature pour certaines applications et qu'elle est utilisée dans d'autres pays depuis de nombreuses années dans certains cas. Toutefois, étant donné l'urgence de la décarbonisation, cela constitue en soi un avantage évident. Le secteur ferroviaire nord-américain s'est toujours opposé à la propulsion par électricité caténaire, principalement en raison du coût élevé de l'infrastructure requise. Cependant, la position du secteur à cet égard pourrait changer en raison du fait que la société est confrontée à un défi sans précédent avec le changement climatique, qui oblige tous les acteurs à réexaminer soigneusement des options inédites et autrefois discréditées. Le secteur du camionnage, au Canada et à l'étranger, est en train de réexaminer cette question.²²

Les batteries électriques et les piles à hydrogène (hydrail) présentent des défis similaires dans des domaines clés comme la densité énergétique. Du moins à court terme, cette limitation commune nécessiterait l'utilisation de réservoirs de carburant dans les deux cas, chacun devant coûter plus cher que les locomotives elles-mêmes.²³ Sur le plan opérationnel, l'une des principales différences entre les deux technologies est que la charge des batteries est actuellement longue (de 4 à 8 heures) et qu'elle devrait se faire en grande partie pendant le transport (par des caténaires situées à des endroits stratégiques). Même si la capacité des batteries évolue, leur utilisation risque toujours de présenter des enjeux environnementaux majeurs, notamment des problèmes liés à l'exploitation minière dans les pays en développement et à la pénurie potentielle de matières.

Pour sa part, la technologie hydrail est complexe, coûteuse et nouvelle, et elle pose plus d'incertitudes que les batteries électriques. En outre, l'intensité des GES de la production d'hydrogène varie considérablement. Au bas de l'échelle (hydrogène gris – actuellement la méthode de production la plus courante, et de loin), l'hydrogène n'offre que peu ou pas d'avantages sur le plan des GES par rapport au diesel de pétrole. À l'opposé, la production d'hydrogène vert peut être carboneutre si elle est faite avec de l'électricité renouvelable. Toutefois, les coûts de production élevés entraînent actuellement des coûts de carburant élevés pour les utilisateurs finaux.

22 HEC Montréal, 2021 (<https://energie.hec.ca/canada-ehighway/>)

23 Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/ta034_ahluwalia_2020_o.pdf)

3.3 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DU BIODIESEL (B20)

L'évaluation exhaustive de la technologie B20 figure à l'annexe C.

Tableau 4 : Sommaire de l'évaluation de la technologie B20

Technologie	Biodiesel, mélange de 20 % (B20)
Vague de décarbonisation	Carburant alternatif
Description	Le biodiesel est un carburant renouvelable qui peut être fabriqué à partir d'huiles végétales, de graisses animales ou d'huile de cuisson recyclée pour être utilisé dans des véhicules au diesel ou tout autre matériel fonctionnant au diesel. Les propriétés physiques du biodiesel sont similaires à celles du diesel de pétrole, avec quelques exceptions notables, notamment des propriétés inférieures par temps froid et un contenu énergétique réduit. Le terme B20 désigne un mélange de 20 % de biodiesel et de 80 % de diesel de pétrole.
Note d'évaluation	75%
Sommaire de l'évaluation	L'intensité carbone du biodiesel varie considérablement en fonction des matières premières, des pratiques de production et du transport, avec un potentiel de réduction de 20 % à 80 % par rapport au diesel de pétrole lorsqu'il est utilisé sous forme pure. La majeure partie du biodiesel produit en Amérique du Nord offre un potentiel de réduction du carbone au sommet de cette fourchette. Actuellement, le mélange de biodiesel et de diesel de pétrole pour les applications ferroviaires est limité à 5 % (B5) par les garanties de la plupart des fabricants de locomotives (bien que certains autorisent désormais des mélanges allant jusqu'à B20 pour certains moteurs). À ces faibles taux de mélange, le biodiesel est facile à utiliser sans modifications importantes aux véhicules ou aux infrastructures existants, mais il offre peu d'avantages quant à la réduction des émissions. Le biodiesel pur (B100) offre un potentiel important de réduction des GES pour les modes de transport lourd comme le train. Il pose toutefois des difficultés opérationnelles, notamment par temps froid. En outre, l'utilisation généralisée de mélanges plus élevés (B100) nécessiterait une augmentation de la production à un niveau peut-être impossible, principalement en raison de problèmes liés à la sécurité alimentaire et à la limitation des terres arables. Ainsi, l'utilisation du biodiesel à long terme pourrait être limitée à des applications de niche comme les itinéraires sur des lignes à faible volume et de courte distance, où l'utilisation de technologies de propulsion alternative serait prohibitive quant aux coûts, ou pour remplacer le diesel de pétrole dans les compositions bimodes complétées par une technologie de propulsion à émission zéro. À court et moyen terme, il est intéressant comme carburant de transition pour toutes les applications ferroviaires. Pour les raisons susmentionnées, cette évaluation est axée sur l'utilisation du B20.

Tableau 5 : Note d'évaluation du B20

	COÛT				POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE		DÉFIS		
	Développement	Mise en œuvre – Coût en capital	Mise en œuvre – Infrastructure	Exploitation	Potentiel de réduction	Adoption/ Applicabilité	Exploitation	Ravitaillement	Sécurité et conformité réglementaire
NOTE	5					5			
		4	4				4	4	4
				3					
					2				
Pondération	6,7%	6,7%	6,7%	13,3%	16,7%	16,7%	11,1%	11,1%	11,1%
	76% (25,4/33,3)				70% (23,3/33,4)		80% (26,6/33,3)		

3.4 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DU DIESEL RENOUVELABLE PRODUIT PAR HYDROGÉNATION (DRPH)

L'évaluation exhaustive de la technologie DRPH30 figure à l'annexe D.

Tableau 6 : Sommaire de l'évaluation du DRPH30

Technologie	Diesel renouvelable produit par hydrogénation (DRPH, mélange de 30 %)
Vague de décarbonisation	Carburant alternatif
Description	Le DRPH est un diesel renouvelable produit par l'hydrotraitement de matières premières à base de graisse ou d'huile similaires à celles utilisées dans la production de biodiesel (p. ex., soja, canola). D'autres procédés de production utilisant différentes matières premières lignocellulosiques, comme les résidus agricoles et forestiers, sont en cours de développement mais n'en sont encore qu'à leurs débuts. Ayant une très grande similarité chimique avec le diesel de pétrole, le DRPH est plus proche d'un carburant pur que le biodiesel.
Note d'évaluation	70%
Sommaire de l'évaluation	Malgré son fort potentiel de réduction des GES et sa compatibilité avec le matériel et l'infrastructure ferroviaires existants, la disponibilité du DRPH devrait demeurer limitée par la faible disponibilité des matières premières (cultures alimentaires et non alimentaires et déchets appropriés riches en triglycérides), l'immaturité des procédés de production utilisant des matières premières alternatives (p. ex., résidus agricoles et forestiers) ou le manque de capacité de production au Canada. Ces contraintes, ainsi que la concurrence pour le DRPH provenant d'autres applications de diesel lourd, risquent de limiter l'utilisation du DRPH dans les applications ferroviaires (empêcher le remplacement en gros du diesel de pétrole par le DRPH). De plus, le manque de disponibilité du DRPH crée une disparité de prix inacceptable avec le diesel de pétrole. Pour ces raisons, la présente évaluation est axée sur l'utilisation de mélanges à 30 % de DRPH (DRPH30).

Tableau 7 : Note d'évaluation du DRPH30

		COÛT			POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE		DÉFIS		
NOTE	Développement	Mise en œuvre – Coût en capital	Mise en œuvre – Infrastructure	Exploitation	Potentiel de réduction	Adoption/ Applicabilité	Exploitation	Ravitaillement	Sécurité et conformité réglementaire
		5	5			5			
	4						4		4
				2	2			2	
Pondération	6,7%	6,7%	6,7%	13,3%	16,7%	16,7%	11,1%	11,1%	11,1%
72% (24,1/33,3)				70% (23,3/33,4)		67% (22,2/33,3)			

3.5 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DE LA BATTERIE ÉLECTRIQUE

L'évaluation exhaustive de la batterie électrique figure à l'annexe E.

Tableau 8 : Sommaire de l'évaluation de la batterie électrique

Technologie	Batterie électrique
Vague de décarbonisation	Propulsion alternative
Description	Les trains alimentés par batterie sont des rames et des locomotives électriques qui transportent des batteries afin de fournir une puissance de traction pour une utilisation en service. Le système de traction d'un train alimenté par batterie est fondé sur celui d'un train électrique, mais avec l'ajout d'une batterie de stockage embarquée, de convertisseurs de puissance et d'une gestion de la température de la batterie au besoin.
Note d'évaluation	68%
Sommaire de l'évaluation	Bien que la technologie de propulsion électrique à batterie soit techniquement mature et déjà commercialement disponible pour les trains de banlieue et les applications de triage, il faut davantage de RD&D pour en faire une option réalisable pour les services ferroviaires de grande ligne. Les principaux objectifs de la RD&D sont la réduction du poids et de la taille des batteries, la réduction des temps de charge, la mise en place d'une infrastructure de charge optimale pour divers scénarios d'utilisation et de triage, l'évaluation de la dégradation des batteries en cas d'utilisation prolongée, l'amélioration de l'efficacité globale des trains pour réduire la demande sur les batteries et la réduction du coût des batteries. Des progrès considérables dans tous ces domaines sont prévus d'ici 2030 et, d'ici 2035, la propulsion électrique à batterie pourrait être possible pour le service de fret de grande ligne partout en Amérique du Nord.

Tableau 9 : Note d'évaluation de la batterie électrique

		COÛT				POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE		DÉFIS		
NOTE	Pond- ération	Développ- ement	Mise en œuvre – Coût en capital	Mise en œuvre – Infrastru- cture	Mise en œuvre – Infrastru- cture	Potentiel de réduction	Adoption/ Applica- bilité	Exploiti- ation	Ravitail- lement	Sécurité et conformité réglemen- taire
						5				
					4			4		
		3					3		3	3
				2						
			1							
		6,7%	6,7%	6,7%	13,3%	16,7%	16,7%	11,1%	11,1%	11,1%
56% (18,7/33,3)					80% (26,7/33,4)		67% (22,2/33,3)			

3.6 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DE L'ÉLECTRICITÉ CATÉNAIRE

L'évaluation exhaustive de l'électricité caténaire figure à l'annexe F.

Tableau 10 : Sommaire de l'évaluation de l'électricité caténaire

Technologie	Électricité caténaire (électrification de la ligne aérienne ; système de contact aérien)
Vague de décarbonisation	Propulsion alternative
Description	Les systèmes électriques caténaires ferroviaires sont des lignes électriques aériennes suspendues qui alimentent les locomotives électriques ou les unités de puissance (UEM) par l'intermédiaire d'un pantographe.
Note d'évaluation	72%
Sommaire de l'évaluation	La propulsion électrique caténaire est techniquement réalisable et mature pour tous les types de transport ferroviaire. De toutes les options évaluées, l'électricité caténaire offre les avantages les plus importants et les plus évidents en matière de GES, car son utilisation reflète l'intensité carbone du réseau électrique, le Canada étant un chef de file mondial à cet égard. Cependant, des défis importants (potentiellement prohibitifs) sont liés au déploiement de l'infrastructure caténaire. Les coûts par kilomètre de voie électrifiée devraient s'élever en moyenne à 2 millions de dollars, et les modifications de l'infrastructure ferroviaire existante (tunnels, ponts, voies d'évitement et gares de triage) seront importantes et coûteuses. Des modifications considérables aux pratiques d'exploitation, notamment ne plus utiliser des wagons à deux niveaux et augmenter la capacité de gestion de l'électricité, seraient également nécessaires. L'utilisation de systèmes caténaires permettrait au secteur ferroviaire d'éviter complètement la concurrence pour les technologies et les produits faibles en carbone très recherchés, comme les batteries, le carburant et le matériel à base d'hydrogène, et les biocarburants, alors que d'autres modes de transport et secteurs économiques s'empressent de se décarboniser. Aucune autre mesure de propulsion ne présente autant d'avantages et d'inconvénients. En fin de compte, l'utilisation potentielle des caténaires pourrait être limitée aux lignes ferroviaires très fréquentées, et complétée par d'autres technologies de propulsion faibles en carbone sur d'autres lignes.

Tableau 11 : Note d'évaluation de l'électricité caténaire

	COÛT				POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE		DÉFIS		
	Développement	Mise en œuvre – Coût en capital	Mise en œuvre – Infrastructure	Exploitation	Potentiel de réduction	Adoption/ Applicabilité	Exploitation	Ravitaillement	Sécurité et conformité réglementaire
NOTE				5	5	5			
	4	4							
							2	2	2
			1						
Pondération	6,7%	6,7%	6,7%	13,3%	16,7%	16,7%	11,1%	11,1%	11,1%
	76% (25,3/33,3)				100% (33,4/33,4)		40% (13,3/33,3)		

3.7 SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DE LA PILE À HYDROGÈNE

L'évaluation exhaustive de la pile à hydrogène figure à l'annexe G.

Tableau 12 : Sommaire de l'évaluation de la pile à hydrogène

Technologie	Pile à hydrogène (HFC)
Vague de décarbonisation	Propulsion alternative
Description	Les trains fonctionnant à l'hydrogène sont des rames électriques qui transportent de l'hydrogène, des piles à combustible et des batteries afin de fournir une puissance de traction.
Note d'évaluation	51%
Sommaire de l'évaluation	Il faudra relever d'importants défis techniques, financiers et réglementaires avant que cette technologie soit viable pour toutes les applications ferroviaires au Canada. Avec une disponibilité suffisante d'électricité renouvelable pour la production d'hydrogène vert et une augmentation significative de la future production de systèmes HFC lourds, l'hydraul devrait atteindre la parité des coûts avec les locomotives au diesel pour les applications de transport de passagers et de triage à long terme. Cependant, son coût ne devrait pas être concurrentiel à celui du diesel pour le transport de marchandises, quel que soit le scénario (en grande partie la nécessité d'avoir des réservoirs en raison de la faible densité énergétique volumétrique de l'hydrogène). Le potentiel de réduction des GES de l'hydrogène dépend de la méthode de production et de l'intensité carbone des réseaux électriques locaux, avec des variations importantes du potentiel des différentes méthodes. Bref, en raison de sa nature nouvelle et complexe, l'hydraul pose de nombreuses incertitudes.

Tableau 13 : Note d'évaluation de la pile à hydrogène

	COÛT				POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE		DÉFIS		
	Développement	Mise en œuvre – Coût en capital	Mise en œuvre – Infrastructure	Exploitation	Potentiel de réduction	Adoption/ Applicabilité	Exploitation	Ravitaillement	Sécurité et conformité réglementaire
NOTE					5				
			3			3	3		
	2								2
		1		1				1	
Pondération	6,7%	6,7%	6,7%	13,3%	16,7%	16,7%	11,1%	11,1%	11,1%
	32% (10,7/33,3)				80% (26,7/33,4)		40% (13,3/33,3)		

4. ÉLABORATION D'UNE FEUILLE DE ROUTE

4.1 FEUILLE DE ROUTE TECHNOLOGIQUE

La section 3 présentait le concept de vagues technologiques alignées sur le calendrier des objectifs du Canada pour 2030 et 2050. La Feuille de route s'inspire de ce concept, mais avec un chevauchement important entre les vagues.

► **Vague 1 : L'efficacité s'aligne sur le court terme:** De nombreuses mesures de cette catégorie sont actuellement utilisées dans le secteur ferroviaire, et de nouvelles mesures d'efficacité continueront d'être développées.

Les mesures d'efficacité doivent continuer à être exploitées à pleine capacité afin de réduire l'énergie globale requise pour alimenter les trains. Cela permettra de réduire les défis associés à toutes les autres options technologiques de décarbonisation. Les mesures particulièrement prometteuses pour la poursuite de la mise en œuvre et de la RD&D sont entre autres l'allègement et l'amélioration de l'aérodynamisme des locomotives et des wagons, les outils d'optimisation des données et les logiciels de gestion de l'énergie (p. ex. Trip Optimizer, Wi-Tronix, ALTRIOS), le stockage d'énergie et le freinage par récupération à bord, l'utilisation de groupes auxiliaires de bord avec des systèmes automatiques de démarrage et d'arrêt du moteur (AESS), les stratégies et la formation sur l'efficacité énergétique, les technologies de gestion et de contrôle de l'énergie distribuée, la mise à niveau de l'injection de carburant commune et des systèmes de contrôle, l'automatisation accrue des ports et des plateformes d'expédition, et la modernisation ou le remplacement des moteurs au diesel de niveau inférieur. Toutes les mesures d'efficacité nécessitent une RD&D au Canada avant une mise en œuvre à grande échelle, car les affirmations des fabricants au sujet de l'efficacité doivent être validées et la performance par temps froid doit être vérifiée.

► **Vague 2 : Les carburants alternatifs s'alignent sur le moyen terme:** Ils sont actuellement utilisés dans des taux de mélange faibles. La technologie permettant d'utiliser des taux de mélange plus élevés est en cours de développement et devrait être commercialisée dans le contexte des applications ferroviaires d'ici 2030.

La mise à l'essai du biodiesel dans des mélanges de 5 % à 20 % devrait être une priorité immédiate. Cela nécessitera des partenariats entre les fabricants de locomotives et les compagnies de chemin de fer pour évaluer les exigences de maintenance accrues, les modifications apportées aux moteurs et les capacités opérationnelles, ce qui comprend les opérations par temps froid.

Alors que la disponibilité du DRPH augmente, les essais et le développement devraient être axés sur le DRPH30. Le DRPH30 peut être mélangé au biodiesel pour augmenter la teneur globale en carburant renouvelable, et ces deux carburants alternatifs peuvent être

utilisés avec des options de propulsion alternative, comme indiqué ci-dessous.

► **Vague 3 : La propulsion alternative s'aligne sur le long terme:** Bien que certaines options de propulsion alternative soient déjà utilisées, leur disponibilité commerciale à grande échelle pour toutes les applications ferroviaires canadiennes n'est pas prévue avant 2030.

En raison de leurs zones d'exploitation limitées et de leurs cycles de service plus faciles à gérer, les locomotives de manœuvre utilisées dans les gares de triage sont une excellente occasion de tester des technologies de propulsion alternative. Elles devraient être au cœur des démonstrations pour tester la durabilité, l'infrastructure de ravitaillement et de charge, la performance et les coûts. Cela aurait l'avantage supplémentaire d'aider à résoudre les problèmes locaux de qualité de l'air près des gares de triage, ce qui, comme le précise la section 15.4, devrait avoir des effets bénéfiques sur la santé et le bien-être des résidents des environs, dont un nombre disproportionné sont des Canadiens racialisés et à faible revenu. Les gares de triage sont également l'endroit idéal pour obtenir de l'information afin d'élaborer des codes et des normes de sécurité plus stricts (p. ex. la conception des réservoirs de stockage, l'affinement des règles et des directives relatives à la surveillance des fuites, des flammes, des chocs électriques, etc., et la formation sur la manière d'agir à proximité de l'hydrogène et du matériel électrique à haute tension).

Une fois les preuves faites dans ce contexte, les essais devraient être étendus et déployés pour des applications plus énergivores. Les trains-blocs sont une étape intermédiaire utile, car l'infrastructure de soutien requise serait limitée à une zone géographique plus restreinte.

Les trois options de propulsion alternative (batterie électrique, électricité caténaire et pile à hydrogène) doivent également être testées pour des applications de transport sur voie principale. Le transport de marchandises représente 93 % des émissions ferroviaires au Canada et pose le plus grand nombre de défis, de sorte que toute technologie pouvant être efficace dans le contexte du transport sur voie principale sera également applicable aux chemins de fer d'intérêt local et de voyageurs. Les options bimodes sont une autre étape intermédiaire appropriée vers l'exploitation complète des voies principales.

Les options bimodes combinent deux technologies de propulsion afin de réduire davantage ou d'éliminer l'utilisation de diesel de pétrole. En raison des limites inhérentes aux carburants et aux technologies de propulsion alternative, les options bimodes devraient être nécessaires au moins jusqu'en 2050, voire au-delà, pour certaines applications.

COMBINAISON DU CARBURANT ALTERNATIF ET DE LA PROPULSION ALTERNATIVE

Alors que les technologies de propulsion alternative continuent à évoluer, l'utilisation de rames bimodes (trains à unités multiples comprenant des locomotives traditionnelles et des locomotives électriques ou à hydrogène) sera probablement nécessaire. La disponibilité des biocarburants est limitée et, bien que les technologies de propulsion alternative soient prometteuses, elles ne peuvent pas encore alimenter entièrement la plupart des trains canadiens, ou il faudra du temps pour les mettre en place. À court et à moyen terme, la combinaison des technologies de combustion et électriques peut permettre de tirer pleinement profit des deux, tout en minimisant les limites liées à la puissance, aux coûts et à l'infrastructure.

Les biocarburants pourraient donc jouer un rôle clé à long terme dans la décarbonisation du secteur ferroviaire, grâce à leur utilisation en bimode avec l'une des trois principales technologies de propulsion alternative. Ces trains bimodes pourraient être utiles sur les lignes à faible trafic où la propulsion alternative autonome n'est pas économiquement viable. Ils pourraient combler des lacunes là où les options de propulsion alternative sont moins favorables, notamment dans les gares de triage. Ils serviraient de solution de secours en cas de panne de courant ou de disponibilité limitée de carburant. Finalement, dans le cas de l'électricité caténaire, ils pourraient réduire les améliorations requises à l'infrastructure comme les tunnels et les ponts. Les trains bimodes qui combinent la propulsion alternative et le biocarburant (mélangé ou pur) permettent de surmonter certains des obstacles actuels à la propulsion alternative, soit:

- ▶ Pour l'électricité caténaire, les trains pourraient fonctionner à l'électricité dans les corridors à forte fréquentation où c'est plus économique et plus pratique/logistique, et au biocarburant (mélangé ou pur) dans les zones où les caténaires sont difficiles à installer ou lorsque les niveaux de trafic ne le justifient pas sur le plan économique.
- ▶ Dans le cas d'une batterie ou d'une pile à hydrogène, si elle est utilisée dans un train avec des locomotives fonctionnant au biocarburant, le carburant pourrait augmenter la puissance nécessaire pour faire circuler des trains plus lourds et pourrait permettre à la locomotive d'atteindre les postes de ravitaillement et de charge, éliminant ainsi les préoccupations liées à l'autonomie et réduisant la demande pour les réservoirs.

La combinaison des biocarburants et de la propulsion alternative permettrait aux chemins de fer de tirer profit des avantages des biocarburants dans les limites de la disponibilité et permettrait également de réduire les émissions de PCA dans les zones plus peuplées, notamment à l'intérieur et à proximité des gares de triage et des zones urbaines. Si la combinaison de technologies de propulsion peut être coûteuse et poser certains défis techniques, il importe de noter que les batteries et les réservoirs d'hydrogène coûtent actuellement beaucoup plus cher que les locomotives au diesel qui

utilisent des biocarburants. Les options bimodes pourraient donc être l'option net zéro la plus rentable pour le secteur ferroviaire dans certains scénarios. À tout le moins, elles peuvent permettre d'intégrer de nouvelles technologies au réseau ferroviaire de manière progressive, mesurée et durable.

COMBINAISON DES OPTIONS DE PROPULSION ALTERNATIVE

Toutes les options de propulsion alternative ont des limites inhérentes. En les combinant de manière stratégique, on peut réduire ces limites tout en maximisant les avantages. La combinaison de l'électricité caténaire et des batteries est un excellent exemple de l'optimisation des avantages de deux technologies complémentaires.

Compte tenu des difficultés accrues posées par la construction d'une infrastructure caténaire dans certaines régions (p. ex. sur des portions de voies moins fréquentées ou des terrains difficiles comme les Rocheuses) et avec certains types d'infrastructures existantes (p. ex., les tunnels et les ponts), il est peu probable que l'électricité caténaire puisse à elle seule alimenter l'ensemble du secteur. Cependant, si elle est associée à la technologie des batteries, cette limitation pourrait être réduite ou éliminée. L'électricité caténaire pourrait être utilisée dans les zones à fort trafic, et l'énergie des batteries pourrait être utilisée sur les portions de voie moins fréquentées. En outre, l'alimentation par batterie pourrait être utilisée dans les gares de triage pour répondre aux problèmes de sécurité ou de chargement. Les batteries pourraient être chargées pendant l'alimentation par électricité caténaire et pourraient également capter l'énergie du freinage par récupération. De plus, elles pourraient servir de charge d'alimentation de secours pendant les pannes de courant, afin d'éviter que les trains restent bloqués dans des zones dangereuses ou peu pratiques, et d'assurer que les services essentiels sont maintenus pour les passagers et l'équipage.

La combinaison des piles à hydrogène et de la technologie électrique est moins facilement applicable par train (train bimode), mais il est possible de combiner ces technologies à plus grande échelle (sans option bimode). Par exemple, on pourrait combiner les caténaires sur les voies principales à fort trafic avec l'hydraulique sur les voies courtes à faible trafic. Bien que, dans le contexte actuel, cette solution ne semble pas pouvoir relever les défis aussi efficacement que dans l'exemple ci-dessus, ces technologies évoluent rapidement et, par conséquent, les scénarios d'utilisation connexes évoluent également.

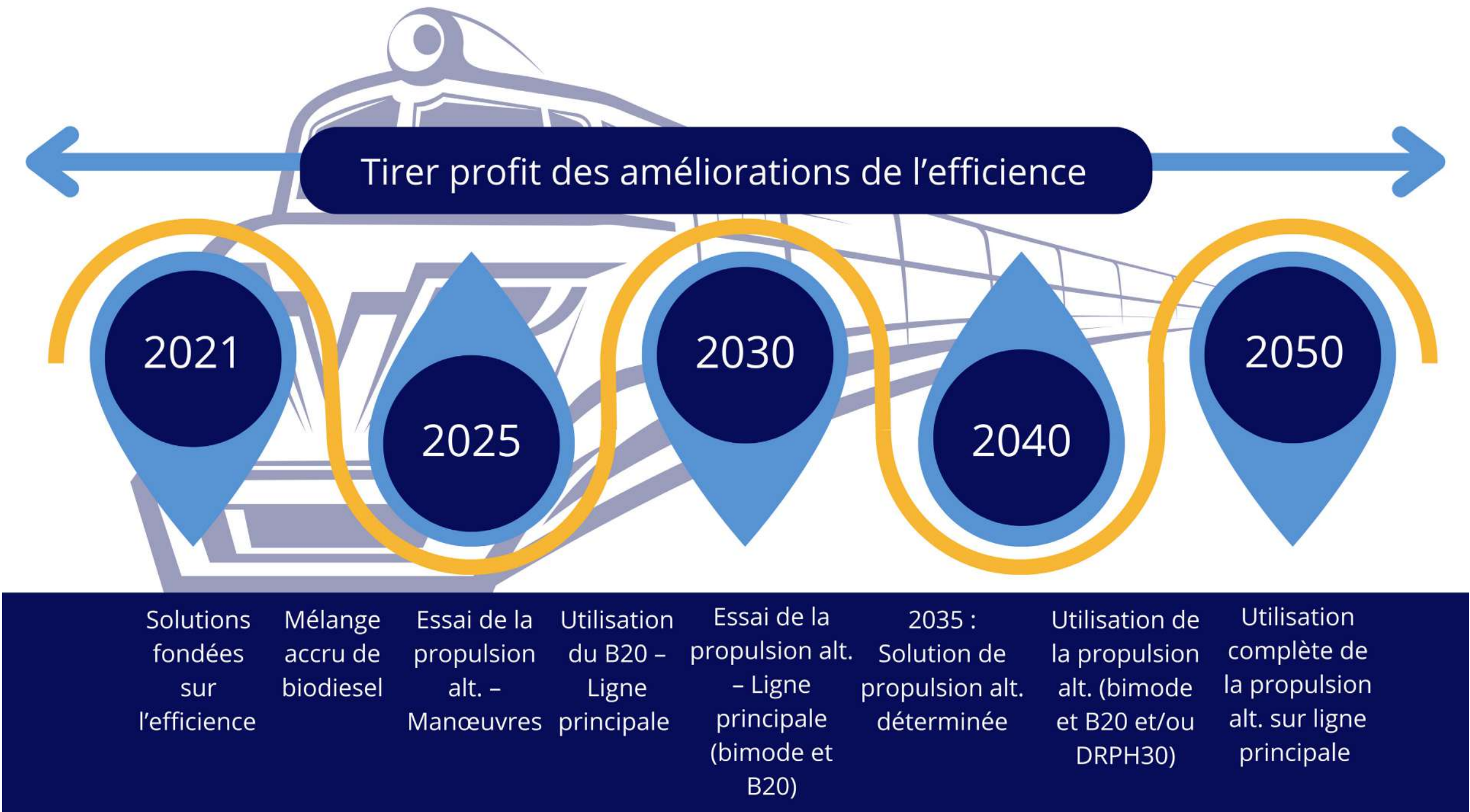
ÉVALUATION CONTINUE REQUISE

Alors que les essais progressent, des évaluations technologiques devraient être effectuées régulièrement – en particulier pour chacune des trois options de propulsion alternative. Alors que chacune de ces technologies évolue et peut être testée dans le contexte canadien/nord-américain, les notes globales de chacune d'elles changeront. Cela s'applique particulièrement aux technologies moins matures. Les trajectoires relatives des trois technologies peuvent être comparées les unes aux autres afin de déterminer quelles options sont les plus prometteuses pour décarboniser le secteur ferroviaire.

La Figure 3 présente une voie technologique de haut niveau pour la décarbonisation du secteur ferroviaire.

Figure 3: Voie vers la décarbonisation du secteur ferroviaire

Voie vers la décarbonisation du secteur ferroviaire



4.2 CONSIDÉRATIONS NON LIÉES À LA TECHNOLOGIE

Si la faisabilité technique est un élément clé de la voie vers la décarbonisation du secteur ferroviaire, la conception de cette voie doit tenir compte de critères supplémentaires, notamment des considérations économiques et pratiques.

4.2.1 MODÈLES DE COÛT CHANGEANTS

Jusqu'à présent, la décarbonisation du secteur ferroviaire repose largement sur l'amélioration du rendement énergétique. Cette approche comprend des mesures visant à améliorer les pratiques d'exploitation, à mettre en œuvre des technologies d'économie de carburant, à remettre à neuf des locomotives et des wagons existants et à acheter des trains plus efficaces sur le plan énergétique, notamment des locomotives de catégorie 4 et des wagons de nouvelle génération.

Le modèle de coût lié à l'amélioration du rendement énergétique dépend des investissements des fabricants (pour développer la technologie) et des chemins de fer (pour tester, acheter et installer la technologie), qui sont récupérés respectivement par les ventes et les économies d'exploitation. Les mesures d'amélioration du rendement énergétique réduisent les coûts d'exploitation et génèrent des économies pour les chemins de fer.

Le profil des coûts évoluera alors que le secteur ferroviaire dépassera les améliorations de l'efficacité pour passer à une décarbonisation croissante du carburant et à la mise en œuvre de technologies de propulsion alternative. Les coûts de développement et de mise en œuvre peuvent augmenter au-delà de ce que l'on peut raisonnablement espérer récupérer, et il peut y avoir des coûts d'exploitation supplémentaires plutôt que des économies. Cela souligne la nécessité d'un profil de partage des coûts (ou un modèle de coût) différent de celui observé par le passé.

OPTIONS DE FINANCEMENT DU DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE

Les acteurs potentiels sont les instituts de recherche universitaires ou publics, les fabricants et les chemins de fer, mais il n'existe pas de modèle de collaboration entre ces parties, de sorte que les coûts de développement peuvent être supportés par n'importe laquelle d'entre elles. Si les coûts de développement sont très élevés, cela peut constituer un obstacle insurmontable au développement efficace d'une mesure de décarbonisation donnée, même si elle est considérablement prometteuse.

Les trois exemples suivants pour développer la technologie des piles à hydrogène pour les applications ferroviaires indiquent qu'il n'existe pas d'approche uniforme pour financer le développement de la technologie ferroviaire au palier national.

Financement par l'industrie***Locomotive de ligne à pile à hydrogène (CP)***

Le Canadien Pacifique (CP) a récemment annoncé qu'il prévoit moderniser une locomotive de ligne diesel-électrique existante avec des modules de piles à hydrogène achetés à Ballard Power Systems. Une fois la locomotive opérationnelle (d'ici la fin de 2022), le CP prévoit « faire des essais de service et des tests de qualification afin d'évaluer l'état de préparation de la technologie pour le secteur du fret ferroviaire ». Sa vision à plus long terme est de s'associer à un fabricant pour produire des locomotives, qui pourraient être achetées par d'autres chemins de fer.²⁴

En novembre 2021, le CP a annoncé qu'il élargirait son programme de locomotives à hydrogène en rénovant deux locomotives supplémentaires pour les manœuvres, et en installant une usine d'électrolyse à sa gare de triage de Calgary et une unité de production d'hydrogène par vaporeformage à sa gare de triage d'Edmonton. Cela est en partie possible par une subvention de contrepartie de 15 millions de dollars du gouvernement de l'Alberta.²⁵

Financement par le gouvernement***Locomotive de manœuvre à pile à hydrogène (ECCC)***

Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) a engagé une société d'ingénierie, en partenariat avec des spécialistes de la révision et de la remise à neuf du matériel ferroviaire, un fabricant de piles à hydrogène et un consultant en efficacité énergétique du domaine des transports, pour évaluer la possibilité de moderniser une locomotive de manœuvre au diesel afin d'utiliser des piles à hydrogène comme moteur principal. Sans obstacle important, les recommandations connexes consistaient à s'associer à l'industrie et à d'autres intervenants clés pour rendre la technologie commerciale.²⁶

24 Railway Age, 2021 (<https://www.railwayage.com/mechanical/locomotives/cp-hydrogen-locomotive-pilot-powered-by-ballard/>)

25 CP, 2021. (<https://www.cpr.ca/en/media/canadian-pacific-expands-hydrogen-locomotive-program-to-include-additional-locomotives-fueling-stations-with-emissions-red>)

26 Change Energy Services, 2020 (<https://tcdocs.ingeniumcanada.org/sites/default/files/2020-08/Assessment%20of%20the%20Design%2C%20Deployment%20Characteristics%20and%20Requirements%20of%20a%20Hydrogen%20Fuel%20Cell%20Powered%20Switcher%20Locomotive.pdf>)

Collaboration du milieu universitaire et de l'industrie avec un financement du gouvernement***Locomotive de manœuvre à pile à hydrogène et batterie lithium-ion (UBC & SRY)***

Financé en partie par une subvention d'engagement du CRSNG, l'École d'ingénierie du Campus de l'Okanagan de l'Université de la Colombie-Britannique (UBC) a travaillé avec le Southern Railway of British Columbia (SRY) pour évaluer le potentiel d'adaptation d'une locomotive de manœuvre à une unité hybride comprenant une pile à hydrogène et une batterie lithium-ion. Cela comprenait notamment l'examen de la performance des systèmes d'alimentation proposés en fonction de la dynamique des charges typiques, et l'évaluation de la dimension des différents sous-systèmes par rapport au châssis de la locomotive existante. C'était la première étape d'une étude à phases multiples.

Dans des juridictions nord-américaines autres que le Canada, les modèles de développement technologique reposent fortement sur le financement gouvernemental et sur la collaboration:

- ▶ Sierra Northern Railway, un chemin de fer d'intérêt local qui exploite 120 km de voies dans le nord de la Californie, a reçu près de 4 millions de dollars de la California Energy Commission (CEC) pour construire et tester une locomotive de manœuvre à pile à hydrogène. Il travaille en partenariat avec GTI Energy, Railpower Tech LLC, Ballard Power Systems, Optifuel Systems LLC, UC Davis Institute of Transportation Studies, Valley Vision, Velocity Strategies, Southern California Gas Co. et le Sacramento Metropolitan Air Quality Management District.²⁷
- ▶ Dans le cadre d'une subvention de 22,6 millions de dollars US accordée à BNSF Railway et au San Joaquin Valley Air Pollution Control District par le California Air Resource Board, BNSF Railway s'associe à Wabtec pour tester sa locomotive électrique à batterie FLXdrive sur un train hybride à batterie. BNSF s'est associé à Wabtec pour le développement de la locomotive, qui comprend un système global de gestion de l'énergie et un système de stockage de l'énergie à bord.

²⁷ Sierra Northern, 2021. (<http://sierranorthern.com/news/articles/california-energy-commission-awards-sierra-northern-railway-team-nearly-4-000-000-to-build-and-test-hydrogen-switcher-locomotive/>)

Le modèle de décarbonisation des chemins de fer actuel – les fabricants développent et vendent la technologie aux chemins de fer – n'est peut-être pas durable pour les mesures de décarbonisation à coût et à potentiel élevés. Comme les options de décarbonisation profonde démontrées sont précommerciales et que les taux d'adoption par le marché sont incertains, le modèle traditionnel, axé sur les fabricants, est moins applicable. Les fabricants auront besoin de partenaires pour développer et démontrer les technologies émergentes et leur apporter un soutien financier, de manière à prouver leur efficacité avant d'augmenter la production. Les compagnies ferroviaires devraient avoir besoin d'un soutien financier pour mettre en œuvre les technologies une fois qu'elles seront commercialisées, car les économies d'exploitation ne devraient pas couvrir les coûts initiaux.

OPTIONS DE FINANCEMENT POUR LA MISE EN ŒUVRE DES TECHNOLOGIES

Dans le contexte des améliorations de l'efficacité, qui constituent l'essentiel des activités de décarbonisation à ce jour, les coûts sont généralement supportés par les compagnies ferroviaires lorsqu'elles remplacent ou remettent en état le matériel et les infrastructures ou prennent des mesures d'efficacité. Comme l'indique la section 4.1, qui traite de l'élaboration de nouvelles mesures de décarbonisation, ce modèle de coût pourrait devoir être ajusté en fonction des coûts additionnels nettement plus élevés, en particulier pour les locomotives électriques ou à hydrogène et l'infrastructure de charge/ravitaillement respective requise. Il s'agit principalement d'une question de calendrier : si une décarbonisation profonde du secteur ferroviaire doit se produire dans les délais requis pour soutenir l'objectif de la carboneutralité du Canada, les compagnies ferroviaires auront probablement besoin de partenaires financiers.

TIRER PROFIT DES PARTENARIATS

Comme nous l'avons mentionné, il faut adopter un profil de partage des coûts (modèle de coût) différent de celui qui a été utilisé par le passé. Les gouvernements en particulier ont un rôle à jouer en matière de partage des coûts, surtout pour l'infrastructure partagée à longue durée de vie qui offrira des avantages considérables pour l'environnement et l'économie du Canada. Le secteur ferroviaire offre un moyen peu coûteux d'expédier des produits en vrac essentiels qui contribuent à stimuler les marchés d'exportation du Canada et à maintenir un faible coût de la vie pour les consommateurs canadiens. Le soutien du gouvernement à l'infrastructure ferroviaire est justifié compte tenu du rôle vital qu'elle joue dans l'économie canadienne.

Le soutien du gouvernement au secteur ferroviaire, et au transport de marchandises d'une manière plus générale, peut prendre diverses formes. Le plan climatique mis à jour en 2020, *Un environnement sain et une économie saine*²⁸ note qu'un rôle clé que le gouvernement peut jouer pour verdir le secteur des véhicules lourds consiste en soutenant le développement technologique par la R&D, mais aussi en soutenant des projets pilotes et la mise en œuvre de solutions commercialement prêtes dans tous les

28 ECCC, 2020. (https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/climate-plan/plan_environnement_sain_economie_saine.pdf)

modes de transport, ce qui comprend le transport ferroviaire. En raison de sa grande efficacité, le transport ferroviaire est déjà un mode faible en carbone par rapport à d'autres modes comme le transport routier. Cela signifie que les investissements gouvernementaux dans l'efficacité du secteur ferroviaire auront proportionnellement plus d'impact, car ils peuvent aider à maintenir des taux d'utilisation élevés.

De plus, comme tous les modes de transport se décarbonisent, il existe des synergies potentielles à exploiter dans le développement de l'infrastructure et l'approvisionnement en énergie. Outre le financement de l'infrastructure et de la R&D, le gouvernement doit réunir divers intervenants, de tous les modes de transport, afin de déterminer les avantages mutuels qui pourraient découler de la collaboration en matière de décarbonisation. On ne doit pas sous-estimer le pouvoir rassembleur du gouvernement, car il peut jouer un rôle essentiel en aidant à former des partenariats entre les acteurs du secteur ferroviaire, entre les modes de transport et au-delà des frontières.

4.2.2 INTEROPÉRABILITÉ NORD-AMÉRICAINE

L'interopérabilité dans toute l'Amérique du Nord est une exigence clé. Les chemins de fer nord-américains ont des accords de partage des actifs et de la puissance, et les trains doivent circuler entre le Canada, les États-Unis et le Mexique. Toute solution doit non seulement être applicable de manière égale dans toute l'Amérique du Nord, mais elle doit être décidée conjointement par tous les intervenants nord-américains. Cela souligne la nécessité d'une collaboration étroite entre les chemins de fer nord-américains, ainsi que d'une cohérence des normes et des règlements entre tous les pays.

De plus, les gouvernements pourraient continuer à décarboniser la production d'électricité sur tout le continent. Cela offrirait des avantages en matière de carbone aux trois principaux types de propulsion alternative.

4.2.3 COMPÉTITION POUR LES RESSOURCES ET ENTRE LES MODES

En raison de facteurs comme les politiques gouvernementales agressives en matière de décarbonisation, l'aggravation des effets du changement climatique, la pression exercée par les actionnaires qui cherchent à rendre leurs portefeuilles plus écologiques et à réduire les risques, et l'émergence d'un esprit de durabilité chez le grand public, la course à la décarbonisation s'accélère. Non seulement tous les modes de transport adoptent de plus en plus des solutions faibles en carbone, mais d'autres secteurs économiques le font également. Cette course vers la décarbonisation risque de créer des goulots d'étranglement à court et moyen terme dans la production et l'offre de produits renouvelables à faible teneur en carbone.

L'hydrogène, par exemple, est non seulement utile dans les applications de piles à combustible pour alimenter les véhicules, mais il est recherché comme matière première dans le raffinage du pétrole et des métaux, ainsi que dans la production d'ammoniac, d'engrais et de méthanol. L'hydrogène émerge également comme un combustible potentiel faible en carbone dans des domaines comme le chauffage des locaux et de

l'eau, la production d'électricité et le stockage de l'énergie. De façon similaire, les batteries ayant une densité d'énergie relativement élevée et une bonne performance de charge-décharge, comme celles basées sur la chimie lithium-ion, ne sont pas seulement utiles dans les applications de transport, mais aussi dans le stockage de l'énergie à l'échelle des bâtiments et des réseaux, et dans une vaste gamme de produits électroniques grand public et industriels.

Si le secteur ferroviaire veut progresser sur la voie de la décarbonisation de la manière la plus rapide possible, il peut être avisé d'éviter autant que possible la concurrence avec les autres modes de transport et secteurs économiques pour les technologies et les carburants.

En plus de la disponibilité des ressources, un autre facteur à prendre en compte est la rapidité de la décarbonisation dans les modes de transport avec lesquels le secteur ferroviaire est en concurrence, principalement le camionnage. Si la majeure partie du camionnage reste tributaire du diesel de pétrole à forte intensité carbone, ce secteur renouvelle ses actifs beaucoup plus rapidement que le secteur ferroviaire (tous les 10 à 15 ans par rapport à 30 à 50 ans), et les solutions à faible intensité carbone qui ont déjà été commercialisées pour les petits véhicules deviennent maintenant viables pour les camions de marchandises. Ainsi, le secteur du camionnage a un délai potentiel de décarbonisation beaucoup plus court. Du point de vue des expéditeurs qui, comme d'autres acteurs, sont soumis à une pression croissante pour décarboniser leurs opérations, la proposition de valeur du camionnage augmentera alors que son intensité carbone diminuera.



Ces facteurs peuvent menacer la rentabilité du secteur ferroviaire à l'avenir sans mesures décisives qui le mettront sur une trajectoire de décarbonisation claire.

4.2.4 ÉQUITÉ SOCIALE

Des études évaluées par des pairs démontrent qu'il existe des disparités importantes en matière d'exposition aux gaz d'échappement des moteurs au diesel parmi les résidents vivant à proximité des grandes gares de triage. En outre, des recherches démontrent qu'un nombre disproportionné de ces résidents appartiennent à des minorités ethniques et sont des ménages à faible revenu. Bien que cette étude soit axée sur la décarbonisation, la plupart des mesures présentées ici devraient également réduire les émissions de PCA provenant des opérations ferroviaires, ce qui comprend les gares de triage.²⁹ Parallèlement, certaines mesures ont le potentiel d'augmenter au moins la perception du risque, et peut-être le niveau global de risque dans les gares de triage et près de celles-ci, pour les travailleurs et les résidents, en raison de la nature novatrice de certaines technologies. De nombreuses industries utilisent depuis longtemps des batteries à haute densité, des systèmes électriques à haute tension et de l'hydrogène d'une manière qui s'est avérée très sécuritaire. Toutefois, l'utilisation de ces technologies dans le secteur ferroviaire canadien n'a pas été testée, ce qui peut augmenter la perception des risques. Des consultations et des campagnes de sensibilisation soutenues par les secteurs public et privé devraient être des éléments clés du déploiement des technologies de propulsion alternative. Ces efforts pourraient être axés sur le transfert de connaissances d'autres industries, permettant de vérifier que les membres du secteur ferroviaire prennent des mesures d'atténuation des risques appropriées. La participation du milieu universitaire peut également servir à fournir des points de vue indépendants, à faire une recherche novatrice et, de manière générale, à donner de la crédibilité aux mesures de décarbonisation prises.

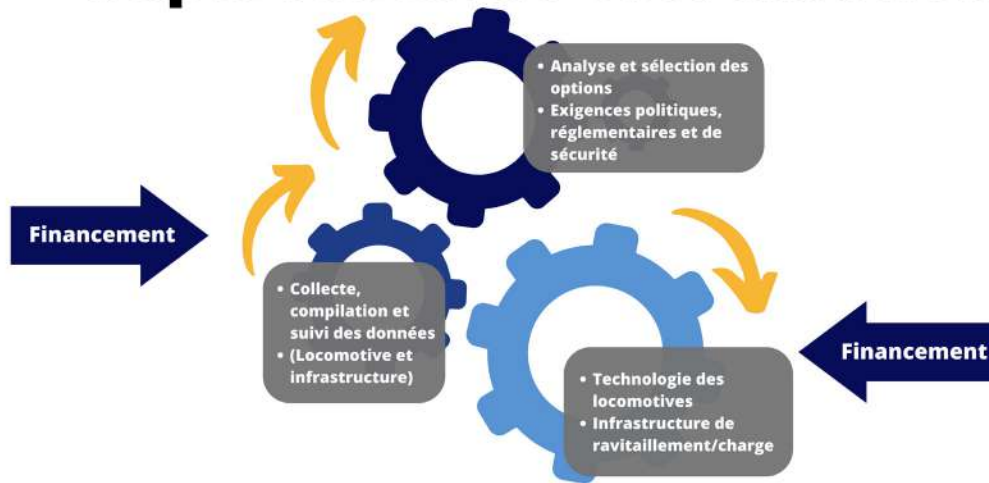
4.3 FEUILLE DE ROUTE DE LA DÉCARBONISATION DU SECTEUR FERROVIAIRE: PLAN DE MISE EN ŒUVRE

La Feuille de route de la décarbonisation indique des voies technologiques potentielles pour la décarbonisation du secteur ferroviaire, ainsi que des considérations non liées à la technologie. La poursuite de ces voies nécessitera une collaboration entre tous les principaux groupes d'intervenants. Les domaines de collaboration sont décrits à la section 4.3.1, et les rôles des principaux groupes d'intervenants sont précisés dans le Plan de travail, à la section 4.3.2.

Les recommandations sur les prochaines étapes figurent à la section 4.3.3.

²⁹ Mise en garde : Comme l'indique la section 9, l'utilisation de biodiesel peut augmenter les émissions de NOx, et le biocarburant peut donc être limité dans les régions densément peuplées à l'avenir.

Supervision et Coordination



4.3.1 ÉLÉMENTS CLÉS POUR LA COLLABORATION

TECHNOLOGIE

Des projets pilotes et de démonstration visant à tester des carburants et des technologies de propulsion alternative ont été annoncés et, dans certains cas, sont déjà en cours de réalisation, sous la direction de chemins de fer au Canada et aux États-Unis. Au Canada, le CP a annoncé qu'il va concevoir et construire deux locomotives de ligne à hydrogène (la première en Amérique du Nord) et une locomotive de manœuvre utilisant des piles à combustible et des batteries pour alimenter les moteurs de traction électriques. Le CN a annoncé qu'il s'associait à Wabtec pour mettre en service sa locomotive de marchandises électrique à batterie FLXdrive, la première locomotive de transport lourd fonctionnant entièrement à batterie du pays. VIA Rail remplace sa flotte principale par des trains bimodes pouvant fonctionner soit au diesel, soit à l'électricité caténaire là où elle est disponible.

Les chemins de fer et les fabricants vont recueillir et analyser les données issues de ces essais afin de diriger le développement de chaque technologie. Alors que les technologies progressent, le Cadre d'évaluation devrait être réappliqué à intervalles réguliers. L'évolution des notes permettra de les trajectoires de chacune des technologies au cours de leur évolution. Les données des projets pilotes de toute l'Amérique du Nord doivent être prises en compte, étant donné les différences géographiques et climatiques.

Compte tenu des exigences d'infrastructure considérables pour les technologies de propulsion alternative, et de l'interopérabilité des chemins de fer partout en Amérique du Nord, il est essentiel d'avoir un certain degré d'alignement entre les chemins de fer de classe 1 exploités au Canada, aux États-Unis et au Mexique. Cependant, la concurrence, la confidentialité des entreprises et les informations exclusives peuvent limiter ce qui peut être partagé. Aussi, **l'alignement des politiques canadiennes et américaines est nécessaire à l'alignement technologique.**

RÉGLEMENTATION

La Feuille de route technologique n'est qu'un élément : le paysage réglementaire/de sécurité doit évoluer pour permettre l'utilisation de ces nouvelles technologies. La mise en œuvre de nouveaux carburants et de nouvelles technologies peut nécessiter des règlements ou des règles nouveaux ou mis à jour. Dans d'autres cas, les règlements ou règles existants pourraient continuer à s'appliquer, mais pourraient, par exemple, être modifiés pour exiger des procédures à jour de test des émissions, ce qui faciliterait leur mise en œuvre. Il faudra peut-être revoir les systèmes de gestion de sécurité. De plus, les exigences en matière de formation et de certification devront peut-être être révisées ou modifiées.

Les décideurs politiques du secteur ferroviaire nord-américain devraient être tenus au courant des résultats des essais pilotes. Cela aidera à assurer que l'élaboration de la réglementation tient compte du développement technologique, permettra d'aligner les réglementations entre les frontières nationales et provinciales/d'État, et facilitera l'identification précoce des obstacles et des défis liés à la sécurité. De plus, les décideurs devraient être informés de l'évolution des pratiques et des conceptions en matière de sécurité découlant de ces essais, afin que les nouvelles données puissent être intégrées aux règlements et aux règles, s'il y a lieu.

ÉLABORATION DE POLITIQUES ET DE PROGRAMMES

Il faudra élaborer des politiques et des programmes de soutien qui ciblent explicitement le secteur ferroviaire, reconnaissant ainsi le rôle vital qu'il joue dans le transport de marchandises et de passagers, et les obstacles uniques à la décarbonisation auxquels il est confronté.

Comme l'indique la section 16.1, il faut un nouveau modèle de financement pour que la décarbonisation du secteur ferroviaire devienne une réalité. Dans des juridictions nord-américaines autres que le Canada, les modèles de développement technologique reposent largement sur le financement gouvernemental et la collaboration. Le soutien gouvernemental au secteur ferroviaire, et plus largement au transport de marchandises, peut prendre diverses formes. Le nouveau plan climatique 2020 du Canada, *Un environnement sain et une économie saine*, indique que le gouvernement peut jouer un rôle clé dans l'écologisation du secteur des véhicules lourds en soutenant le développement technologique par l'intermédiaire de la R&D, mais aussi en soutenant des projets pilotes et la mise en œuvre de solutions prêtes à être commercialisées dans tous les modes de transport, ce qui comprend le rail. En raison de sa grande efficacité, le transport ferroviaire est déjà un mode de transport faible en carbone par rapport à d'autres modes comme le transport routier. Cela signifie que les investissements gouvernementaux dans la décarbonisation du secteur ferroviaire ne permettront peut-être pas d'atteindre le même taux de réduction du carbone par dollar investi que pour le transport routier, mais qu'ils seront peut-être plus efficaces en aidant à maintenir des taux d'utilisation élevés du mode de transport terrestre le plus efficace.

Les projets pilotes canadiens annoncés par le CP et le CN sont tous deux soutenus par des programmes de financement existants. Emissions Reduction Alberta (ERA) accorde une subvention de 15 millions de dollars au programme de locomotives à hydrogène du CP, et le Department of Environmental Protection (DEP) de la Pennsylvanie alloue des fonds pour soutenir l'achat par le CN de la locomotive électrique à batterie Wabtec. Les investissements du gouvernement de l'État de Pennsylvanie et du gouvernement provincial de l'Alberta dans ces projets de démonstration sont très positifs et peuvent servir de base à d'autres investissements gouvernementaux.

Le transport fonctionne comme un système. Ainsi, les politiques et les programmes conçus pour un mode peuvent avoir un impact sur les autres, par exemple en modifiant l'adoption. La politique sur les transports peut abolir les obstacles à la décarbonisation du secteur ferroviaire, mais elle peut involontairement avoir l'effet inverse si les répercussions possibles sur le secteur ferroviaire ne sont pas prises en compte. Par exemple, en excluant le secteur ferroviaire comme générateur de crédits, la Norme sur les carburants propres peut encourager l'utilisation de camions au lieu de trains pour transporter les marchandises.

4.3.2 PLAN DE TRAVAIL DES INTERVENANTS

Le tableau 14 présente les intervenants de la décarbonisation du secteur ferroviaire et examine comment ils pourraient contribuer au développement et à la mise à l'essai des options technologiques, au suivi et à l'analyse des données clés, ainsi qu'au développement de cadres politiques, de sécurité et réglementaires pour soutenir la transition vers des technologies à émissions nulles pour le secteur ferroviaire. Il indique les rôles que les intervenants pourraient jouer pour aider à surmonter les obstacles à la décarbonisation du secteur ferroviaire. Dans bien des cas, les groupes identifiés jouent déjà un rôle actif dans les domaines sous leur responsabilité.

Légende			
Symbole	D	S	F
Rôle	Direction	Soutien	Financement

	Carburants, technologie et développement de l'infrastructure		Locomotives			Charge/Ravitaillement			Supervision		
	R&D	Test / Démonstration	Adaptation des locomotives et amélioration de la maintenance	Fabrication de locomotives	Achat et utilisation de locomotives	Approvi-sionnement en carburant/ électricité	Identification des possibilités de partage de l'infra-structure	Déploiement de l'infra-structure	Élaboration de politiques	Sécurité et exigences réglementaires	Collecte de sécurité, suivi et orientation
ACFC	S	S					S	S	S	S	D
Chemins de fer	D	D	D		D	S	S	D		S	D
Gouvernement fédéral	F	F			F	F	D	F	D	D	D
Gouvernements provinciaux		F			F	S	S	F	D		
Fabricants	D	S	S	D						S	S
Entreprises de technologies propres*	D	S	S								
Organisations de développe-ment de normes	S	S	S	S						D	
Établissements de recherche	D	S					S		S	S	S
Producteurs de carburants alternatifs	S	S				D	S	S			
Banques/ NBFI		F			F	F		F			
Services publics		S				D	S	S		S	
Producteurs d'hydrogène		S				D	S	S		S	
Partenaires de la chaîne d'ap-provision-nement						S	S	S			

* Cela comprend les fournisseurs de solutions de stockage de l'hydrogène, de batteries, etc.

4.3.3 RECOMMANDATIONS

ÉVALUATIONS TECHNIQUES

L'application régulière du Cadre d'évaluation présenté à la section 7 est essentielle à la réalisation de la Feuille de route. Le Cadre vise à fournir une évaluation qui rend compte de l'état actuel de chaque option technologique en ce qui a trait au coût, au potentiel de réduction du carbone et aux défis. La valeur de ces évaluations se concrétisera alors que le Cadre sera appliqué à intervalles réguliers pour tracer les trajectoires relatives de chaque option vers 2030 et 2050. Cela devrait permettre d'identifier rapidement les technologies les plus prometteuses. Comme l'illustre le graphique de la section 16, pour atteindre le net zéro d'ici 2050, il faudra identifier la ou les technologies les plus prometteuses d'ici 2035 et commencer à construire l'infrastructure requise.

Le Comité de la décarbonisation du secteur ferroviaire (voir ci-dessous) devrait être chargé de faire des mises à jour régulières des évaluations technologiques détaillées, en utilisant le Cadre de la présente Feuille de route. Il est recommandé de le faire tous les deux à cinq ans. À chaque mise à jour, un rapport devrait être préparé afin de faire le suivi des résultats. Sauf en cas de limites liées à des préoccupations sur la protection de la vie privée, ces rapports devraient être rendus publics. Des données à jour, fondées sur les résultats des projets pilotes en cours et futurs, pourraient être collectées auprès des chemins de fer par l'ACFC et rendues anonymes avant d'être appliquées au Cadre d'évaluation. Les évaluations doivent comprendre des données sur les activités réalisées au Canada, afin que les technologies, les carburants et les pratiques émergents puissent être évalués et notés en fonction de leur performance dans le climat unique du Canada.

Recommandation I : Faire des évaluations des options technologiques tous les 2 à 5 ans en utilisant le Cadre d'évaluation de la section 7. Faire un rapport sur les trajectoires relatives de chaque option vers 2030 et 2050. Les résultats de chaque évaluation devraient être publiés et partagés largement avec les intervenants du secteur ferroviaire dans toute l'Amérique du Nord, s'il est possible de le faire tout en respectant la confidentialité des chemins de fer et des autres intervenants du secteur privé.

Calendrier : Intervalle régulier à déterminer.

SUPERVISION DE LA MISE EN ŒUVRE

Comme ce projet a nécessité de vastes consultations des secteurs public et privé, et qu'il reflète les priorités identifiées par ces deux groupes d'intervenants, les recommandations de cette section devraient faire l'objet d'un protocole d'entente renouvelé entre TC et l'ACFC en 2022. La prise en compte de ces recommandations permettra au gouvernement de collaborer avec le secteur ferroviaire pour réduire davantage les émissions. Elle assurera également que le secteur reçoit un soutien financier du secteur public, en plus de ses propres investissements dans des mesures de décarbonisation.

Les rôles et les responsabilités des principaux groupes d'intervenants, comme l'indique le tableau 17, devraient être intégrés au PE renouvelé afin d'assurer que tous les intervenants participent activement à la décarbonisation profonde du secteur.

Recommandation II: Renouveler le PE entre TC et l'ACFC en 2022. Faire référence aux conclusions des phases 1 et 2, ce qui comprend le Cadre d'évaluation, les recommandations, et les rôles et responsabilités des intervenants.

Calendrier: 2022

Un groupe désigné doit assurer la supervision et la coordination, c'est-à-dire superviser la mise en œuvre de la Feuille de route et coordonner tous les intervenants. Un Comité de la décarbonisation du secteur ferroviaire, selon les groupes d'intervenants présentés à la Grille des rôles et des responsabilités (éventuellement avec une représentation des États-Unis) devrait être formé. Il aurait les responsabilités suivantes : organiser des évaluations régulières des technologies ; faire le suivi des résultats et proposer des mesures appropriées à court et moyen terme (p. ex. formuler des recommandations pour des essais supplémentaires, fournir de l'information sur un modèle de financement pour soutenir la transition (voir ci-dessous), étudier les possibilités de partage de l'infrastructure de charge/ravitaillement, et identifier les partenariats possibles dans le secteur ferroviaire et entre les différents modes de transport). À plus long terme, le comité devrait fixer des objectifs de décarbonisation et suivre les progrès réalisés. Pour soutenir ce Comité, un gestionnaire de projet devrait être engagé pour administrer la mise en œuvre de la Feuille de route.

Recommandation III: Former un Comité national de la décarbonisation du secteur ferroviaire. Le Comité peut fixer des objectifs de décarbonisation, suivre les progrès réalisés, superviser les futures applications du Cadre d'évaluation, identifier les domaines optimaux pour un soutien gouvernemental, proposer des mesures appropriées à court et moyen terme, et travailler avec nos homologues américains pour aligner les approches et les mesures de haut niveau.

Calendrier: Établir le rôle du Comité de décarbonisation en 2022, celui-ci étant opérationnel pendant le prochain PE et les PE ultérieurs (après 2035).

Recommandation IV: Créer le poste de gestionnaire de projet pour soutenir le Comité de la décarbonisation du secteur ferroviaire.

Calendrier : Créer le poste de gestionnaire de projet en 2022 afin d'aider le Comité.

ÉLABORATION D'UN PROGRAMME

Un modèle de financement conjoint gouvernement-industrie est nécessaire pour assurer une décarbonisation profonde. Des mécanismes de financement appropriés doivent être identifiés. Les prochaines étapes recommandées consistent à trier les besoins de financement et à identifier les lacunes du financement gouvernemental déjà disponible. Dans certains cas, les options de décarbonisation évaluées dans ce rapport sont mises à l'essai par les chemins de fer canadiens aux États-Unis. Cela est dû en grande partie au soutien financier des États et du gouvernement fédéral aux activités de décarbonisation. Un niveau comparable de soutien de la part des gouvernements canadiens encouragerait la réalisation d'autres projets pilotes et de démonstration au Canada. Cela assurerait la production de données sur les activités réalisées au Canada, permettant d'évaluer les technologies, les carburants et les pratiques émergents dans le contexte climatique et géographique uniques du Canada.

De plus, le gouvernement du Canada devrait envisager d'organiser des exercices avec les chemins de fer canadiens, ainsi qu'avec leurs homologues aux États-Unis et au Mexique, afin d'étudier le taux de financement gouvernemental nécessaire pour soutenir l'adoption de l'un des trois modes de propulsion permettant une décarbonisation profonde. Ces exercices pourraient contribuer à mettre en lumière les obstacles les plus importants en matière de coûts et de techniques, et pourraient accélérer le calendrier de décarbonisation du secteur ferroviaire.

Outre le financement, le gouvernement a pour rôle essentiel de réunir un large éventail d'intervenants de tous les modes de transport afin d'identifier les synergies et les avantages mutuels qui pourraient être obtenus en collaborant aux activités de décarbonisation. On ne doit pas sous-estimer le pouvoir rassembleur du gouvernement, car il peut jouer un rôle essentiel en aidant à former des partenariats entre les acteurs du secteur ferroviaire, entre les modes de transport et au-delà des frontières. Le déploiement de l'infrastructure devrait offrir des possibilités de collaboration avec les partenaires de la chaîne d'approvisionnement à des endroits comme les ports et les installations intermodales. D'autres modes, comme le camionnage et le transport maritime, peuvent mettre en œuvre d'autres voies technologiques, ce qui limiterait les possibilités de collaboration (mais serait favorable au secteur ferroviaire quant à la concurrence pour les ressources énergétiques).

Recommandation V : Créer un programme conjoint au gouvernement et à l'industrie pour soutenir et exploiter les possibilités de décarbonisation identifiées dans cette Feuille de route. Ce programme devrait être axé exclusivement sur transport ferroviaire, reconnaissant les avantages inhérents à son efficience par rapport aux autres modes de transport, et le rôle vital qu'il joue dans l'économie canadienne. Il devrait comporter à la fois un volet de financement et un volet de rassemblement afin de soutenir la collaboration.

Calendrier : 2023-2030



ANNEXE A – LISTE DES ENTRETIENS MENÉS

Nom	Titre, organisation
<i>Recherche</i>	
Steve Fritz	Gestionnaire, Moteurs diesel à vitesse moyenne, Southwest Research Institute
Paul Blomerus	Consultant indépendant
Peter Eggleton	Consultant indépendant
Josipa Petrunic	Directrice exécutive et cheffe de la direction, CRITUC
Dr. Gordon Lovegrove	Professeur agrégé, École d'ingénierie, Faculté des sciences appliquées, UBC
<i>Technologies propres et fabricants</i>	
Bob Oliver	Président-directeur général, Tech-K.O., et président-directeur général par intérim, H2GO Canada
Nicolas Pocard	Vice-président, Marketing et partenariats stratégiques, Ballard
Jerainne Heywood	Cheffe technique, Technologie des fluides, Wabtec
<i>Producteurs de carburants</i>	
Fred Ghatala	Directeur, Carbone et durabilité, Biocarburants avancés Canada
Matt Leuck	Gestionnaire technique, Carburant diesel renouvelable, Neste
Dayne Delahoussaye	Politique publique nord-américaine, Neste
<i>Gouvernement</i>	
Kyle Beaulieu	Ingénieure, Programmes environnementaux, Transports Canada
Daniel Fairbairn	Gestionnaire/conseiller politique principal, Transports Canada
Paul Izdebski	Analyste politique, Environnement et Changement climatique Canada
Stephen Healey	Analyste politique, Politique environnementale, Transports Canada
Lorri Thompson	Gestionnaire, Norme sur les carburants propres, Environnement et Changement climatique Canada
Eddy Zuppel	Chef de programme, Technologies de propulsion des véhicules, Conseil national de recherches du Canada
Albert Wahba	Chef de programme, Transports terrestres résilients, Conseil national de recherches du Canada
Richard Holt	Chef, Transport propre, Environnement et Changement climatique Canada

Ursula Green	Ingénieure principale, Opérations de la sécurité ferroviaire, Transports Canada
<i>Chemins de fer</i>	
Chantale Despres	Vice-présidente adjointe, Durabilité, CN
David Huck	Directeur, Durabilité, CP
Matthew Findlay	Directeur, Maintenance des locomotives, CP
Laszlo Czihaly	Mécanicien principal, Southern Railway of British Columbia (SRY)

ANNEXE B – MESURES DE RÉDUCTION IDENTIFIÉES

Les mesures suivantes sont présentées par ordre alphabétique pour chaque catégorie. Elles représentent les solutions de décarbonisation potentielles identifiées pendant les entretiens ou l'examen de la documentation.

Efficiences	Carburant alternatif	Propulsion alternative
Aérodynamique – Locomotives	Alcool	Batterie + génératrice au diesel (pour charger la batterie)
Aérodynamique – Wagons	Ammoniac	Batterie électrique (réservoirs)
Allègement	Biodiesel dérivé de la lignine	Catenary
Automatisation/ automatisation contrôlée	Diesel renouvelable produit par hydrogénation (DRPH)	Électricité caténaire + pile à hydrogène
Cartographie du moteur	Huile végétale hydrotraitée renouvelable (HVO)	Turbine à gaz et pile à combustible hybride à oxyde solide (SOFC-GT)
Dispositifs anti-ralenti/ réduction du ralenti	Biodiesel	Électricité caténaire
Gestion automatisée du régulateur	Esters méthyliques d'acide gras (FAME)	Électricité caténaire + batterie
Interface voie-roue	Méthanol	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) + batterie de traction à bord
Réduction des fuites d'air comprimé	GNL (gaz naturel liquéfié) / GNC (gaz naturel comprimé)	Pile à hydrogène (HFC)
Solutions fondées sur des données (efficacité du système pour minimiser les km perdus) – p. ex. Trip Optimizer	Co-combustion d'hydrogène (H ₂ + diesel)	Diesel + batterie à bord (avec ou sans systèmes de post-traitement)
Supercondensateurs / freinage par récupération	GNR (gaz naturel renouvelable)	

ANNEXE C – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE: BIODIESEL (B20)

1. COÛT

A. DÉVELOPPEMENT

Note	Description	Sélection
5	Disponible sur le marché : pas de coût de développement	✓
4	Presque disponible sur le marché : coût de développement de <10 M \$	
3	10-50M \$	
2	50-70M \$	
1	Développement significatif requis avec défis complexes : >75M \$	

Sommaire:

Le coût total du développement, de la mise à l'essai et de la certification du biodiesel est nul, car ce carburant est disponible sur le marché canadien depuis de nombreuses années. Cependant, il se peut qu'il y ait des coûts additionnels pour poursuivre le développement du biodiesel de deuxième et troisième génération à moyen et long terme.

Notes:

- La production de biodiesel est techniquement mature et rentable depuis de nombreuses années. Son utilisation est actuellement exigée à l'échelle nationale à des taux de mélange d'au moins 2 % avec le diesel de pétrole, bien que certaines provinces exigent des taux de mélange moyens plus élevés (p. ex. le Manitoba exige des taux de mélange de diesel renouvelable de 5 %, et l'Ontario exige des mélanges de 4 %).
- Au Canada, la plupart des biodiesels disponibles sur le marché sont encore produits à partir de cultures alimentaires comestibles, le plus souvent du soja, ce qui présente un ensemble distinct de défis et de limites. La production de biodiesel à partir de produits non alimentaires comme les huiles de cuisson usagées et les graisses animales, et même à partir d'algues de culture, est possible, mais certaines technologies connexes en sont encore à leurs débuts et la disponibilité des matières premières est limitée, ce qui restreint l'adoption et le potentiel de réduction des GES.

- On s'attend à ce que la demande de biocarburants de première génération diminue à l'avenir, en raison des préoccupations relatives à la sécurité alimentaire et à l'intensité carbone de la production.
- Les fabricants de locomotives savent que la limite type de 5 % pour le mélange de biodiesel limitera les efforts de décarbonisation des chemins de fer et sont disposés à tester des mélanges plus élevés. Progress Rail a récemment approuvé des mélanges B20 pour sa gamme de moteurs EMD 645 et 710 afin d'aider ses clients à atteindre les objectifs climatiques. SRY a soumis une demande de subvention afin de pouvoir tester l'utilisation du biodiesel pur (B100).
- Les chemins de fer ont dit avoir besoin d'une meilleure visibilité sur les ratios de mélange précis des différents lots de carburant diesel qu'ils achètent. Pour le moment, les fournisseurs de carburant ne sont pas tenus de divulguer cette information s'ils respectent les exigences de mélange annuel moyen. Cette information aiderait les chemins de fer à valider l'efficacité et l'impact des différents mélanges, à rendre compte avec plus de précision de l'intensité carbone de leurs activités et à évaluer les effets de mélanges plus élevés sur les prix des carburants.

Référence(s):

- Consultations: SRY, Neste, TC, CN
- Documentation:
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_benefits.html)
 - Progress Rail, 2021 (<https://www.progressrail.com/en/Company/News/PressReleases/ProgressRailApprovesB20BiodieselFuelforUseinEMDEngines.html>)

B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL

Note	Description	Sélection
5	Pas de coût additionnel	
4	Jusqu'à 1 million \$	✓
3	1-3 millions \$	
2	3-5 millions \$	
1	>5 millions \$	

Sommaire:

Le coût additionnel par locomotive pour permettre l'utilisation du B20 est bien inférieur à un million de dollars.

Notes:

- Il est techniquement possible d'utiliser des mélanges de biodiesel de jusqu'à 20 % dans de nombreuses locomotives au diesel existantes, mais des mises à niveau de certains composants, comme les joints en caoutchouc, peuvent être nécessaires dans certains cas (en particulier pour les locomotives antérieures à 2004). Des mélanges de jusqu'à 7 % devraient être faisables pour toutes les locomotives au diesel existantes, sans aucune mise à niveau.
- Une étude menée au Royaume-Uni a démontré que des locomotives spécialement conçues pour le biodiesel pur devraient être techniquement faisables d'ici 2030 ou 2040. La conversion des flottes existantes au biodiesel pur devrait également être techniquement faisable d'ici 2030, mais l'approvisionnement en biodiesel serait une contrainte majeure (probablement insurmontable).
- Si les mélanges de biodiesel utilisés dépassent les niveaux spécifiés par les garanties, les chemins de fer devront peut-être acheter et installer des kits de mise à niveau.

Référence(s):

- Consultations : CP, ECCC, CN
- Documentation:
 - Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)

C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE

Note	Description	Sélection
5	Aucune infrastructure additionnelle requise	
4	Utilisation de l'infrastructure existante avec modifications	✓
3	Nouvelle infrastructure significative requise aux gares de triage seulement	
2	Nouvelle infrastructure significative requise aux gares de triage et à d'autres endroits	
1	Nouvelle infrastructure significative requise sur l'ensemble du réseau	

Sommaire:

Les exigences supplémentaires en matière d'infrastructure de ravitaillement et de charge pour l'utilisation du B20 sont entre autres les suivantes :

- Les réservoirs de stockage de biodiesel peuvent nécessiter une maintenance accrue par rapport au diesel de pétrole, car la teneur en eau peut entraîner une croissance biologique.
- Les chemins de fer peuvent ajouter des installations et du matériel de mélange internes pour atteindre tout objectif futur en matière de biodiesel.

Notes:

- Il est plus sécuritaire et plus facile de transporter le biodiesel que le diesel de pétrole, et on peut utiliser les infrastructures de ravitaillement et le matériel de distribution existants avec des modifications minimales.
- Le biodiesel a une densité énergétique inférieure à celle du diesel de pétrole (environ 9 % de moins). Pour un mélange B20, c'est une faible différence (moins de 2 %). Il est donc peu probable que ce taux de mélange nécessite des points de ravitaillement supplémentaires.

Référence(s) :

- Consultations: TC, Wabtec, Waterfall Group
- Documentation:
 - Navius Research, 2020 (<https://www.naviusresearch.com/publications/2020-biofuels-in-canada/>)
 - Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_benefits.html)

D. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Économies de > 20 %	
4	Économies de jusqu'à 20 %	
3	Égal au diesel	✓
2	Jusqu'à deux fois le coût du diesel	
1	>2x	

Sommaire:

Le coût d'exploitation additionnel est à peu près équivalent à celui du diesel de pétrole.

Notes:

- Bien que le biodiesel soit considéré comme un carburant d'appoint à faible taux de mélange (< 20 %), il coûte légèrement plus cher que le diesel de pétrole, et un carburant additionnel est requis en raison de son contenu énergétique inférieur. Cela devrait s'équilibrer à des degrés divers en fonction de l'augmentation de la taxe sur le carbone.
- Le matériel et les pratiques de ravitaillement en carburant sont très semblables à ceux du diesel de pétrole. Toutefois, dans certains cas, les chemins de fer peuvent choisir de mélanger les biocarburants dans leurs propres installations, ce qui nécessite l'utilisation de matériel spécialisé.
- Le biodiesel contient plus d'eau que les autres carburants, et les chemins de fer doivent utiliser des additifs comme le méthanol pour régler les problèmes connexes. Dans certains cas, cette teneur en eau peut entraîner la corrosion de divers composants du moteur et du système d'alimentation en carburant, ce qui augmente les coûts de maintenance.
- L'utilisation de biodiesel à des taux de mélange supérieurs à 2 % peut entraîner des coûts de maintenance plus élevés, et les mélanges supérieurs à 5 % entraîneront presque certainement une augmentation de la fréquence de la maintenance, car les délais de fiabilité du moteur seront modifiés. Le biodiesel dérivé de différents types d'huiles végétales aura des effets différents sur la performance et l'entretien des moteurs. Il faut faire une recherche supplémentaire sur les effets mécaniques des taux de mélange plus élevés.
- Il faudra probablement mettre à jour les contrats de service avec les fabricants de moteurs si on utilise des mélanges de biodiesel supérieurs à 5 %. Les filtres à carburant risquent fortement de nécessiter un entretien et un remplacement accrus en raison de l'utilisation du biodiesel, surtout au début de la transition.

- Comme les crédits pour l'utilisation du biodiesel vont expirer, les arguments économiques en faveur de son utilisation peuvent diminuer. Certains experts considèrent comme un risque l'avantage économique provisoire de l'utilisation du biodiesel.
- La Californie exige actuellement que 40 % de tout le diesel distribué dans l'État soit du DRPH ou du biodiesel. En conséquence, le coût du carburant est nettement plus élevé et les chemins de fer faisant affaire dans l'État mettent tout en œuvre pour acheter du carburant ailleurs.

Référence(s):

- Consultations: CP, SRY, Wabtec, Paul Blomerus, SWRI, Waterfall Group
- Documentation:
 - Navius Research, 2020 (<https://www.naviusresearch.com/publications/2020-biofuels-in-canada/>)
 - Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)

2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE

A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES

Note	Description	Sélection
5	>80%	
4	50-80%	
3	30-50%	
2	10-30%	✓
1	<10%	

Sommaire :

Par rapport au diesel, les réductions de GES par matériel sont estimées à 80 % pour le biodiesel pur, ou à environ 16 % pour le B20.

Notes:

- Au niveau du système, le biodiesel à lui seul n'est pas une option crédible pour la décarbonisation profonde du secteur ferroviaire, principalement en raison de l'ampleur de l'approvisionnement qui serait nécessaire pour remplacer la majorité du diesel de pétrole actuellement utilisé.

- Le potentiel de réduction des GES du biodiesel peut varier considérablement et dépend de la ou des matières premières utilisées, de l'emplacement, de l'intensité des GES, du transport, des procédés de production et du taux de mélange. Divers experts soutiennent que le potentiel net de réduction des GES du biodiesel pur varie de 20 % à 80 %, bien qu'il ait tendance à se situer dans la fourchette supérieure en Amérique du Nord.
- Une analyse du cycle de vie réalisée par l'Argonne National Laboratory indique que l'utilisation du B100 réduit les émissions de GES de 74 % en moyenne par rapport au diesel de pétrole. Les États-Unis utilisent le modèle GREET pour évaluer l'intensité carbone du biodiesel, alors que le Canada utilise le modèle GHGenius
- Il faut faire une recherche plus approfondie sur les procédés de production des biocarburants afin de déterminer des fenêtres plus étroites de potentiel de réduction des GES.
- La première génération de biocarburants, produits à partir de cultures alimentaires comestibles comme le soja, présente un ensemble distinct de défis et de limites. Par exemple, de nombreux pays limitent la quantité de biocarburants de première génération pouvant être produits afin de protéger les réserves alimentaires. Bien que les biocarburants de troisième génération (produits à partir d'algues de culture) soient une option pour la production de biodiesel, ils en sont encore à leurs débuts, ce qui limite le potentiel de réduction des GES.
- Tout comme le DRPH, le biodiesel permet de réduire les émissions nettes de GES, mais pas les émissions de PCA. Il a été démontré que les mélanges de 20 % de biodiesel (B20) augmentent les émissions de NOx d'environ 5 %. L'utilisation du biodiesel ne répondrait probablement pas aux problèmes de qualité de l'air dans les gares de triage et près de celles-ci.
- Bien qu'une réduction totale des GES soit théoriquement possible avec le biodiesel, cela suppose que la culture/production, la transformation et le transport sont réalisés à un niveau de carbone près de zéro, ce qui est hautement improbable.
- L'utilisation des biocarburants pour le transport de surface pourrait être progressivement abandonnée dans les années 2030, et de nombreux experts considèrent l'utilisation des biocarburants comme une étape vers l'abandon des moteurs à combustion et la décarbonisation profonde.

Référence(s):

- Consultations: SRY, Peter Eggleton, TC, SWRI
- Documentation:
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - Southwest Research Institute, Low-Carbon Fuels for Locomotives: Biodiesel and Renewable Diesel (information reçue du SWRI)
 - Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)
 - Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_benefits.html)

B. ADOPTION/ APPLICABILITÉ

Note	Description	Sélection
5	Bien approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	✓
4	Partiellement approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	
3	Approprié pour le matériel de triage	
2	Bien approprié pour le transport de passagers	
1	Non approprié pour le transport de marchandises de grande ligne, et partiellement approprié pour le transport de passagers.	

Sommaire:

Le biodiesel est approprié à tous les types de chemins de fer et ne nécessite que des modifications mineures au matériel, à l'infrastructure et aux pratiques existants. Ses propriétés sont très semblables à celles du diesel de pétrole. Une mise en garde s'impose toutefois : l'utilisation de biodiesel pur (B100) pour des applications comme le transport de marchandises de grande ligne est peu probable en raison de l'ampleur de la production nécessaire.

Notes:

- L'utilisation de biodiesel pur devrait être possible d'ici 2030 ou 2040, pour tous les modes de transport ferroviaire.
- L'utilisation de mélanges B2 et B5 a été testée à des températures aussi basses que -40 °C au Canada, sans aucun impact négatif significatif. Certains experts estiment que l'utilisation de mélanges aussi élevés que le B20 devrait être possible partout au Canada, toute l'année. Le CN teste actuellement la faisabilité des mélanges B10.
- Une récente étude du RSSB indique que le biodiesel est actuellement le seul carburant alternatif réaliste, par rapport au diesel de pétrole, qui fournirait le type de puissance et d'énergie embarquée requis pour les locomotives de marchandises autoalimentées.
- Dans certaines juridictions, les chemins de fer doivent respecter des exigences sur les mélanges de carburants renouvelables, dans d'autres, ils doivent respecter des exigences sur le cycle de vie du carbone. Le DRPH est meilleur dans ce dernier scénario (en raison de sa densité énergétique plus élevée et du fait qu'il peut être produit à partir d'une plus grande variété de matières premières faibles en carbone), et le biodiesel est meilleur dans le premier (en raison de ses coûts plus faibles).
- Certains experts soutiennent que le biodiesel peut jouer un rôle dans la décarbonisation profonde du secteur ferroviaire là où les technologies de propulsion alternative ne peuvent pas avoir un impact majeur (p. ex. lignes à faible volume et courtes distances).

Référence(s):

- Consultations: ECCC, TC, CN, CP
- Documentation:
 - Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)

3. DÉFIS

A. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Faible complexité pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	✓
3	Complexité modérée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
2	Complexité élevée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
1	Risque considérable pour la fiabilité. Risque considérable de perdre un bien.	

Sommaire:

Les caractéristiques et la composition du biodiesel provenant de différentes sources ne sont pas uniformes, ce qui présente une série de défis techniques qui sont relativement simples à relever. Des additifs ou des pratiques comme le préchauffage des réservoirs de carburant peuvent être nécessaires avec les mélanges élevés (>20 %) de biodiesel par temps froid. Des régimes et des normes d'entretien des moteurs modifiés seront également nécessaires pour les mélanges plus élevés.

Notes:

- Le biodiesel pose des problèmes de performance par temps froid en raison de la formation de nuages, et c'est pourquoi son utilisation n'est pas obligatoire dans les régions canadiennes situées au nord du 60e parallèle. Ces problèmes peuvent être partiellement résolus par l'utilisation d'additifs pour carburants, mais ceux-ci s'accompagnent généralement d'un ensemble de défis uniques. En général, les problèmes de performance sont proportionnels aux taux de mélange.
- Le biodiesel modifie les propriétés de démarrage à froid des carburants. Dans les mélanges supérieurs à 10 %, des problèmes de démarrage des locomotives peuvent se poser dans des conditions de froid extrême. Le cas échéant, les réservoirs de carburant doivent être chauffés avant le démarrage pour assurer que le biodiesel est liquéfié.
- En raison des problèmes liés au temps froid, les taux de mélange sont imposés sur une base annuelle moyenne, et les fournisseurs de carburant offrent des taux de mélange plus élevés pendant l'été et des taux de mélange plus faibles en hiver. Par exemple, le Minnesota autorise la vente de taux de mélange allant jusqu'à 10 % en été pour répondre à une exigence de mélange moyen annuel de 5 %.

- Les garanties des fabricants de locomotives peuvent être annulées si le taux de mélange de biodiesel dépasse un certain seuil. Un chemin de fer a dit que c'était le plus grand défi lié à l'utilisation accrue du biodiesel. Les fabricants consultés ont toutefois dit être prêts à travailler avec les chemins de fer pour tester des taux de mélange plus élevés que ceux qui sont actuellement garantis, et à ajuster les spécifications en fonction des résultats obtenus.
- Le biodiesel peut entraîner la dilatation des joints d'étanchéité en caoutchouc/élastomères dans les moteurs, ce qui présente un risque de fuite de carburant en cas de rétrécissement et peut entraîner une usure excessive du moteur. Ce problème peut être résolu par l'ajout d'additifs aromatiques au biodiesel ou par le remplacement des joints. La plupart des moteurs ultérieurs à 2003 sont dotés de joints qui ne sont pas susceptibles de gonfler.
- Le biodiesel ne devrait pas être disponible en quantité suffisante pour avoir un impact significatif sur la décarbonisation.
- La composition chimique du biodiesel peut varier, et les normes peuvent être améliorées.
- Le biodiesel produit à partir de différents types d'huiles végétales peut changer d'état (p. ex. de liquide à solide) à différentes températures, ce qui influence la performance du moteur.
- Le biodiesel étant plus lourd que le diesel de pétrole, sa combustion nécessite des températures plus élevées. En raison de la conception des moteurs, les températures ne sont souvent pas assez élevées, ce qui entraîne une combustion incomplète. Cela peut entraîner l'obstruction des buses d'injection et des fuites de carburant, qui peuvent provoquer une usure excessive du moteur.
- Les fabricants de moteurs comme Wabtec ont élaboré des recommandations sur l'utilisation de différents mélanges de biodiesel pour différents types de moteurs, régions et sources/charges de biodiesel. Ils savent que les clients veulent utiliser des mélanges de biodiesel plus élevés et s'efforcent de valider différentes plateformes de moteurs et d'établir les fréquences de maintenance par plateforme, car elles varieront.

Reference(s):

- Consultations: CP, Neste, Wabtec, SWRI, Waterfall Group
- Documentation:
 - Southwest Research Institute, Low-Carbon Fuels for Locomotives: Biodiesel and Renewable Diesel (information received from SWRI)

- o Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)

B. RAVITAILLEMENT

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Complexité modérée pour la chaîne d'approvisionnement et/ou les exigences de ravitaillement	✓
3	Chaîne d'approvisionnement complexe, >2x la durée/fréquence de ravitaillement/charge	
2	Problèmes de disponibilité intermittents, jusqu'à 2x la durée/fréquence de ravitaillement/charge	
1	Problèmes de disponibilité fréquents, jusqu'à 2x la durée/fréquence de ravitaillement/charge	

Sommaire:

L'infrastructure, le matériel et les pratiques de ravitaillement en carburant sont très similaires à ceux du diesel de pétrole. Cependant, dans le contexte de l'utilisation du biodiesel pour une décarbonisation profonde, la disponibilité deviendra un défi de plus en plus important avec l'augmentation des taux de mélange. La disponibilité deviendrait rapidement un obstacle prohibitif si le secteur ferroviaire devait passer massivement au biodiesel, principalement en raison des conflits avec la production alimentaire et de la quantité limitée de terres arables. Pour ces raisons, la présente évaluation se concentre sur l'utilisation du B20.

Notes:

- Le contenu énergétique du biodiesel est inférieur d'environ 9 % à celui du diesel de pétrole, ce qui signifie que pour des taux de mélange plus élevés, une capacité supplémentaire de stockage de carburant à bord (comprenant éventuellement des réservoirs de carburant) ou des points de ravitaillement peuvent être nécessaires pour permettre l'utilisation de mélanges à forte teneur en biodiesel sur des itinéraires qui ont été optimisés pour le diesel de pétrole. Il est peu probable que ce problème se pose pour les mélanges B20, dont la consommation d'énergie serait inférieure de moins de 2 % à celle du diesel de pétrole.
- Pour utiliser le biodiesel à des taux de mélange supérieurs aux taux établis, il faudra disposer de sources uniformes et fiables, et la disponibilité pourrait rapidement devenir une contrainte. Il faudra créer de nouvelles sources et chaînes d'approvisionnement en huiles végétales et en graisses animales. Celles-ci entreront en conflit avec la production alimentaire requise pour nourrir une population

croissante, et pourraient être exacerbées par le changement climatique.

- La teneur relativement élevée en eau du biodiesel peut entraîner une croissance biologique dans les systèmes d'alimentation en carburant, ce qui comprend les réservoirs de stockage de carburant embarqués et stationnaires. Cela peut nécessiter un entretien et un nettoyage plus rigoureux des systèmes de carburant.
- Le Canada produit actuellement suffisamment de biodiesel pour répondre à la demande intérieure, mais il en exporte une grande partie vers les États-Unis en raison des prix plus élevés qu'il peut y obtenir.
- En 2019, le Canada a répondu à 55 % de la demande nationale en biodiesel, et dépend des imports pour répondre à la consommation actuelle de diesel renouvelable. Les États-Unis sont de loin le principal fournisseur de biodiesel du Canada, mais une partie est également importée d'Europe, principalement d'Allemagne, et d'Argentine.
- À des taux de mélange supérieurs à 20 %, il risque d'y avoir d'importantes contraintes d'approvisionnement, qui pourraient nécessiter la modernisation des raffineries de pétrole existantes. Le processus de mise à niveau est plus facile pour le DRPH que pour le biodiesel.

Référence(s):

- Consultations: CP, Wabtec, ECCC, TC
- Documentation:
 - Navius Research, 2020 (<https://www.naviusresearch.com/publications/2020-biofuels-in-canada/>)
 - Association canadienne des producteurs pétroliers (CAPP), 2020 (<https://www.capp.ca/wp-content/uploads/2020/11/Availability-of-Biofuels-Clean-Fuel-Standard-Supply-and-Demand-Implications-377511.pdf>)

C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Formation et/ou règlements additionnels requis	✓
3	Formation et certification et/ou règlements additionnels requis	
2	Préoccupations de sécurité et/ou règlements additionnels considérables requis	
1	Graves préoccupations de sécurité, notamment pour le public, et/ou règlements additionnels complets requis	

Sommaire:

L'utilisation et le transport du biodiesel sont plus sûrs que l'utilisation du diesel de pétrole. Des règlements additionnels minimaux sont requis pour faciliter des taux de mélange plus élevés.

Notes:

- Dans l'ensemble, le biodiesel devrait nécessiter un développement réglementaire minimal, même s'il est utilisé à des taux de mélange plus élevés que ceux actuellement autorisés ou garantis.
- Il se peut que les biocarburants pour le transport de surface soient progressivement éliminés par des règlements au cours des années 2030 ou 2040. Selon un expert, l'utilisation du biodiesel pourrait rester viable pendant les 5 à 10 prochaines années, mais au-delà, les choses sont beaucoup moins sûres.
- Le biodiesel pur cause beaucoup moins de dommages que le diesel de pétrole en cas de déversement ou de rejet dans l'environnement. Il est plus sûr que le diesel de pétrole car il est moins combustible. Le point d'ignition du biodiesel est supérieur à 130 °C, comparativement à environ 52 °C pour le diesel de pétrole. La manipulation, le stockage et le transport du biodiesel sont généralement sans danger.
- La norme ASTM D975 est la spécification sur les carburants qui autorise l'utilisation de mélanges de biodiesel de jusqu'à 5 % aux États-Unis et traite ces mélanges comme étant fonctionnellement identiques au diesel de pétrole. Au Canada, l'Office des normes générales du Canada (ONGC) a opté pour des spécifications distinctes pour le diesel de pétrole et les mélanges jusqu'à B5. Les normes canadiennes pour le diesel de pétrole et les mélanges jusqu'à B5 sont CAN/CGSB-3.517 et CAN/CGSB-3.520, respectivement. Le biodiesel utilisé dans les mélanges canadiens doit répondre aux normes américaines ou européennes pour le B100, qui sont respectivement ASTM D6751 et EN 14214. Le programme de gestion de la qualité BQ-9000 est utilisé pour vérifier que les producteurs et les négociants du biodiesel vendu en Amérique du Nord respectent la norme ASTM D6751. Une spécification canadienne pour les mélanges de la gamme B6 à B20 est en cours d'élaboration.

Référence(s):

- Consultations: CP, Wabtec, SWRI, CN
- Documentation:
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)

- o Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_benefits.html)
- o DieselNet, 2021 (https://dieselnet.com/standards/ca/fuel_biodiesel.php)
- o Government of Canada, 2020 (<https://publications.gc.ca/site/eng/9.884945/publication.html>)
- o Ressources naturelles Canada, 2015 (<https://www.rncan.gc.ca/energie/carburants-remplacement/carburants-faits/biodiesel/3524>)
- o National Biodiesel Board, 2021 (<https://www.bq-9000.org/>)

ANNEXE D – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE : DIESEL RENOUELABLE PRODUIT PAR HYDROGÉNATION (DRPH30)

1. COÛT

A. DÉVELOPPEMENT

Note	Description	Sélection
5	Commercialement disponible : pas de coût de développement	
4	Presque commercial disponible : coût de développement de <10 M \$	✓
3	10-50 M \$	
2	50-75 M \$	
1	Développement considérable requis avec défis complexes : >75M \$	

Sommaire:

On estime le coût total du développement, des essais et de la certification à moins de 10 millions de dollars. La majorité de ces coûts devraient être supportés par les producteurs de carburant, les fabricants de locomotives et les organismes de certification. Des carburants alternatifs comme le DRPH sont mis au point pour des secteurs comme le transport ferroviaire, le camionnage, les autobus scolaires et de transport en commun, le transport maritime et les véhicules et l'équipement hors route.

Notes:

- Il n'existe actuellement aucune production de DRPH au Canada. Neste est le seul gros producteur en Amérique du Nord, et la majeure partie de l'approvisionnement est actuellement destinée à la Californie en raison de ses normes strictes sur les émissions et de ses exigences de mélange de carburants renouvelables, ainsi que des crédits de conformité rentables.
- La production au Canada nécessiterait des bioraffineries spécialement conçues ou la conversion de raffineries de pétrole existantes. Le programme Carburants de l'avenir de RNCan encouragera le développement de carburants renouvelables comme le DRPH au Canada.
- Le biodiesel dérivé de la lignine est chimiquement similaire au DRPH et présente des mesures de la performance semblables, mais il est produit par une voie différente. Il existe un petit nombre d'entreprises au Canada qui le produisent en quantités limitées. Bien que le DRPH puisse être produit à partir de matières premières lignocellulosiques comme les résidus forestiers et agricoles, les procédés de production ne sont pas encore matures.

- Les raffineries commerciales de DRPH spécialement conçues coûteraient entre 130 millions et 1 milliard de dollars en dollars de 2012.

Référence(s):

- Consultations: Waterfall Group, Neste, TC
- Documentation:
 - Gouvernement du Canada, 2019 (<https://www.rncan.gc.ca/node/idndr-rf-introduction/3670>)
 - Ressources naturelles Canada, 2012 (https://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/oeefiles/pdf/transports/carburants-remplacement/ressources/pdf/DRPH_rapport_final_fra.pdf)

B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL

Note	Description	Sélection
5	Aucun coût additionnel	✓
4	Jusqu'à 1 million \$	
3	1-3 millions \$	
2	3-5 millions \$	
1	> 5 millions \$	

Sommaire:

Le DRPH30 est déjà garanti pour une utilisation dans les locomotives. Le coût additionnel par locomotive pour permettre son utilisation est donc estimé comme étant négligeable pour les moteurs de locomotives ultérieurs à 2003, et mineur pour les moteurs plus anciens. Le coût additionnel pour permettre l'utilisation du DRPH pur devrait être bien inférieur à 1 million de dollars, bien que des tests supplémentaires soient nécessaires pour déterminer si cela est possible et, dans l'affirmative, quelle serait la fourchette de coûts par unité.

Notes:

- Nombre des intervenants consultés ont souligné que le DRPH n'est pas un carburant pur, bien qu'il soit presque chimiquement identique au diesel de pétrole. Des mises à niveau mineures des moteurs plus anciens, antérieurs à 2004 (p. ex. le remplacement des joints en caoutchouc et des joints d'étanchéité des systèmes de carburant, car les mélanges à haute teneur en DRPH peuvent provoquer une expansion et des fuites en raison de l'absence de composés aromatiques), seront nécessaires pour les mélanges de DRPH excédant 20 %. L'utilisation du DRPH pur pourrait également nécessiter un entretien supplémentaire, car son utilisation aura des répercussions sur le calage du moteur en raison de sa densité énergétique plus faible par rapport au diesel de pétrole (environ 6 % de moins).

- Les fabricants de moteurs de locomotives garantissent que leurs moteurs peuvent fonctionner avec des mélanges de DRPH de 20 % ou 30 %. L'utilisation de mélanges excédant ces niveaux peut annuler les garanties du moteur. Cette question est compliquée par le fait qu'il n'existe actuellement aucune exigence de divulgation des taux de mélange de contenu renouvelable, de sorte que les chemins de fer ne sont jamais certains des taux de mélange exacts des carburants utilisés.

Reference(s):

- Consultations: CP, CN, Neste, Wabtec
- Documentation:
 - Navius Research, 2020 (<https://www.naviusresearch.com/publications/2020-biofuels-in-canada/>)
 - Université de Toronto, 2019 (<https://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2019/ie/bgrd/backgroundfile-130965.pdf>)

C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE

Note	Description	Sélection
5	Aucune infrastructure additionnelle requise	✓
4	Infrastructure existante suffisante avec modifications	
3	Nouvelle infrastructure considérable requise aux gares de triage seulement	
2	Nouvelle infrastructure considérable requise aux gares de triage et à d'autres endroits	
1	Nouvelle infrastructure considérable requise sur l'ensemble du réseau	

Sommaire:

On ne prévoit pas d'exigences supplémentaires en matière d'infrastructure de ravitaillement et de charge pour les mélanges de 30 % de DRPH. Si ce carburant devait être utilisé sous forme pure, les exigences pourraient être les suivantes:

- Lieux de ravitaillement supplémentaires en raison de la densité énergétique plus faible du DRPH par rapport au diesel de pétrole (environ 6 % de moins).
- Capacité supplémentaire de stockage de carburant à bord.
- Les chemins de fer peuvent ajouter des installations de mélange et du matériel de stockage internes afin d'atteindre les objectifs futurs en matière de DRPH.

Référence(s):

- Consultations: CP, Wabtec
- Documentation:
 - Navius Research, 2020 (<https://www.naviusresearch.com/publications/2020-biofuels-in-canada/>)

D. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Économies de > 20 %	
4	Économies de jusqu'à 20 %	
3	Égal au diesel	
2	Jusqu'à deux fois le coût du diesel	✓
1	>2x	

Sommaire:

Les coûts supplémentaires d'exploitation, par rapport au diesel de pétrole, sont actuellement de 3 à 4 fois plus élevés pour le DRPH pur, ou jusqu'à deux fois plus élevés pour le DRPH30. Cela pourrait toutefois changer si des économies d'échelle (si des raffineries DRPH sont construites ou si les raffineries existantes sont modernisées) et/ou si des matières premières et des procédés de production moins coûteux voient le jour. Un autre facteur atténuant est le prix du carbone et les marchés de crédits de conformité, bien qu'on sache qu'un prix du carbone de 170 \$ la tonne (l'objectif du Canada pour 2030) ne serait pas suffisant pour rendre le DRPH concurrentiel en matière de coûts par rapport au diesel de pétrole.

Notes:

- La disponibilité et l'utilisation du DRPH sont actuellement limitées au Canada en raison d'un manque de capacité de production (ce qui est utilisé est produit aux États-Unis). L'augmentation de cette capacité nécessiterait probablement des conversions de raffineries en gros, comme cela s'est fait aux États-Unis. De plus, son coût est de trois à quatre fois plus élevé que celui du diesel de pétrole. La demande de DRPH devrait dépasser l'offre au cours des 15 prochaines années.
- Quand les producteurs de carburant en Amérique du Nord vendent du DRPH, ils vendent en fait deux produits – un carburant diesel et un crédit de conformité. Si un chemin de fer n'est pas obligé de réduire le carbone, il n'a pas besoin d'acheter le crédit. Les producteurs de carburant peuvent séparer ces deux produits et vendre des crédits de carbone à un fournisseur de carburant, puis vendre le carburant lui-même à un chemin de fer, qui ne paierait que pour le carburant, ce qui réduirait le prix.

- L'absence de soufre et de composés aromatiques dans le DRPH réduit son pouvoir lubrifiant, ce qui nécessite l'utilisation d'additifs pour carburant.
- Le coût additionnel du carburant mis à part, les coûts opérationnels supplémentaires devraient être négligeables.
- Contrairement au biodiesel, le DRPH est très stable et ne présente pas plus de risque de croissance microbienne, de précipitation et de formation d'eau pendant le stockage que le diesel de pétrole.

Référence(s):

- Consultations: CP, CN, ECCC, Waterfall Group, Neste, SWRI
- Documentation:
 - Southwest Research Institute, « Low-Carbon Fuels for Locomotives: Biodiesel and Renewable Diesel » (information reçue du SWRI)
 - Université de Toronto, 2019 (<https://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2019/ie/bgrd/backgroundfile-130965.pdf>)

2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE

A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES

Note	Description	Sélection
5	>80%	
4	50-80%	
3	30-50%	
2	10-30%	✓
1	<10%	

Sommaire:

Par rapport au diesel, les réductions de GES par équipement pour le DRPH30 sont estimées à 27 %. Ce chiffre repose sur les estimations de l'intensité carbone du DRPH du modèle GHGenius 4.03a, qui sont inférieures de 89 % à celles du diesel de pétrole. Le potentiel de réduction des GES dépend fortement des sources de carburant/des matières premières et des procédés de production, qui peuvent varier considérablement.

Notes:

- Les fournisseurs de carburant envisagent d'utiliser de nouvelles matières premières pour produire du DRPH (par opposition aux huiles végétales et aux graisses animales), comme les algues, les déchets solides municipaux, les résidus forestiers et le carbone capturé dans l'atmosphère. Cela pourrait avoir un impact sur les prix et sur le potentiel de réduction des GES du point de vue du cycle de vie. Le DRPH peut être produit à partir d'une gamme plus vaste de matières premières que le biodiesel.
- Le DRPH offre plus d'avantages en matière de réduction des GES que le biodiesel, car il a une densité énergétique légèrement supérieure (~3 %) et peut être mélangé au diesel de pétrole à des taux plus élevés avec le matériel existant.
- Le gouvernement du Canada exige une teneur en DRPH de 11 % dans toutes les applications diesel pour poids lourds d'ici 2030 afin d'atteindre ses objectifs climatiques.
- En Californie, les mélanges de 20 % de biodiesel et de 80 % de DRPH sont commercialisés comme étant carboneutres, bien que cela ne soit pas fondé sur une méthodologie universelle d'évaluation du cycle de vie. De plus, il n'existe pas de spécifications ASTM sur la composition du DRPH, et certains intervenants soupçonnent qu'une partie du carburant vendu comme du DRPH est simplement de l'huile végétale brute. Il est difficile et coûteux de déterminer la composition et la source exactes d'un lot donné de DRPH.
- En 2018, l'intensité carbone du cycle de vie était de 10,4 g CO₂e/MJ pour la moyenne pondérée combinée du biodiesel et du DRPH (en supposant que les mêmes matières premières sont utilisées). Cette intensité carbone est de 89 % inférieure à celle du diesel de pétrole.

Référence(s):

- Consultations: Neste, ECCC, Wabtec, SWRI
- Documentation:
 - Ressources naturelles Canada, 2012 (https://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/oeefiles/pdf/transport/carburants-remplacement/ressources/pdf/DRPH_rapport_final_fra.pdf)
 - Southwest Research Institute, « Low-Carbon Fuels for Locomotives: Biodiesel and Renewable Diesel » (information reçue du SWRI)
 - Navius Research, 2020 (<https://www.naviusresearch.com/publications/2020-biofuels-in-canada/>)

B. ADOPTION/APPLICABILITÉ

Note	Description	Sélection
5	Bien approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	▼
4	Partiellement approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	
3	Approprié pour le matériel de gare de triage	
2	Bien approprié pour le transport de passagers	
1	Non approprié pour le transport de marchandises de grande ligne et partiellement approprié pour le transport de passagers	

Sommaire:

Le DRPH convient à toutes les applications ferroviaires. Il est sur le point d'être un carburant d'appoint pour les moteurs de locomotives ultérieurs à 2003, et on s'attend à ce que seules des améliorations mineures soient nécessaires pour son utilisation en tant que carburant pur ou dans des mélanges supérieurs à 20 % ou 30 %.

Notes:

- Le DRPH peut jouer un rôle clé dans la décarbonisation du secteur ferroviaire pour des applications où les technologies de propulsion alternative ne sont pas bien adaptées. En théorie, il peut être carboneutre selon son cycle de vie. En Californie, certains mélanges de 20 % de biodiesel et de 80 % de DRPH sont actuellement vendus comme étant carboneutres.
- Malgré son fort potentiel de réduction des GES et sa compatibilité avec le matériel et l'infrastructure ferroviaires existants, la disponibilité du DRPH devrait être limitée soit par la disponibilité restreinte des matières premières (cultures alimentaires et non alimentaires et déchets riches en triglycérides), soit par l'immaturité des procédés de production utilisant des matières premières plus abondantes (résidus agricoles et forestiers). Cette contrainte, ainsi que la concurrence d'autres applications de diesel lourd, risque de limiter l'utilisation du DRPH dans les applications ferroviaires (empêcher le remplacement complet du diesel de pétrole par le DRPH).
- Dans le contexte de la décarbonisation profonde, le DRPH peut jouer un rôle sur les lignes ferroviaires à faible volume en tant qu'alternative au diesel de pétrole dans les compositions bimodes, complétées par une technologie de propulsion à émission zéro..

- Il importe de noter que malgré la faible intensité carbone du DRPH, son utilisation entraînera toujours des émissions de polluants atmosphériques, ce qui peut limiter son potentiel dans le contexte des gares de triage ou d'autres opérations dans des zones densément peuplées. Cependant, le DRPH est pratiquement exempt de contaminants métalliques et de composés formant des cendres, ce qui permet une combustion relativement propre.

Reference(s):

- Consultations: TC, Neste, SRY
- Documentation :
 - Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)
 - Ressources naturelles Canada, 2012 (https://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/oeefiles/pdf/transports/carburants-remplacement/ressources/pdf/DRPH_rapport_final_fra.pdf)
 - Université de Toronto, 2019 (<https://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2019/ie/bgrd/backgroundfile-130965.pdf>)
 - Gouvernement du Canada, 2019 (<https://www.rncan.gc.ca/node/idndr-rf-introduction/3670>)

3. DÉFIS

A. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Faible complexité pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	✓
3	Complexité modérée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
2	Complexité élevée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
1	Risque considérable pour la fiabilité. Risque considérable de perdre un bien.	

Sommaire :

L'utilisation du DRPH30 peut entraîner des problèmes mécaniques de faible gravité et des besoins de maintenance accrus. Les problèmes mécaniques se limitent principalement aux moteurs de locomotives antérieurs à 2004, dont les joints d'étanchéité caoutchoutés peuvent se dilater puis se rétracter, entraînant des fuites de carburant en raison de l'utilisation de carburants sans composés aromatiques comme le DRPH. Les problèmes de maintenance liés à des taux de mélange plus élevés dans les moteurs plus récents sont possibles, mais ils ne sont pas encore bien compris en raison du manque d'essais sur le terrain du DRPH pur. Les fabricants de moteurs testent actuellement différents mélanges de DRPH dérivés de diverses matières premières sur différentes plateformes de moteurs et dans différents climats afin de développer des régimes de maintenance et de mettre à jour les limites de garantie.

Notes:

- Le DRPH n'est généralement pas formulé pour être utilisé dans les climats froids, et sa performance par temps froid reste une question qui nécessite une étude plus approfondie. Cependant, contrairement au biodiesel, on peut ajuster son point de trouble en variant les procédés de production et les composants du mélange. Le DRPH fourni à l'Alberta Renewable Diesel Demonstration (ARDD) a été testé avec succès à des températures aussi basses que -27 °C.
- Pour les moteurs plus vieux, comme le DRPH a un indice de cétane élevé (ce qui signifie qu'il brûle plus rapidement que le diesel de pétrole), il a un impact sur le calage des moteurs. Il peut donc provoquer une instabilité dans les moteurs plus vieux, car tous les moteurs sont optimisés pour un certain calage. Les carburants conventionnels ont un indice de cétane de 40 à 48, mais lorsque cet indice est plus élevé (50 et plus), il perturbe le calage du moteur. De nombreux vieux moteurs sont encore en service au Canada, mais ils sont généralement révisés tous les 7 à 10 ans. Il est possible d'excéder un taux de mélange de 30 %, même pour les vieux moteurs, mais il y a des implications mécaniques et de maintenance.
- Les fabricants de moteurs cherchent activement à former des partenariats avec les chemins de fer nord-américains afin de mieux comprendre l'impact des taux de mélange plus élevés de diesel renouvelable sur différents types de moteurs, dans différents climats.

Référence(s) :

- Consultations: Neste, Wabtec, SWRI
- Documentation :
 - Southwest Research Institute, « Low-Carbon Fuels for Locomotives: Biodiesel and Renewable Diesel » (information reçue du SWRI)

- o Université de Toronto, 2019 (<https://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2019/ie/bgrd/backgroundfile-130965.pdf>)

B. RAVITAILLEMENT

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Complexité modérée pour la chaîne d'approvisionnement et/ou les exigences de ravitaillement	
3	Chaîne d'approvisionnement complexe, >2x la durée/fréquence de ravitaillement/charge	
2	Problèmes de disponibilité intermittents, jusqu'à 2x la durée/fréquence de ravitaillement/charge	✓
1	Problèmes de disponibilité fréquents, jusqu'à 2x la durée/fréquence de ravitaillement/charge	

Sommaire:

Dans l'ensemble, les exigences en matière de ravitaillement en DRPH sont très proches de celles du diesel de pétrole. Cependant, il existe d'importants problèmes de disponibilité, qui devraient persister jusqu'en 2035.

Notes:

- La complexité accrue pour la chaîne d'approvisionnement et les problèmes d'approvisionnement, ainsi que les exigences de validation sur la source et la composition du DRPH, peuvent poser des complications modérées pour les chemins de fer.
- Comme on l'a précisé plus tôt, la disponibilité des matières premières, les procédés de production immatures pour les matières premières alternatives et la capacité de raffinage limitée posent des problèmes de disponibilité importants pour le DRPH.

Référence(s):

- Consultations: CP, Wabtec
- Documentation :
 - o Gouvernement du Canada, 2019 (<https://www.rncan.gc.ca/node/idndr-rf-introduction/3670>)
 - o Université de Toronto, 2019 (<https://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2019/ie/bgrd/backgroundfile-130965.pdf>)

C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Formation et/ou règlements additionnels requis	✓
3	Formation et certification et/ou règlements additionnels requis	
2	Préoccupations de sécurité et/ou règlements additionnels considérables requis	
1	Graves préoccupations de sécurité, notamment pour le public, et/ou règlements additionnels complets requis	

Sommaire:

Des spécifications sur la composition du DRPH sont requises pour déterminer ses impacts et ses seuils environnementaux et mécaniques. Des travaux sont en cours et ne devraient pas être compliqués. Les fournisseurs de carburant ne sont pas tenus de divulguer les taux de mélange d'un lot donné aux chemins de fer, ce qui pose un problème pour la performance et le rapport environnementaux, et pour l'essai et la validation des différents mélanges de carburant utilisés.

Notes:

- Il n'existe actuellement aucune spécification réglementaire définitive sur ce qui constitue le DRPH en Amérique du Nord ou dans le monde. Cela pose un problème, car certains intervenants du secteur ferroviaire traitent le DRPH comme un carburant pur (chimiquement identique au diesel de pétrole), alors qu'il ne l'est pas et que sa composition peut varier considérablement. Des normes sont nécessaires pour assurer l'uniformité et la qualité du DRPH.
- La norme ASTM D975 sur le diesel utilise actuellement une définition suffisamment large du diesel pour considérer le diesel de pétrole et le DRPH comme étant chimiquement identiques.
- Bien que les normes sur le diesel de l'Office des normes générales du Canada (ONGC) n'indiquent pas explicitement que le DRPH peut être mélangé à n'importe quel taux, le DRPH correspond déjà à la définition du diesel dans la norme CAN/CGSB 3.517. Ainsi, la norme sur le diesel de l'ONGC permet implicitement le mélange de DRPH à n'importe quel taux. Certains intervenants sont préoccupés par la nécessité d'assurer des taux d'additifs lubrifiants adéquats dans le DRPH, bien que la section 6.22 de la norme CAN/CGSB-3.517 énonce les exigences relatives au pouvoir lubrifiant et à la façon dont il doit être obtenu et testé. Par conséquent, on ne s'attend pas à ce que le DRPH nécessite un développement réglementaire important pour être largement utilisé au Canada.

- Le DRPH influence la fiabilité du moteur et a d'autres effets qui nécessitent une étude plus approfondie. Cette étude devrait être le point de départ de l'élaboration de spécifications réglementaires. Il y a beaucoup d'idées fausses sur le DRPH, et certains fournisseurs vendent des carburants qui sont chimiquement assez différents du diesel de pétrole. Actuellement, différents types de carburants ayant des impacts différents sur l'environnement et la performance sont tous commercialisés sous le nom de DRPH.
- Une fois que des normes spécifiques au DRPH auront été élaborées, il sera possible de mieux l'intégrer aux modèles d'évaluation du cycle de vie afin de déterminer ses impacts environnementaux nets et son potentiel de décarbonisation.

Référence(s):

- Consultations: CP, CN, Wabtec, SWRI
- Documentation :
 - Université de Toronto, 2019 (<https://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2019/ie/bgrd/backgroundfile-130965.pdf>)

ANNEXE E – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE: BATTERIE ÉLECTRIQUE

1. COÛT

A. DÉVELOPPEMENT

Note	Description	Sélection
5	Commercialement disponible : pas de coût de développement	
4	Presque commercialement disponible : coût de développement de <10M \$	
3	10-50M \$	✓
2	50-75M \$	
1	Développement considérable requis avec défis complexes : >75M \$	

Sommaire :

Le coût total du développement, de la mise à l'essai et de la certification de la propulsion électrique par batterie pour le service de grandes lignes est estimé à 20 à 50 millions de dollars.

Notes:

- Progress Rail a conçu une locomotive de manœuvre à batterie, l'EMD Joule, d'une capacité de 1,9 à 2,4 MWh (jusqu'à 3 000 CV). Elle est disponible commercialement depuis 2020. Une R&D additionnelle est nécessaire pour améliorer les temps de charge et évaluer les impacts des cycles fréquents de charge-décharge sur la dégradation de la batterie.
- La locomotive électrique à batterie FLXdrive de Wabtec est en cours d'essai sur un train de BNSF en Californie. La FLXdrive parcourt plus de 16 000 km et permet une réduction moyenne de 10 % de la consommation de carburant lorsqu'elle est utilisée en service actif dans le cadre d'un train diesel-batterie électrique. Bien que la locomotive testée fournisse 2,4 MWh d'énergie, une unité plus grande de 6+ MWh pourrait réduire la consommation de carburant et les émissions de jusqu'à 30 %.
- Une démonstration pluriannuelle de trains à batterie électrique serait probablement bien adaptée à une ligne courte ou à un itinéraire dédié. Son coût serait de 20 à 100 millions de dollars.
- Wabtec a affirmé que sa démonstration de la FLXdrive n'aurait pas été possible sans le soutien financier du gouvernement (par l'intermédiaire du California Air Resources Board). Les partenariats, le financement externe et le développement technologique

devront fonctionner de concert pour que les technologies de batterie électrique soient viables pour le secteur ferroviaire.

- Bien que la technologie soit techniquement mature et commercialement disponible pour les applications de transport de passagers et de triage, une R&D supplémentaire est nécessaire pour en faire une option réalisable pour le service de grandes lignes. Les principaux objectifs de la R&D sont entre autres la réduction du poids et de la taille des batteries, la réduction des temps de charge, le développement d'une infrastructure de charge optimale pour divers scénarios d'utilisation et d'exploitation, l'évaluation de la dégradation des batteries en cas d'utilisation prolongée, l'amélioration de l'efficacité globale des trains pour réduire la demande sur les batteries et la réduction du coût des batteries.
- Wabtec, Genesee & Wyoming (G&W) et l'Université Carnegie Mellon cherchent à collaborer avec le gouvernement des États-Unis pour former et cofinancer un partenariat public-privé axé sur la recherche, la démonstration et la commercialisation de technologies ferroviaires à émissions nulles, en mettant l'accent sur les batteries et les piles à hydrogène et sur les solutions de production d'hydrogène sur place. Le Freight Rail Innovation Institute proposé s'engagerait à développer les technologies dans le cadre du partenariat d'ici 2030.

Référence(s):

- Consultations: CP, CUTRIC, Wabtec, CN
- Documentation:
 - Progress Rail, 2021 (<https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html>)
 - House Committee on Transportation and Infrastructure, 2021 (<https://transportation.house.gov/imo/media/doc/Santana%20Testimony.pdf>)

B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL

Note	Description	Sélection
5	Pas de coût additionnel	
4	Jusqu'à 1 million \$	
3	1-3 millions \$	
2	3-5 millions \$	
1	> 5 millions \$	✓

Sommaire:

Le coût en capital additionnel par locomotive de grande puissance (HHP) est estimé à 9 millions de dollars. Les coûts en capital sont nettement inférieurs pour les locomotives de passagers ou de manœuvre de moindre puissance. Les coûts additionnels pour les locomotives de manœuvre (par rapport aux groupes électrogènes de niveau 4) sont d'environ 1 million de dollars.

Notes:

- Les batteries sont de loin le composant le plus coûteux des locomotives électriques. En 2019, le coût des éléments de batterie était de 160 \$ par kWh, tandis que les blocs-batteries coûtaient 350 \$ par kWh. Cependant, en 2035, ces coûts devraient respectivement être de 62 \$ et 125 \$ par kWh pour les éléments et les blocs. Au cours de la dernière décennie, le prix des batteries lithium-ion diminue d'environ 10 % par année.
- Bien que les chargeurs de batteries ne soient pas en production en Amérique du Nord, leur coût estimé (6,2 MWh) est de 4,2 millions de dollars.
- Selon les chiffres de 2015, les locomotives de grande puissance (~4 400 CV) devraient chacune être remplacées par trois chargeurs d'une capacité d'environ 6 MWh (pour n'utiliser que 50 % de leur capacité afin d'éviter l'épuisement) afin de respecter les paramètres de performance. Ainsi, si un train de marchandises de 100 wagons utilisait de 2 à 4 locomotives, il aurait besoin de 6 à 12 chargeurs (cette estimation repose sur les chiffres de 2015, et la densité énergétique des batteries s'est nettement améliorée depuis, de sorte qu'il faut tenir compte de la limite inférieure des estimations des chargeurs). Cela signifierait qu'un nombre important de wagons dans chaque rame ne généreraient pas de revenus. Avec trois batteries par locomotive HHP, le coût additionnel par locomotive serait d'environ 9 millions de dollars.
- Les estimations du coût additionnel n'incluent pas l'infrastructure de charge ou de transmission électrique aux gares de triage.
- La disponibilité des matières premières (p. ex. lithium, cobalt, nickel, manganèse, graphite) nécessaires à la production des batteries deviendra un problème plus pressant à l'avenir, car ces matières feront l'objet d'une concurrence accrue de la part d'un nombre croissant d'applications de transport et autres. Cependant, de nouvelles compositions chimiques pourraient permettre la future production de batteries utilisant des matières premières alternatives plus largement disponibles.
- La densité énergétique des batteries lithium-ion devrait doubler d'ici 2035, et la taille et le poids des batteries seront réduits de moitié.

- La plupart des chemins de fer ont tendance à utiliser des locomotives anciennes et peu coûteuses comme locomotives de manœuvre, et le remplacement de ces dernières par des technologies coûteuses à émissions faibles ou nulles serait une occasion significative de réduire les émissions de GES, mais à un coût élevé pour les chemins de fer.

Référence(s):

- Consultations: SRY, CP
- Documentation:
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)
 - California Air Resources Board, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/final_rail_tech_assessment_11282016%20-%20ADA%2020200117.pdf)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - IEA, 2019 (https://iea.blob.core.windows.net/assets/fb7dc9e4-d5ff-4a22-ac07-ef3ca73ac680/The_Future_of_Rail.pdf)

C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE

Note	Description	Sélection
5	Pas d'infrastructure additionnelle requise	
4	L'infrastructure existante peut être utilisée avec des modifications	
3	Nouvelle infrastructure considérable requise aux gares de triage seulement	
2	Nouvelle infrastructure considérable requise aux gares de triage et à d'autres endroits	✓
1	Nouvelle infrastructure considérable requise sur l'ensemble du réseau	

Sommaire:

Les exigences additionnelles en matière d'infrastructure de ravitaillement et de charge sont entre autres les suivantes:

- Infrastructure supplémentaire de transmission d'électricité desservant les gares de triage et d'autres points de charge.
- Équipement de charge aux gares de triage et à d'autres points de charge (notamment en route), ce qui peut comprendre toute combinaison d'électricité caténaire, de

troisième rail ou d'infrastructure de charge à brancher ou à connecter en courant continu.

- Utilisation possible de systèmes de stockage stationnaires (probablement des batteries) pour réduire les charges de demande (pics de consommation électrique) sur les sites de charge et réduire l'intensité carbone de l'électricité utilisée.

Notes:

- Les batteries peuvent être rechargées pendant que les trains sont en mouvement, à l'aide de systèmes de contact sur caténaire ou sur troisième rail sur certains tronçons, ou dans les gares de triage à l'aide d'électricité caténaire, de troisième rail ou d'une infrastructure de charge à brancher ou à connecter en courant continu. S'il y a suffisamment de systèmes de contact sur les lignes ferroviaires, ils pourraient réduire la nécessité d'une infrastructure de charge dédiée et branchée aux gares de triage.
- L'Association of American Railroads et les chemins de fer canadiens ont récemment formé un groupe de travail chargé d'évaluer l'infrastructure de charge aérienne des locomotives à batterie (en grande partie pour des raisons de sécurité) ; on a toutefois constaté que ces systèmes seraient difficiles à mettre en place à grande échelle en raison de leur coût.
- Les besoins en énergie du réseau pour charger les batteries aux gares de triage peuvent aller de quelques centaines de kW à plusieurs MW, ce qui signifie que les connexions au réseau peuvent être plus petites que celles qui sont nécessaires pour les systèmes à contact permanent (caténaires). On peut utiliser des batteries dédiées à charge lente aux gares de triage pour puiser de l'énergie dans le réseau et la décharger rapidement dans les batteries au besoin. Quoi qu'il en soit, d'importantes mises à niveau du réseau seront nécessaires aux gares de triage et aux autres points de charge. Les services publics et les fabricants de batteries seront des intervenants clés à impliquer dans tout effort d'électrification.
- En raison de la nature multimodale des systèmes de transport, il est possible de mettre en place des centres de charge de batteries coordonnés et partagés (p. ex. aux terminaux de transbordement), ce qui pourrait permettre aux chemins de fer de réaliser des économies d'échelle et de réduire les coûts de l'infrastructure de charge (par des partenariats avec des entreprises de camionnage et d'autres intervenants). L'électrification d'autre matériel dans les centres d'expédition pourrait également améliorer la proposition de valeur de l'infrastructure de charge.

Référence(s):

- Consultations: CP, CN, NRC
- Documentation:

- o Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
- o IEA, 2019 (https://iea.blob.core.windows.net/assets/fb7dc9e4-d5ff-4a22-ac07-ef3ca73ac680/The_Future_of_Rail.pdf)

D. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Économies de plus >20 %	
4	Économies de jusqu'à 20 %	✓
3	Égal au diesel	
2	Jusqu'à deux fois le coût du diesel	
1	>2x	

Sommaire:

Les coûts d'exploitation des trains à batterie devraient être à peu près équivalents à ceux des trains au diesel, compte tenu du matériel et du prix du carburant actuels. D'ici 2030, les coûts d'exploitation des trains à batterie devraient permettre de réaliser des économies importantes par rapport au diesel.

Notes:

- Sur une durée de vie utile de 15 ans d'une batterie de 6,2 MWh, l'estimation de 2016 de CARB indique que deux séries de remplacement seraient nécessaires, à un coût de 2,2 millions de dollars chacune. Ces coûts devraient diminuer considérablement d'ici 2030. Selon une estimation plus récente de Network Rail, les éléments de batterie devraient durer jusqu'à 10 ans avant de devoir être remplacés. En général, le remplacement des éléments de batterie est recommandé lorsque la capacité énergétique tombe à 80 % de la capacité nominale (les batteries usagées pourraient être réutilisées pour des applications de stockage stationnaire). Comme on estime qu'il faudrait trois batteries pour remplacer chaque locomotive au diesel HHP, les coûts de remplacement des éléments de batterie sur une période de 15 à 20 ans s'élèveraient à environ 13,2 millions de dollars. Les locomotives au diesel sont normalement révisées tous les 10 à 15 ans (pour améliorer le rendement énergétique, réduire les coûts de maintenance et les temps d'arrêt, améliorer la traction et, dans certains cas, respecter la réglementation), au coût d'environ 1,5 à 2 millions de dollars. Ça signifie que les coûts de maintenance additionnels (à l'exclusion de l'entretien courant, qui devrait être moindre pour la propulsion par batterie) s'élèveraient à environ 11,5 millions de dollars selon les prix actuels.

- Les véhicules alimentés par des réseaux électriques sont nettement moins coûteux à alimenter que ceux qui utilisent du diesel. Le matériel roulant alimenté par batterie a le potentiel de réduire les coûts globaux de carburant d'environ 75 % par rapport au diesel. Les prix de l'électricité offrent également l'avantage d'être beaucoup moins variables que ceux du diesel (ce qui rend la budgétisation des coûts de carburant plus prévisible et plus simple). Le coût annuel moyen du carburant pour les locomotives de grandes lignes exploitées au Canada était d'environ 850 000 \$ en 2019 (13 millions de dollars sur 15 ans), en supposant une consommation moyenne de 730 000 litres de diesel par locomotive. En comparaison, l'électricité devrait coûter environ 3 millions de dollars sur 15 ans, pour une économie totale de carburant d'environ 10 millions de dollars (ou de presque 14 millions de dollars sur 20 ans).
- Les coûts additionnels de maintenance du matériel devraient être compensés par la réduction des coûts du carburant sur une période de 15 à 20 ans. Si l'on exclut les coûts d'exploitation comme l'entretien courant, la main-d'œuvre, les assurances et la réduction de la capacité de chargement due aux wagons non générateurs de revenus, les coûts d'exploitation de la batterie électrique devraient être à peu près équivalents à ceux du diesel. Il importe toutefois de noter que les coûts associés aux technologies diesel risquent d'augmenter à long terme (en raison de normes d'émissions plus strictes, de la tarification du carbone, etc.), alors que les coûts liés aux technologies de batterie électrique devraient diminuer (en raison des économies d'échelle, de la R&D, etc.).
- La performance des batteries lithium-ion par temps froid et chaud devrait s'améliorer considérablement d'ici 2035. Actuellement, les batteries peuvent fonctionner de manière fiable à des températures variant de -20 à +60 °C. D'ici 2035, cette performance devrait passer à -40 à +80 °C.
- Les locomotives au diesel comportent un nombre important de pièces mobiles (et plus de 200 000 pièces internes) qui nécessitent un entretien important et régulier. Les groupes motopropulseurs électriques à batterie permettent de simplifier le matériel nécessaire pour assurer la traction. Une plus grande simplicité se traduit par la réduction des temps d'arrêt, la diminution des besoins de stationnement dans les dépôts et la réduction du stockage des locomotives de rechange. Cependant, les avantages de la réduction des temps d'arrêt pour l'entretien courant offerts par la batterie électrique pourraient être contrebalancés par les temps d'arrêt nécessaires à la charge. Des démonstrations pourraient faire la lumière sur ce point et d'autres enjeux opérationnels.
- L'infrastructure de charge des batteries pourrait avoir des coûts de maintenance imprévus, qui devront être évalués par des démonstrations et pris en compte dans les coûts opérationnels totaux.
- Les conducteurs, les techniciens et le personnel des gares de triage devront suivre une formation sur la maintenance, le ravitaillement et la sécurité de la technologie de batterie électrique, mais les coûts connexes ne devraient pas influencer de manière significative les coûts d'exploitation totaux de façon continue.

Référence(s):

- Consultations: CP, SRY, CN
- Documentation
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - California Air Resources Board, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/final_rail_tech_assessment_11282016%20-%20ADA%2020200117.pdf)
 - Association des chemins de fer du Canada, rapport sur la Surveillance des émissions des locomotives, 2019
 - Railway Age, 2020 (<https://www.railwayage.com/mechanical/locomotives/does-rebuilding-locomotives-beat-buying-new/>)

2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE

A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES

Note	Description	Sélection
5	>80%	✓
4	50-80%	
3	30-50%	
2	10-30%	
1	<10%	

Sommaire:

Par rapport au diesel, les réductions de GES par matériel sont estimées à plus de 80 %.

Notes:

- Comme c'est le cas avec les systèmes à électricité caténaire, le potentiel de réduction des GES dépend largement de l'intensité carbone des réseaux électriques locaux. En 2018, environ 82 % de l'électricité produite au Canada ne créait pas d'émissions, et ce chiffre devrait augmenter avec l'élimination progressive du charbon et le déploiement des énergies renouvelables.³⁰

³⁰ RNCAN, 2020. <https://www.nrcan.gc.ca/science-and-data/data-and-analysis/energy-data-and-analysis/energy-facts/energy-and-greenhouse-gas-emissions-ghgs/20063>

- La prise en compte du cycle de vie doit intégrer l'impact net de la production et de la mise hors service des batteries nécessaires. Des estimations récentes, qui tiennent compte de l'extraction et du raffinage des matières premières (le maillon le plus intensif en carbone des chaînes d'approvisionnement des batteries), suggèrent une moyenne mondiale de 65 kg d'émissions de CO₂e pour chaque kWh de batterie produit.³¹ Pour chaque batterie de 6,2 MWh, cela équivaldrait à environ 400 t d'émissions de GES. Cependant, l'intensité des émissions de GES de la production de batteries diminue de huit fois quand les réseaux d'électricité et de transport sont alimentés par des énergies renouvelables. Ainsi, les chaînes d'approvisionnement en batteries au Canada auraient un avantage considérable en matière de GES par rapport à la plupart des autres pays, ce qui comprend les États-Unis, où seulement 40 % de la génération d'électricité ne produit pas d'émissions.³²
- Les trains alimentés par batterie réduiraient considérablement ou élimineraient les émissions de PCA dues aux opérations ferroviaires. Ils réduiraient également de manière significative les problèmes de bruit et de vibrations. Bien que ces facteurs ne soient pas pris en compte dans le Cadre d'évaluation, ils sont très importants du point de vue social et sanitaire. Les gares de triage sont souvent situées dans des communautés défavorisées, ou à proximité de celles-ci, qui supportent un lourd fardeau relativement à la pollution atmosphérique. La norme d'émissions de niveau 4 de l'US EPA pour les locomotives, qui est entrée en vigueur en 2015, permettra de récupérer plus de dix fois le coût des locomotives grâce à l'amélioration de la santé publique.
- La locomotive à batterie FLXdrive de 2,4 MWh de Wabtec réduit la consommation de carburant de 10 % lorsqu'elle est utilisée en service actif comme source d'énergie supplémentaire dans un train diesel-batterie-électricité. Une unité de 6+ MWh utilisée dans le même contexte devrait réduire la consommation de carburant et les émissions de 30 %.
- La locomotive de manœuvre EMD Joule de Progress Rail ne produit pas d'émissions quand elle est en service.
- La capture d'énergie par le freinage par récupération pourrait améliorer le rendement énergétique des trains de jusqu'à 15 %. Les gains d'efficacité sont plus prononcés sur les itinéraires avec des démarrages et des arrêts fréquents (p. ex. transport de passagers, courtes distances) ou des changements de pente, de sorte que le fret longue distance pourrait ne pas bénéficier de ces niveaux d'efficacité grâce au freinage par récupération.

31 Hoekstra A. (2019). The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions. Joule, Vol 3. Numéro 6. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435119302715#>)

32 IEA, 2021. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>

- Les locomotives électriques sont efficaces de 90 % à 95 % (90 % à 95 % de l'énergie qui leur est allouée sont convertis en force de traction), même en tenant compte des pertes en ligne et des transformateurs de moteur. En comparaison, les locomotives au diesel classiques modernes (qui sont techniquement des hybrides diesel-électricité) ont un rendement d'environ 40 % (la majeure partie de l'énergie étant perdue sous forme de chaleur résiduelle).
- Une étude américaine a démontré qu'en augmentant de 50 % l'utilisation du train pour le transport de marchandises sur une distance de 800 km, on réduirait les émissions de GES de 60 Mt par année. La combinaison de locomotives à émissions nulles et du transport d'une plus grande partie du fret par train permettrait de réduire les émissions de GES de jusqu'à 120 Mt par année. La réduction de l'intensité carbone du réseau électrique américain entraînerait des réductions encore plus importantes.

Référence(s):

- Consultations: CN, Wabtec, NRC, SWRI
- Documentation:
 - California Air Resources Board, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/final_rail_tech_assessment_11282016%20-%20ADA%2020200117.pdf)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wpcontent/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-InterimProgramme-Business-Case.pdf>)
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)
 - House Committee on Transportation and Infrastructure, 2021 (<https://transportation.house.gov/imo/media/doc/Santana%20Testimony.pdf>)
 - Progress Rail, 2021 (<https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html>)
 - Solutionary Rail, 2017 (<https://www.solutionaryrail.org/buybook>)

B. ADOPTION/ APPLICABILITÉ

Note	Description	Sélection
5	Bien approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	
4	Partiellement approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	
3	Approprié pour le matériel de triage	✓
2	Bien approprié pour le transport de passagers	
1	Non approprié pour le transport de marchandises de grande ligne, et partiellement approprié pour le transport de passagers.	

Sommaire:

Si les trains électriques à batterie sont techniquement réalisables pour tous les types de transport ferroviaire, les principales contraintes sont liées à la densité énergétique des batteries et aux problèmes connexes relativement à la taille, au poids, aux coûts et au nombre total de chargeurs nécessaires pour les services de marchandises et de passagers sur de longues distances. Les applications actuelles se limitent aux services de manœuvre et de triage, ainsi qu'aux trajets potentiellement courts (<400 km), à faible vitesse et avec un temps d'arrêt important (passagers et marchandises).

Notes:

- En raison du volume de stockage d'énergie requis, le coût des trains à batterie est actuellement prohibitif pour le fret de grandes lignes. Ces trains ne devraient pas être réalisables avant 2030 ou 2035. Leur faisabilité dépend en grande partie des progrès réalisés dans les technologies des batteries et de la charge, qui pourraient toutes deux bénéficier des développements dans les secteurs du transport routier ou du stockage stationnaire.
- En raison des exigences extrêmes en matière de puissance, le transport de marchandises de grandes lignes sera probablement le dernier mode de transport ferroviaire pour lequel la propulsion électrique est possible. Comme plus de 90 % des émissions ferroviaires au Canada sont attribuables aux services de transport de marchandises, cela limite la capacité des batteries électriques à contribuer à la décarbonisation profonde du secteur ferroviaire à court et à moyen terme. Cependant, les batteries peuvent jouer des rôles clés dans la décarbonisation des applications hybrides (p. ex. propulsion supplémentaire, réduction du ralenti et freinage par récupération). Les batteries peuvent être ajoutées aux trains électriques conventionnels pour la propulsion sur les tronçons de voie dépourvus de systèmes de contact permanent (p. ex. tunnels, embranchements, etc.).

- Les locomotives de manœuvre Green Goat font l'objet de démonstrations dans divers scénarios depuis 2001. Certaines ont été retirées du service en raison du coût de remplacement des batteries et de problèmes opérationnels (elles utilisent des batteries au plomb comparables à celles utilisées dans les poids lourds). Dans certains cas, il a fallu remplacer les batteries en raison de raccords thermiques inadéquats.
- On a noté que pour les corridors à fort trafic (p. ex. Toronto-Montréal), le transport ferroviaire de marchandises par batterie électrique pourrait être réalisable si la charge par caténaire pouvait avoir lieu à certains endroits pendant que les trains sont en mouvement.
- Les trains bimodes utilisant des batteries dans une capacité limitée sont actuellement disponibles pour toutes les applications ferroviaires. La locomotive FLXdrive de Wabtec a parcouru 16 000 km avec des marchandises dans un train diesel-batterie.
- La vitesse maximale des trains à batteries est actuellement limitée à environ 160 km/h pour optimiser l'efficacité des batteries. Bien que cela constitue un obstacle au train à grande vitesse, cette limite est conforme aux vitesses maximales utilisées sur le réseau ferroviaire canadien.
- Les manœuvres de triage représentent généralement une faible part des émissions des chemins de fer marchandises de grandes lignes, mais une part relativement importante des émissions sur les lignes courtes. Les locomotives de manœuvre électriques offriraient donc les plus grands avantages en matière d'émissions sur les lignes courtes. Les coûts restent toutefois un défi majeur, et un expert a fait remarquer que les chemins de fer d'intérêt local pourraient être les derniers à adopter les technologies à émissions nulles.
- L'interopérabilité des technologies de propulsion sur l'ensemble du continent est essentielle pour les grandes lignes.

Référence(s):

- Consultations: SRY, CN, CP, UBC, CUTRIC, Bob Oliver, NRC, Paul Blomerus, SWRI
- Documentation:
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)
 - California Air Resources Board, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/final_rail_tech_assessment_11282016%20-%20ADA%2020200117.pdf)
 - Association des chemins de fer du Canada, rapport sur la Surveillance des émissions des locomotives, 2019
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)

- o Rail Safety and Standards Board, 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)
- o House Committee on Transportation and Infrastructure, 2021 (<https://transportation.house.gov/imo/media/doc/Santana%20Testimony.pdf>)

3. DÉFIS

A. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Faible complexité pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
4	Complexité modérée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	✓
3	Complexité élevée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
2	Risque considérable pour la fiabilité. Risque considérable de perdre un bien.	
1	Significant risk to reliability. Significant risk of loss of an asset.	

Sommaire:

Les principaux défis opérationnels sont entre autres l'autonomie, le temps d'arrêt nécessaire à la charge, l'infrastructure de charge et la flexibilité de l'exploitation/interopérabilité.

Notes:

- Au cours des premières années de déploiement, on peut supposer que la profondeur de décharge de chaque batterie ne sera que de 50 %, afin de tenir compte des marges d'exploitation et de sécurité du secteur ferroviaire.
- Il existe un compromis entre l'autonomie et le poids total de la rame relativement à la capacité totale de la batterie (plus le poids est élevé, plus l'autonomie est réduite). Ce problème peut être aggravé par le poids des batteries elles-mêmes par rapport au poids total de la rame. Le poids des batteries peut réduire la charge utile maximale sur certains itinéraires où le poids est limité en fonction de l'écartement des rails et/ou du type de substrat.
- Un défi majeur consiste à améliorer l'efficacité globale des trains à batterie électrique et la densité énergétique des batteries. L'amélioration de l'efficacité et de la densité énergétique signifiera qu'il faudra moins de batteries et/ou des batteries plus petites, ce qui réduira les coûts.

- La densité énergétique des batteries lithium-ion devrait doubler d'ici 2035, ce qui signifie que la taille et le poids des batteries seront réduits de moitié.
- Le déploiement de technologies comme la propulsion par batterie électrique pour le transport de marchandises de grande ligne devrait être coordonné à l'échelle continentale. Il existe des accords de puissance entre les chemins de fer du continent ainsi que des actifs partagés (qui doivent être compatibles avec les technologies de propulsion utilisées). De plus, les gares de triage appartenant aux chemins de fer doivent pouvoir assurer l'entretien et le ravitaillement des trains d'autres chemins de fer, nécessitant une importante coordination.
- Les défis opérationnels peuvent être relevés en partie par l'utilisation de supercondensateurs en plus de la technologie de batterie électrique. Ceux-ci peuvent capter toute la puissance de freinage (qui peut être trop importante et trop rapide pour les batteries seules) et réduire la taille et la capacité des batteries en fournissant une partie de la puissance nécessaire à l'accélération.

Référence(s):

- Consultations: SRY, CP, CN, Peter Eggleton, SWRI
- Documentation:
 - California Air Resources Board, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/final_rail_tech_assessment_11282016%20-%20ADA%2020200117.pdf)
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)

B. RAVITAILLEMENT

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Complexité modérée pour la chaîne d'approvisionnement et/ou les exigences de ravitaillement	
3	Chaîne d'approvisionnement complexe, >2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	✓
2	Problèmes de disponibilité intermittents, jusqu'à 2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	
1	Problèmes de disponibilité fréquents, jusqu'à 2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	

Sommaire:

Pour les applications autres que les manœuvres de triage et certains trajets courts, la plupart des experts reconnaissent que la charge et le ravitaillement en carburant devraient avoir lieu à la fois dans les gares de triage et pendant le transport. Cette approche présente de nombreux avantages et inconvénients. Parmi les avantages, citons la possibilité d'utiliser de l'électricité à faible teneur en carbone et à faible coût là où elle est la plus abondante, et parmi les inconvénients, citons les coûts liés à un réseau de charge décentralisé et le nombre de partenariats nécessaires pour garantir une quantité suffisante d'électricité sur un réseau national (et continental).

Notes:

- L'infrastructure de ravitaillement/charge doit pouvoir charger de nombreuses batteries simultanément. Il ne serait pas possible d'échanger des batteries épuisées pour des batteries entièrement chargées dans les gares de triage en raison des coûts élevés des actifs supplémentaires/redondants.
- Le temps d'arrêt pour la charge est un obstacle considérable. À moins qu'une grande partie de la charge puisse se faire pendant que les trains sont en mouvement, cet obstacle peut être prohibitif. Cependant, la densité de puissance des batteries devrait être multipliée par quatre d'ici 2035, ce qui signifie que le temps de charge diminuera considérablement.
- En cas de coupure de courant, les batteries peuvent être utilisées pour alimenter les réseaux caténaires et « sauver » les trains bloqués. Elles peuvent également aider à réduire les charges de pointe dans les gares de triage en servant de source d'énergie supplémentaire.
- La charge de nuit dans les gares de triage pourrait profiter de l'électricité en période creuse, qui est souvent plus faible en carbone (et parfois moins chère) que l'électricité produite pendant la journée.
- Progress Rail a conçu une locomotive à batterie électrique offerte dans le commerce, l'EMD Joule. Cependant, les chemins de fer consultés ont dit que les temps d'arrêt nécessaires à la charge sont actuellement prohibitifs. Bien que les batteries soient performantes en ce qui a trait à l'accélération et la décélération, une autre préoccupation est que les cycles fréquents de charge-décharge peuvent abîmer les batteries. La chimie utilisée est LiFePO.

Référence(s):

- Consultations: CP, CN, Paul Blomerus, SWRI
- Documentation:

- o California Air Resources Board, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/final_rail_tech_assessment_11282016%20-%20ADA%2020200117.pdf)
- o Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)
- o Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
- o Progress Rail, 2021 (<https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html>)

C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Formation et/ou règlements additionnels requis	
3	Formation et certification et/ou règlements additionnels requis	✓
2	Préoccupations de sécurité et/ou règlements additionnels considérables requis	
1	Graves préoccupations de sécurité, notamment pour le public, et/ou règlements additionnels complets requis	

Sommaire:

Le matériel à haute tension peut présenter des risques pour la sécurité, ce qui nécessitera diverses méthodes de formation et mesures de sécurité. Des systèmes de gestion de la sécurité pour la propulsion électrique par batterie devront être élaborés et adoptés par les gouvernements de toute l'Amérique du Nord avant un déploiement significatif.

Notes:

- Le matériel à haute tension peut poser des risques importants pour la sécurité des travailleurs des gares de triage. Toutefois, selon la conception du matériel, les degrés de sécurité requis peuvent être respectés grâce à une conception passive et/ou à des systèmes de détection et de contrôle.
- Les exploitants et les techniciens de trains ont besoin de manuels de sécurité sur les technologies émergentes comme la propulsion par batterie électrique. Les chemins de fer ont souligné le besoin de plus d'information sur les normes de sécurité et les meilleures pratiques liées à la charge des batteries par troisième rail, câbles aériens ou technologies de branchement.

- Il faut parfois de 10 à 20 ans pour que les systèmes de gestion de la sécurité des nouvelles technologies ferroviaires soient approuvés par les organismes de réglementation américains. Le processus canadien est plus ciblé et simplifié, mais les technologies devraient être approuvées des deux côtés de la frontière avant d'être déployées de manière significative.
- L'un des défis liés aux batteries, qui sera probablement relevé d'ici 2035, est l'élimination du risque d'emballement thermique, qui peut poser un problème de sécurité en provoquant des incendies. Ce risque est déjà largement atténué.
- Le Comité de maintenance des locomotives donne des conseils sur les questions d'interopérabilité et de sécurité en Amérique du Nord. Le TTCI (Transportation Technology Centre Inc.) est un institut américain qui réalise des essais pour assurer que les locomotives et les wagons sont suffisamment sécuritaires et robustes pour être déployés. Le TTCI teste actuellement les locomotives à batterie EMD Joule et FLXdrive.

Référence(s):

- Consultations: CP, CN, Bob Oliver
- Documentation:
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)

ANNEXE F – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE : ÉLECTRICITÉ CATÉNAIRE

1. COÛT

A. DÉVELOPPEMENT

Note	Description	Sélection
5	Disponible sur le marché : pas de coût de développement	
4	Presque disponible sur le marché : coût de développement de <10 M \$	✓
3	10-50M \$	
2	50-75M \$	
1	Développement significatif requis avec défis complexes : >75M \$	

Sommaire:

On estime le coût total pour développer, tester et certifier les technologies requises à environ 10 millions de dollars dans un contexte nord-américain. En général, les technologies relatives à l'électrification caténaire de tous les types de transport ferroviaire sont techniquement matures.

Notes:

- Les systèmes caténaires sont utilisés sur les réseaux ferroviaires de transport de marchandises en Europe, en Asie, en Afrique et en Australie. Ces réseaux supportent certains des trains les plus gros et les plus lourds du monde. Selon l'utilisation actuelle, les exigences techniques dans le contexte canadien peuvent être légèrement différentes en raison des besoins supplémentaires en énergie dans des régions comme les Rocheuses, et de la fréquence généralement plus faible du service ferroviaire.
- Les coûts liés au développement de technologies appropriées à une utilisation dans les systèmes caténaires canadiens devraient être inférieurs à 10 millions de dollars.
- En raison de la nature intégrée des réseaux ferroviaires nord-américains, divers intervenants devront contribuer aux solutions de développement, notamment les gouvernements nationaux, les services publics et les associations d'électricité, les fabricants de matériel ferroviaire et les chemins de fer eux-mêmes.

Référence(s):

- Consultations: CN, CUTRIC, Paul Blomerus
- Documentation:
 - CUTRIC, 2019 (<https://cutric-crituc.org/wp-content/uploads/2020/06/FINAL-Rail-Innovation-in-Canada-Top-10-Technology-areas-for-Passenger-and-Freight-Rail-EA-2.pdf>)
 - Paul Blomerus, « Electrification of Freight Rail Sector in Canada », 2019 (fourni par Transports Canada)
 - Solutionary Rail, 2020 (https://www.solutionaryrail.org/what_types_of_locomotives_will_be_required_for_u_s_long_haul_freight_trains)

B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL

Note	Description	Sélection
5	Pas de coût additionnel	
4	Jusqu'à 1 million \$	✓
3	1-3 millions \$	
2	3-5 millions \$	
1	> 5 millions \$	

Sommaire:

On estime les coûts additionnels par locomotive à moins d'un million de dollars pour les locomotives au diesel modernisées, et jusqu'à 3 millions de dollars pour les nouvelles locomotives électriques, jusqu'à ce que le marché soit bien établi en Amérique du Nord.

Notes:

- Les coûts d'infrastructure seraient prohibitifs pour les compagnies de chemin de fer canadiennes qui devraient les supporter seules. Toutefois, si l'infrastructure était en place, les coûts de conversion des parcs de locomotives existants seraient gérables et seraient rapidement récupérés grâce aux économies de carburant. Les moteurs au diesel pourraient être réduits pour être utilisés dans des applications limitées sur les réseaux caténaires (p. ex. zones de chargement et de déchargement, certaines voies d'évitement), comme c'est souvent le cas en Europe.
- En Inde, les locomotives au diesel sont généralement remises à neuf après 18 ans de service. Dans le cadre de la nouvelle stratégie de décarbonisation de l'Inde, les locomotives au diesel seraient dotées de systèmes caténaires au moment des remises à neuf prévues. Les coûts estimés par locomotive sont de 330 000 \$ en utilisant un processus personnalisé, ce qui représente moins de la moitié du coût de remise à neuf d'un moteur au diesel.

- Le coût des nouvelles locomotives électriques est actuellement de 20 % à 30 % inférieur au coût des nouvelles locomotives au diesel sur les marchés matures (p. ex. UE, Royaume-Uni). Toutefois, en Amérique du Nord, les coûts seraient probablement supérieurs à ceux des locomotives au diesel de niveau 4 (qui coûtent actuellement de 3 à 4 millions de dollars chacune) jusqu'à ce que le marché se développe.

Référence(s):

- Consultations: CP, SRY
- Documentation:
 - Solutionary Rail, 2017 (<https://www.solutionaryrail.org/buybook>)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - Business Standard, 2018 (https://www.business-standard.com/article/indian-railways/how-railways-plans-to-convert-diesel-locos-to-electric-at-cheaper-cost-118092400949_1.html)
 - Train Conductor Headquarters, 2018 (<https://www.trainconductorhq.com/how-much-do-locomotives-cost/>)

C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE

Note	Description	Sélection
5	Aucune infrastructure additionnelle requise	
4	Utilisation de l'infrastructure existante avec modifications	
3	Nouvelle infrastructure significative requise aux gares de triage seulement	
2	Nouvelle infrastructure significative requise aux gares de triage et à d'autres endroits	
1	Nouvelle infrastructure significative requise sur l'ensemble du réseau	✓

Sommaire:

L'infrastructure de ravitaillement/charge additionnelle comprend les éléments suivants:

- Des systèmes caténaires de 50 kV seraient nécessaires pour le transport de marchandises, alors que des lignes de 25 kV ou 50 kV conviendraient au transport de passagers.
- Lignes de transmission à haute tension d'une capacité de 115 à 345 kV.

- De nouvelles sous-stations électriques devront probablement être construites tous les 32 à 80 km de voie pour fournir la puissance requise. De nouvelles infrastructures de production et/ou de stockage d'électricité pourraient être nécessaires dans certaines régions. Des tours de transmission à haute tension pourraient devoir être construites dans les régions éloignées, car les réseaux locaux pourraient manquer de puissance.
- Les tunnels, les ponts, les voies d'évitement et d'autres infrastructures ferroviaires existantes nécessiteraient d'importantes modifications pour accueillir des câbles aériens. Des batteries embarquées ou l'utilisation sélective de systèmes de troisième rail pourraient réduire la nécessité de telles modifications dans certaines circonstances.
- Des aiguillages additionnels pourraient être nécessaires pour réduire les perturbations potentielles des pannes de courant.

Notes:

- Lors d'une évaluation réalisée au Royaume-Uni en 2020, on a estimé les coûts d'infrastructure par kilomètre de voie partagée de transport de marchandises et de passagers de 1,7 à 4,3 millions de dollars (le chiffre le plus bas étant prévu en dehors des grandes villes). Ces chiffres sont conformes à une étude de faisabilité sur l'électrification du réseau GO Rail, selon laquelle les coûts estimés par kilomètre pour le transport ferroviaire de passagers sont de 2 millions de dollars (dollars de 2018). L'AIE a estimé le coût de l'infrastructure ferroviaire pour le transport de marchandises à 1,6 million de dollars par kilomètre. Cependant, ce chiffre est basé sur des moyennes mondiales et la plupart des pays utilisent des trains de marchandises plus petits et plus légers que ceux utilisés en Amérique du Nord (pouvant nécessiter des lignes à plus haute tension qui entraînent des coûts plus élevés).
- Les coûts totaux du cycle de vie des systèmes caténaires devraient être inférieurs à ceux des batteries électriques ou des piles à hydrogène sur les lignes à usage intensif (en Europe, ce sont les lignes où quatre DMU à trois wagons ou plus circulent par heure). Selon l'AIE, les systèmes caténaires pourraient être concurrentiels par rapport au diesel sur une période de dix ans sur les lignes où le trafic est supérieur à deux trains par heure.
- Une évaluation réalisée en 2019 pour Transports Canada a révélé que les coûts d'infrastructure de l'électrification de plus de 10 000 km des lignes de transport de marchandises les plus fréquentées entre Vancouver et Montréal s'élèveraient à environ 10,5 milliards de dollars, mais que cela permettrait aux chemins de fer de marchandises de classe 1 du Canada de réaliser des économies de carburant de plus de 750 millions de dollars par année, sur une période de récupération d'environ 14 ans.

- Les coûts sont actuellement prohibitifs pour les lignes dans les régions éloignées, et de nombreux experts affirment que les coûts d'infrastructure sont prohibitifs pour la majorité du réseau ferroviaire canadien, surtout en raison de sa vaste étendue et de sa faible densité. Les coûts d'infrastructure pour électrifier les lignes principales de marchandises se chiffrent en milliards de dollars. Cependant, comme la technologie caténaire est déjà déployée dans de nombreuses régions du monde, les estimations de coûts devraient être plus précises que pour d'autres technologies comme l'hydraulique.
- Les coûts d'infrastructure pour les corridors très utilisés, comme celui de Windsor à Québec, pourraient être économiquement viables. Dans ce cas, les systèmes caténaires devraient être jumelés à des modes de propulsion complémentaires (p. ex. bimode diesel, pile à hydrogène, batterie électrique) pour les trains circulant à l'extérieur d'un corridor électrifié.
- Des systèmes caténaires de 50 kV CA ont déjà été déployés avec succès au Canada, sur l'itinéraire dédié aux mines de charbon de Tumbler Ridge, en Colombie-Britannique.

Référence(s):

- Consultations: VIA Rail, CP, CN, CUTRIC, TC, Bob Oliver, Peter Eggleton
- Documentation:
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - Paul Blomerus, « Electrification of Freight Rail Sector in Canada », 2019 (fourni par Transports Canada)
 - Solutionary Rail, 2017 (<https://www.solutionaryrail.org/buybook>)
 - AIE, 2019 (https://iea.blob.core.windows.net/assets/fb7dc9e4-d5ff-4a22-ac07-ef3ca73ac680/The_Future_of_Rail.pdf)
 - 995 Days - Construction of the Tumbler Ridge Branch Line, 2014 (<https://www.youtube.com/watch?v=Uw8WZ7pBF1k>)

D. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Économies de > 20 %	✓
4	Économies de jusqu'à 20 %	
3	Égal au diesel	
2	Jusqu'à deux fois le coût du diesel	
1	>2x	

Sommaire:

Par rapport au diesel, l'électricité caténaire pourrait entraîner des économies opérationnelles de 25 % à 50 %.

Notes:

- En plus des coûts d'électricité et de maintenance, la formation et la certification du personnel s'ajouteraient aux coûts opérationnels.
- Les nouvelles infrastructures requises pour l'électricité caténaire et les autres technologies de propulsion alternative entraîneraient probablement des coûts supplémentaires et permanents (p. ex. maintien de la tension des caténaires, prévention des inondations dans les zones où se trouvent des troisièmes rails).
- Les locomotives électriques devraient entraîner des coûts de maintenance nettement inférieurs à ceux des plateformes diesel. Les moteurs électriques sont bien établis dans les applications ferroviaires et durent des décennies avec un entretien minimal. Les unités électriques ont un nombre très réduit de pièces mobiles par rapport aux unités au diesel, ce qui réduit les temps d'arrêt et les coûts liés aux pièces de rechange et aux unités de secours redondantes. Une étude hongroise a démontré qu'elles tombent en panne 40 % moins souvent que les unités au diesel, et de nombreuses études européennes ont démontré que les coûts d'exploitation globaux sont réduits de 25 % à 35 %. À long terme, après la construction de l'infrastructure nécessaire, ces systèmes devraient permettre aux chemins de fer de réaliser d'importantes économies opérationnelles par rapport au diesel.
- Les systèmes caténaires pourraient permettre aux chemins de fer de renvoyer l'excédent d'énergie (p. ex. à partir du freinage par récupération) vers le réseau, ce qui pourrait réduire les coûts nets de carburant. L'énergie excédentaire pourrait également être transférée vers des systèmes de stockage d'énergie stationnaires, en particulier dans les zones à forte déclivité.

- Par rapport au diesel, les systèmes caténaires devraient permettre aux chemins de fer canadiens de réaliser des économies de carburant de 71 % à 85 %, selon la région. Le coût du diesel devrait augmenter à l'avenir, ce qui accentuera encore ce fossé. L'utilisation du freinage par récupération peut réduire davantage les coûts d'électricité.
- La locomotive de marchandises de grande ligne moyenne au Canada consomme environ 730 000 litres de diesel par année, pour un coût estimé à 850 000 \$. En réduisant les coûts de 75 %, on pourrait réaliser des économies de carburant d'environ 637 500 \$ par locomotive par année. Sur une période de 30 ans, cela équivaldrait à des économies de carburant de plus de 19 millions de dollars par locomotive. Comme le parc actuel de locomotives de marchandises de classe 1 du Canada compte environ 2 660 unités, les économies combinées de carburant réalisées par le passage du diesel à l'électricité caténaire sur une période de 30 ans s'élèveraient à plus de 50 milliards de dollars. Ce chiffre ne tient pas compte des augmentations prévues du prix du diesel, des changements aux TKB (dont le taux de croissance annuel composé est de 2,4 % depuis 1990) et des améliorations de l'efficacité des locomotives au diesel. L'US EIA prévoit que le prix du diesel de pétrole augmentera de 21 % d'ici 2030 et de 27 % d'ici 2035. En comparaison, les prix de l'électricité ont tendance à être beaucoup plus stables sur de longues périodes.
- Avec les systèmes caténaires, les chemins de fer paieraient essentiellement les coûts de carburant à long terme, dans le cadre des coûts en capital. Il se peut que des mécanismes de financement créatifs de la part du gouvernement aident à combler ce fossé et à répartir les coûts sur de longues périodes.

Référence(s):

- Consultations: CP, CUTRIC, Peter Eggleton, NRC
- Documentation:
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - Solutionary Rail, 2017 (<https://www.solutionaryrail.org/buybook>)
 - US DOE, 2020 (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/ta034_ahluwalia_2020_o.pdf)
 - Association des chemins de fer du Canada, 2021. Rapport sur la Surveillance des émissions des locomotives, 2019
 - Paul Blomerus, « Electrification of Freight Rail Sector in Canada », 2019 (fourni par Transports Canada)

2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE

A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES

Note	Description	Sélection
5	>80%	✓
4	50-80%	
3	30-50%	
2	10-30%	
1	<10%	

Sommaire :

Par rapport au diesel, la réduction des GES par matériel est estimée à plus de 80 %.

Notes:

- Le potentiel de réduction dépend largement de l'intensité carbone du réseau électrique canadien. En 2018, environ 82 % de l'électricité générée à l'échelle nationale ne produisait aucune émission, et ce chiffre devrait augmenter alors que l'élimination progressive du charbon et le déploiement des énergies renouvelables continuent à s'accélérer.³³
- La comptabilité du cycle de vie devrait intégrer l'impact de la production de ciment et d'acier nécessaire pour faciliter la construction de systèmes caténaires, car ce sont des industries à forte intensité carbone. Si des batteries de stockage embarquées ou stationnaires sont nécessaires pour compléter les systèmes caténaires, leur production doit également être prise en compte dans l'évaluation du cycle de vie. Cependant, un avantage comparatif des systèmes caténaires conventionnels est qu'ils évitent l'utilisation de grosses batteries embarquées, qui peuvent avoir une empreinte carbone importante et qui risquent de créer des problèmes de goulots d'étranglement en matière d'approvisionnement en raison de la concurrence d'autres modes de transport et d'autres secteurs économiques. Les systèmes caténaires représentent une solution de décarbonisation unique pour le secteur ferroviaire.
- Les systèmes caténaires permettraient de réduire considérablement ou d'éliminer les émissions de PCA dues aux opérations ferroviaires. De plus, ils réduiraient de manière significative les problèmes de bruit et de vibrations. Bien que ces facteurs ne soient pas pris en compte dans le Cadre d'évaluation, ils sont très importants du point de vue social et sanitaire. Les gares de triage sont souvent situées dans des communautés défavorisées, ou à proximité de celles-ci, qui subissent un lourd fardeau en matière de pollution atmosphérique. La norme d'émission de niveau 4 de l'US

³³ RNCAN, 2020. (<https://www.nrcan.gc.ca/science-and-data/data-and-analysis/energy-data-and-analysis/energy-facts/energy-and-greenhouse-gas-emissions-ghgs/20063>)

EPA pour les locomotives, qui est entrée en vigueur en 2015, rapportera plus de dix fois le coût des locomotives grâce à l'amélioration de la santé publique (avec des investissements publics dans l'infrastructure ferroviaire propre).

- La capture de l'énergie par le freinage par récupération pourrait améliorer de 15 % le rendement énergétique des trains, mais cela nécessiterait l'utilisation de batteries ou d'un flux d'énergie bidirectionnel entre les trains et les réseaux électriques locaux.
- Les locomotives électriques sont généralement beaucoup plus légères que les unités au diesel, à batterie électrique ou à pile à hydrogène, car elles n'ont pas à transporter leurs propres sources d'énergie. Cette réduction de la charge à l'essieu peut se traduire par une réduction de l'usure des voies et de la fréquence de renouvellement des infrastructures. Une étude menée au Royaume-Uni a révélé que le poids moindre des locomotives électriques caténaires leur permettait de transporter 20 % de marchandises de plus que leurs équivalents au diesel et d'effectuer les trajets 10 % plus rapidement.
- Les locomotives électriques ont un rendement de 90 % à 95 % (90 % à 95 % de l'énergie qui leur est allouée est convertie en force de traction), même en tenant compte des pertes en ligne et des transformateurs du moteur. En comparaison, les locomotives au diesel classiques modernes (qui sont techniquement des hybrides diesel-électricité) ont un rendement maximal de 40 % (la majeure partie de l'énergie étant perdue sous forme de chaleur résiduelle).
- Selon le Rail Industry Decarbonisation Taskforce, au Royaume-Uni, l'électrification caténaire est actuellement la seule solution viable pour amener le secteur ferroviaire à un niveau net zéro d'ici 2050.
- Une étude américaine a démontré qu'en augmentant de 50 % l'utilisation des chemins de fer pour transporter toutes les marchandises sur des itinéraires de plus de 800 km, on réduirait les émissions de GES de 60 Mt par année. La combinaison de locomotives à émissions nulles et du transport d'une plus grande partie du fret par train permettrait de réduire les émissions de GES de jusqu'à 120 Mt par année. La réduction de l'intensité carbone du réseau électrique américain entraînerait des réductions encore plus importantes.

Reference(s):

- Consultations: SRY, CN, CP, Paul Blomerus, Bob Oliver
- Documentation :
 - Rail Industry Decarbonisation Taskforce, 2019 (https://www.researchgate.net/publication/334671578_Rail_Industry_Decarbonisation_Taskforce_FINAL_REPORT_TO_THE_MINISTER_FOR_RAIL)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)

- o Solutionary Rail, 2017 (<https://www.solutionaryrail.org/buybook>)
- o House Committee on Transportation and Infrastructure, 2021 (<https://transportation.house.gov/imo/media/doc/Santana%20Testimony.pdf>)

B. ADOPTION/APPLICABILITÉ

Note	Description	Sélection
5	Bien approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	✓
4	Partiellement approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	
3	Approprié pour le matériel de triage	
2	Bien approprié pour le transport de passagers	
1	Non approprié pour le transport de marchandises de grande ligne, et partiellement approprié pour le transport de passagers.	

Sommaire:

Les systèmes caténaires électriques conviennent à tous les types de transport ferroviaire et sont actuellement déployés dans une grande partie du monde, pour le transport de marchandises et de passagers. Ils sont optimaux pour les itinéraires à fort trafic pour des raisons financières, mais ils sont techniquement réalisables pour toute application ferroviaire.

Notes:

- Bien adapté aux corridors ferroviaires de passagers à fort trafic (p. ex. de Windsor à Québec).
- Applications potentielles dans les gares de triage, pour les chemins de fer d'intérêt local et sur des itinéraires dédiés (p. ex. boucles entre les centres de ressources primaires et les ports).
- Les systèmes caténaires peuvent être utilisés pour charger les locomotives à batterie/hybrides sur certains tronçons de la voie.
- L'interopérabilité de l'ensemble du réseau de transport de marchandises nord-américain est d'une importance capitale. Les technologies de propulsion alternative déployées ne peuvent se limiter au Canada. Les actifs actuels du transport ferroviaire de marchandises sont normalisés dans la mesure du possible afin d'optimiser la flexibilité (marchandises, accès à différentes régions, partage des actifs, etc.), et un degré de flexibilité comparable devra être maintenu.

Référence(s):

- Consultations: VIA Rail, SRY, CN, CP, CUTRIC, TC
- Documentation:
 - Paul Blomerus, « Electrification of Freight Rail Sector in Canada », 2019 (fourni par Transports Canada).

3. DÉFIS*A. EXPLOITATION*

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Faible complexité pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
3	Complexité modérée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
2	Complexité élevée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	✓
1	Risque considérable pour la fiabilité. Risque considérable de perdre un bien.	

Sommaire :

Pour le transport de marchandises de grande ligne, l'adoption de systèmes caténaires électriques devrait être coordonnée à l'échelle du continent, sinon les défis opérationnels seront d'une complexité prohibitive. Comme c'est le cas ailleurs dans le monde, il serait préférable de réserver le déploiement des systèmes caténaires aux lignes à fort trafic et de les compléter par d'autres technologies faibles en carbone sur les lignes à trafic plus faible. Sur les itinéraires dédiés, en boucle fermée, ou sur les itinéraires de passagers à fort trafic, les défis opérationnels ne devraient être que légèrement supérieurs à ceux des locomotives au diesel, en supposant que le matériel et l'infrastructure nécessaires sont en place. Il existe une multitude d'exemples mondiaux de réseaux ferroviaires caténaires fonctionnant sans problème. Cependant, il faudrait faire une révision de l'infrastructure, du matériel et des pratiques en Amérique du Nord, et l'optimisation serait longue.

Notes:

- Les problèmes de compatibilité avec les systèmes caténaires et les autres infrastructures comme les tunnels, les ponts, les embranchements desservant les entrepôts ou les usines, les sites de chargement/déchargement, etc. peuvent être considérables. De tels problèmes compliqueraient considérablement le déploiement

de systèmes caténaires à l'échelle du réseau et augmenteraient les coûts. On a suggéré d'utiliser des systèmes de troisième rail électrifiés dans certaines situations, ou des batteries qui pourraient alimenter les trains sur de courtes distances et capter l'énergie du freinage par récupération. Les locomotives bimodes (électricité et diesel) pourraient offrir une certaine flexibilité, mais elles entraînent des coûts et un fardeau accrus.

- Les systèmes caténaires pourraient limiter ou empêcher l'utilisation de wagons à deux ou trois niveaux ou à double empilage. Il existe toutefois des exemples de réseaux ferroviaires utilisant des systèmes caténaires convenant aux wagons à double empilage, notamment un tronçon du réseau CSX sur la côte est des États-Unis et près de 4 000 km de voies sur le réseau de l'Indian Railways (des agrandissements sont prévus). Sur ces réseaux, qui sont plus coûteux que les réseaux caténaires classiques, les fils aériens sont suspendus à environ 8 mètres de la voie.
- L'utilisation de systèmes caténaires pourrait compliquer l'adaptation des chemins de fer au changement climatique, car des problèmes de givrage en hiver et d'affaissement des câbles en cas de chaleur extrême ont été signalés.
- L'interopérabilité de l'infrastructure ferroviaire et de la propulsion sur l'ensemble du continent est essentielle au transport ferroviaire des marchandises. Les technologies déployées au Canada devraient être adoptées aux États-Unis pour que leur utilisation soit généralisée. Si l'électrification est faite au coup par coup, cela pourrait entraîner des goulots d'étranglement aux endroits où les locomotives électriques devront être remplacées par des locomotives hybrides diesel-électricité conventionnelles, ou vice-versa.
- Le démarrage simultané de nombreuses locomotives sur un même site pourrait provoquer des courts-circuits sur les réseaux électriques locaux, et une coordination significative avec les services publics visés sera essentielle. L'utilisation inégale de l'électricité à haute tension pourrait créer des défis importants du point de vue de l'équilibrage des charges.
- Les unités électriques caténaires sont sujettes aux coupures de courant locales, ce qui peut entraîner des retards importants et coûteux.
- Nombre de ces défis ont été identifiés par l'Association of American Railroads (AAR) dans une fiche d'information sur les systèmes caténaires électriques récemment publiée. Certains des problèmes identifiés par l'AAR ont été réfutés par des experts ferroviaires (p. ex. ici et ici), bien qu'on reconnaisse que nombre de ces problèmes posent des défis opérationnels importants.

Référence(s):

- Consultations: VIA Rail, CP, Paul Blomerus, SRY, NRC, TC
- Documentation:
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - California Air Resources Board, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/msprog/tech/techreport/final_rail_tech_assessment_11282016.pdf)
 - Solutionary Rail, 2017 (<https://www.solutionaryrail.org/buybook>)
 - Association of American Railroads (AAR), 2020 (<https://www.aar.org/wp-content/uploads/2020/12/AAR-Electrification-Fact-Sheet.pdf>)
 - International Railway Journal, 2020 (<https://www.railjournal.com/freight/indian-railways-launches-electric-double-stack-container-operation/>)

B. RAVITAILLEMENT

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Complexité modérée pour la chaîne d'approvisionnement et/ou les exigences de ravitaillement	
3	Chaîne d'approvisionnement complexe, >2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	
2	Problèmes de disponibilité intermittents, jusqu'à 2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	✓
1	Problèmes de disponibilité fréquents, jusqu'à 2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	

Sommaire:

Alors que le « ravitaillement » dans le cas des systèmes caténaires consiste simplement à maintenir une connexion aux fils sous tension, l'alimentation adéquate de ces fils sur une base régulière présente une série de défis propres à cette technologie de propulsion. Si cette technologie présente également une série de possibilités uniques liées au mouvement de « l'électrification totale », elle nécessiterait la création d'une nouvelle chaîne d'approvisionnement en carburant pour le secteur ferroviaire.

Notes:

- Les demandes d'énergie pour le transport de marchandises en Amérique du Nord pourraient dépasser les demandes dans d'autres parties du monde qui utilisent des systèmes caténaires pour alimenter les réseaux ferroviaires. Cependant, des pays

comme la Chine, la Russie, l'Afrique du Sud et l'Australie utilisent actuellement des trains de marchandises alimentés par des systèmes caténaires qui sont plus lourds que les trains de marchandises de ligne typiques utilisés en Amérique du Nord. Tous ces réseaux utilisent des systèmes de 25 ou 50 kV, ces derniers étant utilisés pour fournir une puissance supplémentaire ou prolonger la distance entre les sous-stations électriques.

- Les pannes de courant locales pourraient entraîner des retards et une congestion considérables.
- La technologie de l'énergie bidirectionnelle pourrait permettre aux trains de remettre l'excédent d'énergie (p. ex. à partir du freinage par récupération) dans le réseau, mais cette technologie est encore au stade de précommercialisation.
- Certaines zones pourraient nécessiter une capacité de production supplémentaire ou des sous-stations pour fournir l'énergie nécessaire aux systèmes caténaires. Une coordination importante avec les services publics serait requise.

Référence(s):

- Consultations: TC, NRC
- Documentation:
 - California Air Resources Board, 2016 (https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/msprog/tech/techreport/final_rail_tech_assessment_11282016.pdf)
 - Solutionary Rail, 2020 (https://www.solutionaryrail.org/what_types_of_locomotives_will_be_required_for_us_long_haul_freight_trains)

C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Formation et/ou règlements additionnels requis	
3	Formation et certification et/ou règlements additionnels requis	
2	Préoccupations de sécurité et/ou règlements additionnels considérables requis	✓
1	Graves préoccupations de sécurité, notamment pour le public, et/ou règlements additionnels complets requis	

Sommaire:

Les travailleurs des gares de triage, les techniciens et les équipages devraient recevoir une formation sur l'utilisation et l'entretien sécuritaires du matériel à haute tension. Des normes réglementaires et des certifications à jour seraient nécessaires pour les systèmes caténaires alimentant les trains de marchandises nord-américains. Des campagnes éducatives et des messages de sécurité destinés au grand public seraient également requis.

Notes:

- L'Association canadienne de normalisation (CSA) a publié la norme Lignes directrices sur l'électrification des chemins de fer (CAN/CSA-C22.3 NO. 8-M91) en 1992 et l'a révisée en 2003.
- Les systèmes caténaires à haute tension peuvent poser des risques considérables pour la sécurité des travailleurs des gares de triage. De plus, les systèmes de troisième rail électrifiés poseraient des risques pour la sécurité de toute personne ayant accès à l'infrastructure ferroviaire. Des normes de sécurité pour le personnel et le grand public, ainsi que des campagnes de sensibilisation, seraient nécessaires.
- Une étroite coordination avec les décideurs et les chemins de fer américains et mexicains serait essentielle pour faciliter le déploiement de systèmes caténaires pour le transport de marchandises.
- Outre les normes de sécurité, des études de faisabilité et des démonstrations devront probablement précéder le déploiement commercial. Selon une estimation, il faudrait peut-être 15 ans avant qu'une mise en œuvre significative puisse commencer. Selon une autre estimation, le financement, la conception, l'obtention des permis et la construction d'un système caténaire national pour le transport de marchandises pourraient prendre 30 ans.
- Comme les systèmes caténaires sont déjà déployés à l'échelle mondiale, les normes de sécurité et de conformité d'autres juridictions pourraient servir de point de départ au Canada.

Référence(s):

- Consultations: SRY, CN, CUTRIC, TC
- Documentation:
 - Paul Blomerus, « Electrification of Freight Rail Sector in Canada », 2019 (fourni par Transports Canada).

ANNEXE G – ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE DÉTAILLÉE : PILE À HYDROGÈNE

1. COÛT

A. DÉVELOPPEMENT

Note	Description	Sélection
5	Disponible sur le marché : pas de coût de développement	
4	Presque disponible sur le marché : coût de développement de <10 M \$	
3	10-50M \$	
2	50-75M \$	✓
1	Développement significatif requis avec défis complexes : >75M \$	

Sommaire:

On estime le coût total du développement, de la mise à l'essai et de la certification à 50 à 75 millions de dollars,³⁴ bien qu'il existe une grande incertitude quant aux coûts de développement de l'hydrail nécessaires pour que la technologie atteigne une maturité commerciale pour toutes les applications ferroviaires en Amérique du Nord.

Notes:

- La technologie des piles à hydrogène est déjà viable pour les applications de transport de passagers et de triage (voir la section 2B), ainsi que pour d'autres modes de transport, mais elle n'a pas encore été mise à l'essai pour le transport de marchandises de grandes lignes. Même si les essais des technologies hydroélectriques pour les applications de grandes lignes commençaient maintenant, il faudrait probablement attendre au moins 4 à 5 ans avant qu'un train à hydrogène puisse être approuvé pour une utilisation sur grandes lignes. Un expert a souligné que si les piles à hydrogène sont à un stade élevé de préparation technologique, ce n'est pas le cas des locomotives.
- Le CP est en train de transformer une ancienne locomotive diesel-électrique de transport de marchandises en locomotive de manœuvre à piles à hydrogène, remplaçant son moteur et son alternateur de traction au diesel par des piles (six modules de 200 kW) et une batterie pour alimenter ses moteurs de traction électriques. Les piles à hydrogène seront fabriquées par Ballard. La locomotive devrait être en service actif d'ici la fin de 2022. Le CP veut former des partenariats avec des fabricants de matériel ferroviaire pour poursuivre le développement de l'hydrail.

³⁴ Tous les montants de cette évaluation ont été convertis en dollars canadiens à des fins de comparaison.

- La modernisation des locomotives existantes avec des piles à hydrogène et des batteries est une option viable, remplaçant la construction de locomotives à piles à hydrogène. Les moteurs au diesel sont généralement revus tous les 10 à 15 ans, et la modernisation pourrait avoir lieu à ce moment. Le retrait des moteurs au diesel devrait permettre de libérer suffisamment d'espace pour les piles à hydrogène et les batteries (l'espace de stockage de l'hydrogène est une contrainte abordée aux sections 2B et 3B). La modernisation est sensée à court et à moyen terme, et peut permettre de diriger le développement d'une nouvelle génération de locomotives à long terme. Cependant, la modernisation devrait coûter presque aussi cher que les locomotives à piles à hydrogène spécialement conçues. Comme pour d'autres technologies, les coûts de production devraient diminuer considérablement en fonction du volume.
- Wabtec, Genesee & Wyoming (G&W) et l'Université Carnegie Mellon veulent collaborer avec le gouvernement des États-Unis pour former et cofinancer un partenariat public-privé axé sur la recherche, la démonstration et la commercialisation de technologies ferroviaires à émissions nulles, en mettant l'accent sur les batteries électriques et les piles à hydrogène avec des solutions de génération d'hydrogène sur place. L'Institut proposé s'engagerait à développer les technologies dans le cadre du partenariat d'ici 2030.
- Les experts sont partagés sur la longévité des piles à hydrogène dans les applications ferroviaires. Certains pensent qu'il faudrait les remplacer tous les 5 à 10 ans, alors que d'autres affirment qu'elles devraient durer aussi longtemps que les moteurs au diesel. Il faut faire une R&D additionnelle pour déterminer un calendrier de remplacement plus précis dans des cycles de service réels. L'entreprise CAD Railway Industries, de Montréal, a été suggérée comme site possible pour les tests d'endurance des locomotives à piles à hydrogène.
- La section 3C détaille certains des défis que pose l'hydrail en matière d'essais et de certification. Dans certains cas, les normes et les pratiques conçues pour l'hydrail dans des juridictions comme l'UE peuvent être utilisées comme point de départ.
- Le Canada est l'un des principaux fabricants mondiaux de la technologie des piles à hydrogène, et le développement de l'hydrail pourrait offrir des avantages en matière de développement économique au palier national.

Référence(s):

- Consultations: CP, Bob Oliver, UBC, Ballard, CUTRIC, Peter Eggleton, TC
- Documentation:
 - TELLIGENCE Group, 2020 (<https://static1.squarespace.com/static/5b193e81cef372d012efda72/t/5f7b42e1a96b3a18f431f9f1/1601913574512/Hydrail+Prerequisites+-+2020+Final+Revision-converted.pdf>)

- o House Committee on Transportation and Infrastructure, 2021 (<https://transportation.house.gov/imo/media/doc/Santana%20Testimony.pdf>)
- o Railway Age, 2021 (<https://www.railwayage.com/mechanical/locomotives/cp-hydrogen-locomotive-pilot-powered-by-ballard/>)

B. MISE EN ŒUVRE – COÛT EN CAPITAL

Score	Description	Selection
5	Pas de coût additionnel	
4	Jusqu'à 1 million \$	
3	1-3 millions \$	
2	3-5 millions \$	
1	> 5 millions \$	✓

Sommaire :

Le coût additionnel par locomotive est actuellement estimé à 6,5 millions de dollars pour les locomotives de marchandises de grande ligne, à environ 300 000 \$ pour les locomotives de passagers (sans batterie) et à environ 200 000 \$ pour les locomotives de manœuvre. À long terme, en supposant une augmentation significative de la production des piles à hydrogène et de l'hydrogène vert, le coût en capital pourrait atteindre la parité avec le diesel pour les locomotives de passagers et de manœuvre et être réduit à pas moins d'un million de dollars pour les marchandises.

Notes:

- Le ministère américain de l'Énergie estime qu'actuellement, le coût en capital des locomotives de marchandises à piles à hydrogène représente 31 % du coût total de possession et est environ 2,7 fois supérieur à celui des locomotives diesel. Chaque locomotive à piles à hydrogène coûte environ 3,2 millions de dollars, chaque système de piles à hydrogène coûte environ 1 million de dollars et chaque bloc de batteries de 100 kWh coûte environ 125 000 \$. Cela représente environ 4,3 millions de dollars par locomotive à hydrogène adaptée aux manœuvres. Chaque pile à hydrogène devrait coûter environ 6,2 millions de dollars, bien que ces piles ne soient pas encore en production. Un réservoir serait nécessaire pour répondre aux spécifications d'une seule locomotive de marchandises. Le coût d'une locomotive de marchandises à hydrogène devrait donc s'élever à 10,5 millions de dollars. Tous les coûts des composants, à l'exception de ceux des locomotives (qui resteront constants), devraient diminuer de moitié à moyen terme (pour un total d'environ 7 millions de dollars) et de trois quarts à long terme (pour un total d'environ 5 millions de dollars), en supposant que les niveaux de production nécessaires sont atteints (production annuelle de >100 000 systèmes de piles à hydrogène pour véhicules lourds aux États-Unis).

- Le coût en capital des locomotives à hydrogène pour le transport interurbain de passagers devrait être beaucoup moins élevé, car il est peu probable qu'elles nécessitent un réservoir à hydrogène, elles se déplacent à des vitesses moyennes plus faibles et elles effectuent des arrêts plus fréquents que les trains de marchandises. Le coût en capital des locomotives à hydrogène pour passagers ne devrait être supérieur que d'environ 7 % à celui du diesel. Ce coût suppose que ces locomotives transporteront 500 kg de liquide cryogénique, par opposition à l'hydrogène gazeux, bien qu'un réservoir puisse ne pas être nécessaire avec l'hydrogène gazeux à 350 bars, selon l'itinéraire (voir la section 3B pour obtenir plus d'information sur le ravitaillement).
- En Allemagne, le fournisseur Alstom a produit des wagons de passagers à hydrogène autoalimentés au coût d'environ 10 millions de dollars chacun, bien que cela comprenne une unité de ravitaillement mobile. Ces coûts sont nettement supérieurs aux estimations du ministère de l'Énergie américain. Le gouvernement allemand a alloué 40 % de la différence de coût entre les unités de propulsion à l'hydrogène et au diesel. La durée de vie estimée est de plus de 30 ans, mais les piles à hydrogène et les batteries (d'au moins 100 kWh chacune) devront probablement être remplacées à de nombreuses reprises au cours de cette période.
- Le ministère de l'Énergie américain estime le coût actuel des systèmes de stockage à 1 400 \$ par kg d'hydrogène liquide (à environ -200 °C), qui pourrait baisser à 340 \$ par kg à long terme avec une capacité de production suffisante. Avec des capacités de stockage de 500 kg par unité multiple d'hydrogène, cela signifierait des coûts de 700 000 \$ par système de stockage embarqué, pouvant diminuer jusqu'à 170 000 \$ à l'avenir.
- La modernisation des locomotives au diesel et le remplacement des moteurs par la technologie à hydrogène sont viables et rentables par rapport aux locomotives spécialement construites (non encore disponibles en Amérique du Nord). Des réductions de coûts sont attendues avec une augmentation de la production.
- Les batteries, les supercondensateurs (qui peuvent être utilisés pour fournir une propulsion supplémentaire et capter l'énergie du freinage), les réservoirs de stockage d'hydrogène et les piles à combustible (avec refroidissement) représentent un coût en capital élevé, mais peuvent permettre de limiter les coûts liés à l'énergie s'ils sont durables.
- Le matériel de ravitaillement entraînera un coût en capital initial élevé, mais des démonstrations sont nécessaires pour déterminer des fourchettes de prix précises. À grande échelle, les locomotives à hydrogène et l'infrastructure de ravitaillement devraient être rentables, mais le passage à cette échelle sera un défi majeur pour le secteur ferroviaire. Ces estimations ne comprennent pas le matériel et l'infrastructure de ravitaillement, de compression, de stockage ou de transmission électrique aux gares de triage.

- Les chemins de fer pourraient être plus intéressés par l'adoption de nouvelles technologies comme les locomotives à hydrogène si le Canada augmentait les taux de déduction pour amortissement (DPA) pour les nouveaux actifs ferroviaires. La réduction de la durée d'appréciation offrirait des avantages aux chemins de fer quant au coût en capital. La limitation des taxes sur l'hydrogène (comme la taxe d'accise de 4 cents le litre sur le diesel de pétrole) pourrait également encourager l'adoption.

Référence(s):

- Consultations: Ballard, Peter Eggleton, UBC
- Documentation:
 - Stratégie canadienne pour l'hydrogène, 2020 (https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-fr-v4.pdf)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - TELLIGENCE Group, 2020 (<https://static1.squarespace.com/static/5b193e81cef372d012efda72/t/5f7b42e1a96b3a18f431f9f1/1601913574512/Hydrail+Prerequisites+-+2020+Final+Revision-converted.pdf>)
 - RSSB, 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)
 - Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/ta034_ahluwalia_2020_o.pdf)

C. MISE EN ŒUVRE – INFRASTRUCTURE

Note	Description	Sélection
5	Aucune infrastructure additionnelle requise	
4	Utilisation de l'infrastructure existante avec modifications	
3	Nouvelle infrastructure significative requise aux gares de triage seulement	✓
2	Nouvelle infrastructure significative requise aux gares de triage et à d'autres endroits	
1	Nouvelle infrastructure significative requise sur l'ensemble du réseau	

Sommaire :

L'infrastructure de ravitaillement/charge additionnelle pourrait comprendre les éléments suivants :

- De matériel et une infrastructure de stockage, de compression et de distribution

de l'hydrogène seraient probablement nécessaires aux gares de triage et aux sites de ravitaillement. Une infrastructure de distribution comme des pipelines peut être utilisée si une source d'hydrogène se trouve à proximité.

- Des sous-stations électriques et une infrastructure de transmission à haute tension seront nécessaires si des électrolyseurs sont installés aux gares de triage ou aux sites de ravitaillement. La compression, la liquéfaction et le refroidissement de l'hydrogène consomment également beaucoup d'énergie et nécessiteront probablement une mise à niveau des systèmes électriques aux gares de triage.

Notes:

- Les trains à hydrogène nécessitent peu de modifications à l'infrastructure ferroviaire existante. Cependant, ils nécessitent la construction de nouveaux systèmes de ravitaillement (et éventuellement de systèmes de production d'hydrogène). L'infrastructure d'hydrogène existante limitée nécessite des investissements additionnels dans l'offre et la demande, un scénario « de la poule et de l'œuf » pouvant compliquer les investissements initiaux.
- Comme la technologie des piles à hydrogène ne nécessite pas de modifications majeures à l'infrastructure ferroviaire en dehors des gares de triage et des points de ravitaillement, les locomotives peuvent être intégrées progressivement aux parcs existants, sur les itinéraires où l'hydrogène est disponible.
- En Allemagne, les coûts des unités mobiles de distribution d'hydrogène en bordure de voie pour les trains de passagers Coradia iLint ont été inclus dans l'achat de chaque unité d'alimentation. On fait un ravitaillement mobile pour réduire les coûts en capital et d'infrastructure pendant les premiers déploiements de l'hyd rail. Il s'agit d'hydrogène vert produit sur place par électrolyse et stocké dans une citerne mobile, qui doit permettre de ravitailler un train dans le même délai qu'un train au diesel.
- La production d'hydrogène par électrolyse peut perturber les systèmes de production d'électricité, et il faut allouer suffisamment d'énergie pour répondre à une demande constante. Cela peut augmenter les coûts pour les chemins de fer (s'ils produisent de l'hydrogène dans les installations de ravitaillement) ou entraîner une hausse des prix du carburant. La Figure 1 présente un aperçu des éléments clés d'un écosystème hyd rail.
- Selon une étude de faisabilité faite par Metrolinx en 2018, les coûts de construction et d'exploitation d'un système de piles à hydrogène pour le transport de passagers sont équivalents à ceux d'un système caténaire conventionnel.

Figure 1: Éléments d'un système hydrail (source: TELLIGENCE Group, 2020)

Référence(s):

- Consultations: CP, Ballard
- Documentation:
 - Stratégie canadienne pour l'hydrogène, 2020 (https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-fr-v4.pdf)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - TELLIGENCE Group, 2020 (<https://static1.squarespace.com/static/5b193e81cef372d012efda72/t/5f7b42e1a96b3a18f431f9f1/1601913574512/Hydrail+Prerequisites+-+2020+Final+Revision-converted.pdf>)

D. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Économies de >20 %	
4	Économies de jusqu'à 20 %	
3	Égal au diesel	
2	Jusqu'à deux fois le coût du diesel	
1	>2x	✓

Sommaire:

Le coût additionnel d'exploitation, par rapport au diesel, est environ trois fois plus élevé pour les marchandises et les passagers, et environ deux fois plus élevé pour les locomotives de manœuvre. Ces coûts devraient diminuer sensiblement à long terme, si la production de la technologie de l'hydrogène augmente considérablement.

Notes:

- Selon le ministère de l'Énergie américain, le coût de l'hydrogène représente actuellement de 44 % à 63 % du coût total de possession (63 % pour le transport de marchandises, 52 % pour le transport de passagers, 44 % pour les manœuvres), la maintenance représente de 7 % à 18 % (7 % pour le transport de marchandises, 10 % pour le transport de passagers, 18 % pour les manœuvres), et les coûts en capital représentent le reste.³⁵
- Le coût total de possession pour l'hydrail est presque trois fois plus élevé que le diesel dans le cas des marchandises, environ 80 % plus élevé pour les passagers (sans réservoir) et 51 % plus élevé pour les manœuvres. Ces chiffres devraient toutefois baisser à 36 % à long terme pour les marchandises (en supposant qu'on atteigne une échelle suffisante), et à une quasi-parité pour les locomotives de passagers et de manœuvre.
- Quand la production d'hydrogène sera considérablement accrue, le coût du carburant devrait être supérieur de 50 % à celui du diesel pour les marchandises et les passagers, et de 21 % pour les manœuvres.
- Les coûts de stockage, de compression, de transport et de distribution de l'hydrogène constituent un défi majeur (voir la section 3B). L'hydrogène est le carburant le plus dense en énergie par masse, mais le moins dense en énergie par volume, ce qui rend son stockage et son transport très coûteux. La densité énergétique de l'hydrogène en masse est environ 2,6 fois supérieure à celle du diesel de pétrole, soit 33,6 kWh/kg par rapport à 13 kWh/kg.
- Une étude menée en 2018 par Metrolinx a révélé que les coûts de maintenance des locomotives à piles à hydrogène et de l'infrastructure étaient comparables à ceux des systèmes caténaires. Cependant, elle a également révélé que les complexités de l'hydrail présentaient un ensemble unique de risques par rapport à l'électrification par caténaire, ce qui pourrait avoir un impact sur les coûts.

³⁵ À titre de référence, dans le cas des locomotives au diesel, les coûts du carburant représentent actuellement environ 53 % du coût total de possession pour les marchandises, 32 % pour les passagers et environ 25 % pour les manœuvres. Les coûts de maintenance pour le diesel sont respectivement de 13 %, 14 % et 20 % pour les marchandises, les passagers et les manœuvres.

- La Stratégie canadienne pour l'hydrogène situe la fourchette d'estimation des coûts par kg d'hydrogène gazeux ou liquide distribué entre 3 \$ et 10 \$. Une étude menée par le Royaume-Uni en 2019 situe les estimations de coûts entre 9,50 \$ et 15,40 \$ par kg. Une étude réalisée en 2020 par le ministère de l'Énergie américain indique que les coûts de l'hydrogène pour les bus de passagers en Californie variaient de 6,50 \$ à 17,50 \$ par kg (soit 2 à 5 fois plus que le diesel).
- Les coûts du carburant dépendent dans une large mesure du procédé utilisé pour produire l'hydrogène, et sont actuellement en corrélation négative avec le potentiel de réduction des émissions de GES des différentes catégories d'hydrogène (des coûts plus faibles entraînent un potentiel de réduction des GES plus faible ; voir la section 2A). Les coûts du carburant devraient diminuer considérablement alors que la production augmente.
- Selon des estimations américaines et les prix du diesel en 2020, le seuil de rentabilité de l'hydrogène pour atteindre la parité des coûts avec le diesel est de 2,75 \$ par kg pour les applications de marchandises, d'environ 4,50 \$ par kg pour les passagers et de 5 \$ par kg pour les manœuvres. Cependant, cela pourrait changer, car l'EIA des États-Unis prévoit que les prix du diesel augmenteront de 21 % entre 2020 et 2030, et de 27 % d'ici 2035.
- En plus d'être transporté par camion-citerne, train ou pipeline, l'hydrogène peut être produit sur place, aux dépôts de carburant, à l'aide d'électrolyseurs. Cela nécessite un raccordement au réseau à haute tension et une source d'eau. L'hydrogène peut être stocké en vrac dans des réservoirs à basse ou moyenne pression. Un compresseur transfère ensuite l'hydrogène dans des réservoirs à haute pression, qui servent à ravitailler les trains à l'aide d'un tuyau flexible. L'électrolyse est actuellement le procédé de production d'hydrogène le plus coûteux, mais les coûts devraient baisser alors que la production augmente.
- Un certain nombre d'autres modes de transport (p. ex. camions, autobus, bateaux, véhicules non routiers) envisagent actuellement d'utiliser l'hydrogène comme carburant. Cela pourrait entraîner soit une concurrence et une augmentation des prix, soit une augmentation de la production et des économies d'échelle. Il est possible de partager l'infrastructure de ravitaillement en carburant (et de réduire les coûts) dans les centres intermodaux entre le rail, le camionnage, la marine, les bus de passagers et/ou le matériel des terminaux comme les grues et les chariots élévateurs à fourche.
- La liquéfaction de l'hydrogène est plus coûteuse et plus énergivore que la compression, mais les réservoirs de stockage isolés pour l'hydrogène liquide (qui doit être maintenu à -253 °C) pourraient être moins coûteux que les bonbonnes de gaz comprimé (à 350 bars). L'hydrogène liquide est également plus économe en espace, mais si l'espace de stockage n'est pas une contrainte, l'hydrogène comprimé peut être plus économique.

- Les fournisseurs de gaz industriel et autres ont un intérêt commercial à fournir de l'hydrogène pour les applications ferroviaires en raison de l'importance et de la stabilité à long terme des besoins. Des partenariats avec les services publics de gaz et d'électricité seront probablement essentiels pour réduire les coûts du carburant.
- Les locomotives à piles à hydrogène ont beaucoup moins de pièces mobiles que les locomotives au diesel. Cette simplicité devrait entraîner une réduction des temps d'arrêt et de la maintenance, une diminution des besoins de stationnement dans les dépôts et une réduction du stockage des unités de puissance de rechange.
- Les principaux problèmes de maintenance des systèmes de piles à combustible ne sont généralement pas liés aux piles elles-mêmes, mais au traitement de l'air, aux compresseurs, aux ventilateurs, aux pompes de refroidissement et à la plomberie. De 30 % à 40 % des coûts de maintenance des locomotives au diesel sont liés au moteur. Les piles à hydrogène elles-mêmes n'ont pas de pièces mobiles et ne subissent pas d'usure due à la friction. De plus, elles fonctionnent à une température plus basse que les moteurs au diesel, ce qui peut réduire les besoins de maintenance.
- Les systèmes de piles à hydrogène pour l'hydraulique ont une durée de vie d'environ 10 ans (10 à 12 heures de fonctionnement par jour). Comme chaque système coûte environ 1 million de dollars, les coûts d'exploitation s'élèveraient à 3 millions de dollars par unité d'alimentation, sur une durée de vie de 30 ans.
- Une étude européenne a démontré que pour le transport ferroviaire de passagers, l'hydrogène peut être concurrentiel par rapport au diesel, même si le coût total de possession est plus élevé de 4 % à 35 %, et ce, bien que l'hydrogène ait des coûts de maintenance inférieurs. Pour que les coûts soient concurrentiels, il faut que l'énergie renouvelable soit abondante et bon marché (comme c'est le cas à des endroits comme la Scandinavie et le Canada). La compétitivité des coûts s'améliore quand le coût du diesel augmente, le seuil clé pour l'Europe étant d'environ 1,80 \$ le litre.
- Les tarifs d'assurance pour l'hydraulique peuvent être suffisamment élevés pour constituer un obstacle à son adoption.

Référence(s):

- Consultations: Ballard, CP, SWRI, Bob Oliver, UBC, Peter Eggleton
- Documentation:
 - Stratégie canadienne pour l'hydrogène, 2020 (https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf)
 - Rocky Mountain Institute, 2019 (<https://rmi.org/run-on-less-with-hydrogen-fuel-cells/>)

- o Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
- o TELLIGENCE Group, 2020 (<https://static1.squarespace.com/static/5b193e81cef372d012efda72/t/5f7b42e1a96b3a18f431f9f1/1601913574512/Hydrail+Prerequisites+-+2020+Final+Revision-converted.pdf>)
- o Shift2Rail, 2019 (https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf)
- o Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/ta034_ahluwalia_2020_o.pdf)
- o Centre d'innovation de Transports Canada, 2019 (<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/04/f62/fcto-h2-at-rail-workshop-2019-belluz.pdf>)

2. POTENTIEL DE RÉDUCTION DU CARBONE

A. POTENTIEL DE RÉDUCTION DES GES

Note	Description	Sélection
5	>80%	✓
4	50-80%	
3	30-50%	
2	10-30%	
1	<10%	

Sommaire:

Par rapport au diesel, le potentiel de réduction des GES par matériel est estimé à plus de 80 % dans le cas de l'hydrogène vert, à 30 % à 50 % pour l'hydrogène bleu et à un niveau de marginal à négligeable pour l'hydrogène gris.

Notes:

- Les locomotives à piles à hydrogène ne produisent aucune émission au point d'utilisation. L'intensité carbone de leur exploitation dépend de la ou des méthodes utilisées pour produire, stocker et distribuer l'hydrogène. Trois méthodes sont actuellement employées pour la production, pour trois classes d'hydrogène correspondantes :
 - o L'hydrogène vert est fabriqué en extrayant l'hydrogène de l'eau au moyen d'une électrolyse alimentée par de l'énergie renouvelable. Avec la plus faible intensité carbone, il offre les plus grands avantages en matière de climat, mais il a également les coûts de production les plus élevés. Si l'électrolyse est alimentée par de l'électricité non renouvelable, les avantages climatiques diminuent considérablement. À l'échelle nationale, 82 % de la production d'électricité au Canada se fait sans émission.³⁶

36 RNCAN, 2020. (<https://www.nrcan.gc.ca/science-and-data/data-and-analysis/energy-data-and-analysis/energy-facts/energy-and-greenhouse-gas-emissions-ghgs/20063>)

- o L'hydrogène bleu est fabriqué en extrayant l'hydrogène du gaz naturel, puis en utilisant la technologie de capture et de séquestration du carbone pour stocker le carbone restant. Il a une intensité carbone de faible à modérée.
 - o L'hydrogène gris est fabriqué en extrayant l'hydrogène du gaz naturel par des procédés thermiques comme le reformage du méthane à la vapeur. Il n'offre que peu d'avantages pour le climat, voire aucun. Une grande majorité (un expert a dit 99 % aux États-Unis) de l'hydrogène actuellement utilisé est de l'hydrogène gris, en raison des coûts de production plus faibles.
- Le scénario idéal pour les GES consiste à utiliser l'électricité excédentaire, en dehors des heures de pointe et à faible coût, provenant de sources sans émission, pour toute la production d'hydrogène. Selon ce scénario, l'hydrogène servirait essentiellement de moyen de stockage d'énergie renouvelable, semblable aux batteries, mais sans dégradation ou perte au fil du temps. Les provinces hydroélectriques du Canada, notamment la Colombie-Britannique, le Manitoba et le Québec, sont particulièrement bien adaptées à la production d'hydrogène vert.
- En Alberta, environ 2 250 tonnes d'hydrogène sont produites quotidiennement à des fins industrielles comme la production d'engrais, la valorisation du bitume et le raffinage du pétrole. Environ 58 % sont gris et 42 % sont bleus.
- Une étude menée au Royaume-Uni a révélé que les avantages pour les GES de l'hydrogène par rapport au diesel étaient de 5 % pour l'hydrogène gris et de 75 % pour l'hydrogène vert (selon l'intensité carbone du réseau du Royaume-Uni, qui est plus élevée que celle du Canada).
- L'hydrogène vert coûte actuellement environ trois fois plus cher que l'hydrogène gris, ce qui pourrait limiter le potentiel de réduction des GES de l'hydraulique.
- L'efficacité combinée de l'électrolyse, de la compression et des piles à hydrogène entraîne une consommation totale d'énergie environ trois fois supérieure à celle des trains électriques conventionnels. Si l'on tient compte des chaînes d'approvisionnement en carburant, le rendement global des locomotives à piles à hydrogène vert est d'environ 40 %, contre 30 % à 35 % pour le diesel. Cependant, l'efficacité en service des locomotives à piles à hydrogène est nettement supérieure à celle du diesel – jusqu'à 30 % dans le cas des marchandises et 76 % dans le cas des manœuvres.
- Les locomotives à piles à hydrogène réduiraient considérablement ou élimineraient les émissions de PCA des opérations ferroviaires. Elles réduiraient également de manière significative les problèmes de bruit et de vibrations. Bien que ces facteurs ne soient pas visés par cette analyse et ne soient donc pas pris en compte dans le Cadre d'évaluation, ils sont très importants du point de vue social et sanitaire. Les gares de triage sont généralement situées dans des communautés défavorisées, ou à proximité de celles-ci, qui subissent un lourd fardeau en matière de pollution atmosphérique. La santé du personnel des gares de triage serait également améliorée par l'utilisation de la propulsion par piles à hydrogène.

- Une étude américaine a démontré qu'en augmentant de 50 % l'utilisation du train pour le transport de toutes les marchandises sur des itinéraires de plus de 800 km, on réduirait les émissions de GES de 60 Mt par année. La combinaison de locomotives à émissions nulles et du transport d'une plus grande partie du fret par train permettrait de réduire les émissions de GES de jusqu'à 120 Mt par année. La réduction de l'intensité carbone du réseau électrique américain entraînerait des réductions encore plus importantes.
- Quant à la combustion mixte de l'hydrogène, les moteurs au diesel existants peuvent être modifiés pour brûler des mélanges contenant jusqu'à 30 % d'hydrogène, avec un potentiel de réduction des émissions de GES proportionnel dans le cas de l'hydrogène vert (jusqu'à 30 %). Toutefois, la combustion mixte de l'hydrogène peut augmenter les émissions de NOx, et il est peu probable qu'elle contribue à une décarbonisation profonde.
- Un expert a souligné que la demande accrue d'hydrogène vert pourrait entraîner un passage plus rapide aux énergies renouvelables comme l'énergie éolienne, hydroélectrique et solaire pour la production d'électricité.

Référence(s):

- Consultations: Bob Oliver, SWRI, CN, Peter Eggleton, TC, NRC,
- Documentation:
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - Pembina Institute, 2020 (<https://www.pembina.org/reports/hydrogen-climate-primer-2020.pdf>)
 - House Committee on Transportation and Infrastructure, 2021 (<https://transportation.house.gov/imo/media/doc/Santana%20Testimony.pdf>)
 - Stratégie canadienne pour l'hydrogène, 2020 (https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf)
 - Transition Accelerator, 2020 (<https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2020/11/Building-a-Transition-Pathway-to-a-Vibrant-Hydrogen-Economy-in-the-Alberta-Industrial-Heartland-November-2020-5.pdf>)
 - TELLIGENCE Group, 2020 (<https://static1.squarespace.com/static/5b193e81cef372d012efda72/t/5f7b42e1a96b3a18f431f9f1/1601913574512/Hydrail+Prerequisites+-+2020+Final+Revision-converted.pdf>)
 - Shift2Rail, 2019 (https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf)
 - RSSB, 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)

B. ADOPTION/APPLICABILITÉ

Note	Description	Sélection
5	Bien approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	
4	Partiellement approprié pour le transport de marchandises de grande ligne	
3	Approprié pour le matériel de triage	✓
2	Bien approprié pour le transport de passagers	
1	Non approprié pour le transport de marchandises de grande ligne, et partiellement approprié pour le transport de passagers.	

Sommaire:

Les locomotives de manœuvre et de passagers à piles à hydrogène sont actuellement réalisables sur le plan technique et économique. À ce jour, aucune locomotive à piles à hydrogène capable de transporter des marchandises n'a été développée.

Notes:

- En moyenne, les locomotives de manœuvre ont une autonomie journalière d'environ 120 km, tirent des charges d'environ 500 t et fonctionnent de 12 à 16 heures par jour. Elles peuvent être ravitaillées quotidiennement aux gares de triage. Les gares de triage font l'objet d'une pression publique croissante parce qu'elles émettent des polluants atmosphériques. La démonstration de technologies comme l'hydraulique dans les gares de triage pourrait donc être un bon point de départ.
- Le CP est en train de transformer une ancienne locomotive au diesel de ligne en une locomotive de manœuvre à piles à hydrogène, qui devrait être en service actif d'ici la fin de 2022.
- L'Europe utilise un concept d'unité multiple électrique (UME) pour la plupart de ses trains de passagers. Ce concept commence à être appliqué en Amérique du Nord (p. ex. O-Train d'Ottawa), mais la plupart des services de transport de passagers sont encore dominés par de grands et puissants trains au diesel. Les UME peuvent utiliser n'importe quel type de technologie de propulsion comme unités d'alimentation (p. ex., pile à hydrogène, batterie, diesel). Les locomotives à piles à hydrogène pour le transport de passagers en Amérique du Nord auraient probablement besoin de plus de 1 MW de puissance, ce qui représente un défi du point de vue de la maîtrise des coûts. En Europe, les trains de passagers ont besoin d'une puissance d'environ 200 kW, ce qui est compatible avec l'hydrogène.

- L'hydraul est bien adapté aux cycles de service avec des démarrages et des arrêts fréquents (p. ex. manœuvres, trains de banlieue) en raison de l'utilisation du freinage par récupération.
- Les trains à piles à hydrogène ont des délais de ravitaillement relativement courts (environ 15 à 30 minutes pour les applications de transport intervilles de passagers), comparables au diesel. Un expert a souligné que cette caractéristique, ainsi que le fait que l'hydraul nécessite peu de nouvelles infrastructures, en fait une option intéressante pour le service de marchandises de grande ligne à long terme. Malgré la nécessité d'avoir des réservoirs pour les applications sur longue distance et HHP, l'hydrogène est toujours considéré comme plus facile à transporter que les batteries électriques.
- Des locomotives à piles à hydrogène sont déjà utilisées dans certains pays pour le transport de passagers, généralement sur des tronçons de voie courts et peu fréquentés, où l'électrification n'est pas rentable. Elles peuvent être configurées pour être utilisées dans des systèmes bimodes, avec de l'électricité caténaire ou du diesel.
- En 2018, le fabricant Alstom a lancé le service de passagers de deux trains Coradia iLint en Allemagne, produits avec des piles à hydrogène fabriquées par la société canadienne Hydrogenics (maintenant une filiale de Cummins). Ces trains peuvent transporter jusqu'à 300 passagers, roulent à une vitesse de 160 km/h et ont une autonomie de 1 000 km. Ils sont alimentés en carburant par une station mobile. Des dizaines de trains semblables ont été précommandés par des exploitants ferroviaires européens, et les livraisons commenceront en 2022. Leur application principale est sur les lignes de passagers peu fréquentées. La principale concurrente de l'hydrogène pour le rail zéro émission dans ces applications est la batterie électrique.
- Selon un expert, les approbations, le financement, la conception, les permis, la construction, etc. indiquent que, bien que techniquement réalisable, la mise en œuvre effective des trains à piles à hydrogène pour le transport de marchandises ne se fera probablement pas avant 30 ans ou plus.
- Une étude européenne indique que d'ici 2030, les unités multiples à hydrogène pourraient remplacer jusqu'à 30 % des locomotives au diesel existantes (surtout dans les régions où l'électricité renouvelable est abondante). Toutefois, l'étude a révélé que le manque de prototypes et de disponibilité des produits constitue un obstacle à l'adoption des locomotives de manœuvre et de grande ligne. L'hydraul pourrait être une option viable pour moderniser les parcs de locomotives de manœuvre, s'il est possible de gérer les exigences d'espace et de poids. On a toutefois noté qu'en raison des longs temps d'inactivité de certaines locomotives de manœuvre, les trains à batterie pourraient être l'option la moins coûteuse.

- On a suggéré que le déploiement initial de l'hydrail serait mieux adapté aux centres, surtout ceux où de l'hydrogène à faible coût peut être produit à grande échelle. Une bonne approche consiste à créer des centres régionaux, comme celui que Transition Accelerator est en train de mettre en place en Alberta, qui prévoit l'utilisation d'hydrogène dans divers secteurs et modes de transport. Finalement, de nombreux centres pourraient être reliés pour créer de vastes réseaux de technologies de l'hydrogène intégrées.
- Les piles à combustible utilisées sont semblables à celles des autobus, des navires et d'autres applications pour véhicules lourds. La plupart d'entre elles utilisent des modules de 200 kW, qui sont empilés pour répondre à la demande d'alimentation. Le secteur ferroviaire bénéficiera des réductions de coûts qui découleront de l'utilisation de l'hydrogène dans d'autres modes de transport.
- Les gares de passagers sont souvent limitées par l'espace et peuvent manquer d'espace pour stocker l'hydrogène.

Référence(s):

- Consultations: Ballard, UBC, Peter Eggleton, TC, Paul Blomerus, Bob Oliver
- Documentation:
 - Stratégie canadienne pour l'hydrogène, 2020 (https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - Railway Technology, 2019 (<https://www.railway-technology.com/projects/coradia-ilint-regional-train/>)
 - TELLIGENCE Group, 2020 (<https://static1.squarespace.com/static/5b193e81cef372d012efda72/t/5f7b42e1a96b3a18f431f9f1/1601913574512/Hydrail+Prerequisites+-+2020+Final+Revision-converted.pdf>)
 - Transition Accelerator, 2020 (<https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2020/11/Building-a-Transition-Pathway-to-a-Vibrant-Hydrogen-Economy-in-the-Alberta-Industrial-Heartland-November-2020-5.pdf>)
 - Shift2Rail, 2019 (https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf)
 - Ballard, 2020. « Fuel cell solutions for zero emission rail » (présentation fournie par Ballard)

3. DÉFIS

A. EXPLOITATION

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Faible complexité pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
3	Complexité modérée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	✓
2	Complexité élevée pour maintenir la fiabilité du système et l'infrastructure existante et/ou entretenir le matériel.	
1	Risque considérable pour la fiabilité. Risque considérable de perdre un bien.	

Sommaire:

La faible densité énergétique volumétrique de l'hydrogène est un défi majeur, car elle nécessite l'utilisation de réservoirs lourds et encombrants pour le stockage à bord et dans les dépôts de carburant. Cela limite l'autonomie et nécessitera l'utilisation de réservoirs pour les applications sur longue distance et à haute puissance. Les autres défis importants sont entre autres l'interopérabilité des réseaux et le manque d'essais dans des cycles de service réels.

Notes:

- La densité énergétique de l'hydrogène est un défi majeur, notamment pour les applications de transport de marchandises. Elle nécessitera probablement des réservoirs et de nombreux points de ravitaillement.
- Par ailleurs, l'interopérabilité est un défi majeur, car les chemins de fer canadiens et leurs actifs sont exploités partout aux États-Unis et au Mexique. Le déploiement de technologies comme l'hydraulique pour le transport de marchandises de grande ligne devrait être coordonné sur l'ensemble du continent. Il existe des accords de puissance entre les chemins de fer sur tout le continent, de même que des actifs communs (qui doivent être compatibles avec les technologies de propulsion déployées). Les gares de triage appartenant aux chemins de fer doivent également être en mesure d'assurer l'entretien et le ravitaillement des trains d'autres compagnies, ce qui nécessitera une coordination approfondie.
- Les locomotives à piles à hydrogène ont actuellement un manque de puissance qui les rend inadaptées au service marchandises. Environ 75 % de l'hydrogène est consommé dans les manettes 6, 7 et 8, où les moteurs au diesel sont les plus efficaces. Ce manque d'applicabilité peut limiter le potentiel de réduction des GES et les taux d'adoption.

- Les réservoirs d'hydrogène et les unités multiples additionnelles dans les rames rendraient l'hydraulique plus adapté au transport de marchandises, mais les réservoirs doivent être développés (problèmes de connectivité, de poids et de coût) et limiteraient les charges utiles maximales.
- La performance ne devrait pas être touchée par le climat froid du Canada, mais des tests par temps froid sont nécessaires pour valider cette hypothèse.
- Les technologies de l'hydraulique sont plus complexes et nouvelles que la propulsion par électricité caténaire ou batterie, ce qui pourrait poser des défis et des risques opérationnels supplémentaires et imprévus.
- Il existe de nombreux points communs entre le matériel, l'infrastructure et les règlements relatifs au gaz naturel comprimé (GNC) et à l'hydrogène. Si les chemins de fer adoptaient la technologie GNC à court terme, la transition vers l'hydrogène à plus long terme serait plus facile et plus abordable. Certains experts ont toutefois dit qu'un passage à court terme au GNC ou au GNL serait une déviation, car l'objectif final est le net zéro.

Référence(s):

- Consultations: CP, SRY, CN, Bob Oliver, UBC, CUTRIC, TC
- Documentation:
 - Stratégie canadienne pour l'hydrogène, 2020 (https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf)
 - RSSB, 2019 (<https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=26141>)
 - Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/ta034_ahluwalia_2020_o.pdf)
 - Centre d'innovation de Transports Canada, 2019 (<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/04/f62/fcto-h2-at-rail-workshop-2019-belluz.pdf>)

B. RAVITAILLEMENT

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Complexité modérée pour la chaîne d'approvisionnement et/ou les exigences de ravitaillement	
3	Chaîne d'approvisionnement complexe, >2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	
2	Problèmes de disponibilité intermittents, jusqu'à 2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	
1	Problèmes de disponibilité fréquents, jusqu'à 2x la durée/ fréquence de ravitaillement/charge	✓

Sommaire:

Un défi majeur découle de la nature naissante des chaînes d'approvisionnement en hydrogène et du manque d'infrastructure de ravitaillement partout au Canada. La plupart des experts consultés ont dit que le manque de disponibilité du carburant est un défi majeur. L'incertitude quant à l'état idéal de l'hydrogène (liquide ou gazeux) pour le stockage, la distribution et l'utilisation constitue un autre défi majeur.

Notes:

- La capacité de ravitaillement devra probablement être établie avant que les démonstrations sur grande ligne et la production de locomotives puissent commencer, et les incertitudes sur la future demande de ravitaillement pourraient être un obstacle.
- L'hydrogène peut être transporté sous forme liquide ou gazeuse. Pour maintenir un état liquide, qui a une densité énergétique beaucoup plus élevée que l'état gazeux, on doit maintenir une température de -253°C . La liquéfaction de l'hydrogène est très énergivore et consomme environ 30 % de la valeur énergétique de l'hydrogène lui-même (ce qui diminue l'efficacité et augmente les coûts). L'hydrogène liquide est généralement vaporisé et distribué sous sa forme gazeuse pour la plupart des applications de transport, mais les applications à forte intensité énergétique, comme le transport ferroviaire de marchandises, nécessiteraient probablement le stockage à bord d'hydrogène liquide.
- L'hydrogène gazeux est comprimé et stocké dans des cylindres à haute pression. Les véhicules à hydrogène le stockent généralement à bord à des pressions de 350 ou 700 bars. À 350 bars, le stockage de l'hydrogène à bord utilise huit fois plus d'espace que le diesel pour couvrir la même distance. Les applications sur longue distance ou à haute puissance nécessiteraient probablement des réservoirs (qui doivent être développés) ou des unités d'alimentation supplémentaires, qui représenteraient des wagons non générateurs de revenus. Un stockage à 700 bars est préférable pour le transport ferroviaire, et est possible si des composants plus solides sont utilisés dans les réservoirs de carburant. Cela permettrait d'accroître l'autonomie, mais à un coût plus élevé.
- Des chercheurs chinois, qui discutent avec des chercheurs de l'UBC, étudient la viabilité du stockage de l'hydrogène dans de petits réservoirs à basse pression (50 bars ou moins) à température ambiante, ce qui permettrait de le stocker dans les châssis des locomotives de manœuvre.
- Il faudrait idéalement produire l'hydrogène localement, au point de ravitaillement, en raison des coûts liés au transfert par un réseau de pipelines (sauf s'il existe déjà une infrastructure appropriée) et des émissions de carbone liées au transport routier.

- Les trains à piles à hydrogène qui n'ont pas de réservoir devraient être ravitaillés quotidiennement, éventuellement pendant la nuit. Toutefois, cela pourrait nécessiter un réseau étendu de stations de ravitaillement. Chaque unité multiple à hydrogène devrait pouvoir stocker 500 kg d'hydrogène liquide à 500 bars et à une température d'environ -200 °C, ou 100 kg d'hydrogène gazeux à 350 bars et à température ambiante.
- Les vecteurs chimiques peuvent être utilisés pour stocker et transporter l'hydrogène, et permettent de relever les défis liés à sa faible densité énergétique volumétrique (p. ex. un litre d'essence contient plus d'hydrogène qu'un litre d'hydrogène liquide). Les vecteurs chimiques liquides comme le méthylcyclohexane (MCH) et l'ammoniac (NH₃) sont plus faciles à manipuler et contiennent des quantités relativement importantes d'hydrogène par volume. Cependant, les vecteurs comme l'ammoniac présentent des désavantages importants, notamment le fait qu'ils sont inflammables et hautement toxiques en tant que polluants atmosphériques ou aquatiques.
- Actuellement, la majeure partie de l'hydrogène gazeux est transportée par des camions-remorques à tubes d'acier à des pressions allant jusqu'à 250 bars. Des pressions plus élevées rendraient le transport plus économique, mais les camions sont limités par le poids maximal autorisé en raison de l'épaisseur de l'acier nécessaire pour contenir l'hydrogène. L'utilisation de remorques en matériaux composites est à l'étude.
- Le transport de l'hydrogène gazeux par les gazoducs existants devrait être techniquement possible avec des taux de mélange de jusqu'à 20 % (cette méthode fait l'objet d'essais dans certains pays, mais pas encore au Canada). La séparation de l'hydrogène du gaz naturel est actuellement un défi technique, mais d'importants travaux de R&D sont en cours. Des taux de mélange plus élevés constituent un défi en raison de la petite taille de la molécule d'hydrogène (elle peut traverser certains matériaux) et des risques liés à la fragilisation de l'acier (ce qui peut provoquer des défaillances dans les pipelines composés de certains alliages d'acier). Des pipelines d'hydrogène spécialement conçus pourraient réduire les coûts de transport, mais ils impliquent des coûts en capital substantiels.
- Un expert a souligné que les gouvernements et les services publics doivent investir dans la production d'hydrogène afin de contribuer à la mise en place de chaînes d'approvisionnement.
- Le ravitaillement direct des locomotives pourrait être une option viable pour les locomotives à piles à hydrogène. Le diesel est actuellement transporté par train, et l'hydrogène pourrait très bien l'être également. Cela permettrait de concentrer la production d'hydrogène dans les zones où elle est faible en carbone et en coût.

Référence(s):

- Consultations: CP, SWRI, CN, UBC, Ballard, CUTRIC, NRC
- Documentation:
 - Hydrogen Strategy for Canada, 2020 (https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf)
 - Transition Accelerator, 2020 (<https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2020/11/Building-a-Transition-Pathway-to-a-Vibrant-Hydrogen-Economy-in-the-Alberta-Industrial-Heartland-November-2020-5.pdf>)
 - Network Rail, 2020 (<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Traction-Decarbonisation-Network-Strategy-Interim-Programme-Business-Case.pdf>)
 - Shift2Rail, 2019 (https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf)
 - Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2020 (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/ta034_ahluwalia_2020_o.pdf)

C. SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE

Note	Description	Sélection
5	Égal au diesel ou meilleur	
4	Formation et/ou règlements additionnels requis	
3	Formation et certification et/ou règlements additionnels requis	
2	Préoccupations de sécurité et/ou règlements additionnels considérables requis	✓
1	Graves préoccupations de sécurité, notamment pour le public, et/ou règlements additionnels complets requis	

Sommaire:

L'élaboration de règlements et de normes sur l'hydrogène, ou la modification des règlements et des normes existants pour y intégrer l'hydrogène, est nécessaire avant la commercialisation au Canada. Dans certains cas, les normes existantes pour le GNC/GNL ou le pétrole peuvent être adaptées à l'hydrogène, ou les normes d'autres juridictions peuvent accélérer le développement.

Notes:

- Transports Canada réglemente le transport de l'hydrogène gazeux par l'intermédiaire du Règlement sur le transport des marchandises dangereuses (TMD).

- Le Règlement sur le Bureau de la sécurité des transports de Transports Canada devrait être mis à jour pour tenir compte du transport de l'hydrogène par pipeline, train et bateau.
- Des normes de distribution, par l'intermédiaire d'amendements à la Loi sur les poids et mesures du Canada, seront requises pour l'hydrogène. Aussi, Mesures Canada devra tester et certifier le matériel de distribution, de compression et de stockage de l'hydrogène.
- Les lois connexes devant peut-être être modifiées pour l'utilisation de locomotives à piles à hydrogène sont entre autres la Loi sur la marine marchande du Canada (Transports Canada), la Loi sur le Bureau canadien d'enquête sur les accidents de transport et de la sécurité des transports (Transports Canada), la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (Environnement et Changement climatique Canada) et la Loi sur la sécurité ferroviaire (Transports Canada). La Loi sur la sécurité ferroviaire régit les installations sur les propriétés ferroviaires, et le matériel de stockage et de distribution de l'hydrogène devra y être intégré. On a suggéré que le Règlement sur l'entreposage en vrac des gaz de pétrole liquéfiés (C.R.C., c. 1152), en vertu de la Loi sur la sécurité ferroviaire (pour le stockage du pétrole), dirige la réglementation de l'hydrogène.
- Les organismes de réglementation peuvent également vouloir assurer que l'utilisation de l'hydrogène dans les applications ferroviaires est une option pour générer des crédits de conformité dans le cadre de la Norme sur le carburant propre d'ECCC. Des normes et des niveaux de crédits distincts pour l'hydrogène vert, bleu et gris devraient être élaborés. Parallèlement, ECCC pourrait envisager d'intégrer l'hydrogène à la Loi sur la tarification de la pollution causée par les gaz à effet de serre, avec des tarifs différents pour l'hydrogène vert, bleu et gris.
- En raison des caractéristiques de combustion de l'hydrogène, il faudra disposer de matériel et de processus de protection contre les risques d'inflammation. L'hydrogène gazeux peut poser un danger important en cas de fuite ou de relâche, surtout dans un espace confiné. S'il s'accumule dans un espace confiné, l'atmosphère peut devenir inflammable ou explosive. Une libération sous haute pression peut également entraîner une combustion, notamment en présence d'étincelles.
- Des protocoles et une formation des premiers intervenants devront être élaborés et mis en œuvre pour les locomotives à hydrogène et les sites de ravitaillement.
- Des évaluations des risques de collision sont requises pour toutes les applications ferroviaires.
- Un engagement précoce et continu avec les communautés situées à proximité des opérations peut atténuer les préoccupations de sécurité. La perception publique de l'hydrogène pourrait être un obstacle important.

- On a souligné que l'Europe est très en avance sur l'Amérique du Nord quant aux normes sur l'hyd rail. Les chemins de fer canadiens cherchent toutefois à faire des démonstrations, en espérant que les organismes de réglementation mettront bientôt des normes en place. La CSA travaille également à l'élaboration de normes sur l'hyd rail.
- Les producteurs d'hydrogène industriel comme Air Liquide sont des experts du transport de l'hydrogène et des exigences de sécurité connexes, et peuvent contribuer à l'élaboration des normes.

Référence(s):

- Consultations: CP, SWRI, Wabtec, Ballard, Peter Eggleton
- Documentation:
 - Stratégie canadienne pour l'hydrogène, 2020 (https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf)
 - TELLIGENCE Group, 2020 (<https://static1.squarespace.com/static/5b193e81cef372d012efda72/t/5f7b42e1a96b3a18f431f9f1/1601913574512/Hydrail+Prerequisites+-+2020+Final+Revision-converted.pdf>)
 - Centre d'innovation de Transports Canada, 2019 (<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/04/f62/fcto-h2-at-rail-workshop-2019-belluz.pdf>)