

Executive summary

Le transport par chemin de fer est le mode de transport le plus respectueux de l'environnement en Belgique et possiblement dans le reste de l'Europe. Pourtant, il reste encore beaucoup à faire. Un certain nombre de lignes ferroviaires en Belgique ne sont toujours pas électrifiées. En outre, une grande partie du transport de fret dépend encore de la traction diesel. Ce rapport contient une analyse des options de dédieselisation des lignes ferroviaires non électrifiées restantes en Belgique. Il s'agit de lignes de passagers principalement situées autour de Gand (Eeklo-Renaix, Gand-Geraardsbergen, Alost-Burst) et Charleroi-Couvin. A cela s'ajoutent les lignes de fret non électrifiées : Genk-Bilzen (L21c), Gand-Zelzate (L204) et Gand-Wondelgem-Terneuzen (L55). Nous utilisons le mot dédieselisation, car nous ne supposons pas de facto que ces lignes seront électrifiées. En plus de l'électrification complète de la ligne, nous étudions deux alternatives: l'utilisation de trains à batteries (avec ou sans électrification partielle de la ligne) et des trains à hydrogène. Ces alternatives sont commercialement disponibles pour les lignes de passagers, mais ne sont pas encore pleinement au point pour le transport de fret. C'est pourquoi nous examinons les lignes de fret de manière moins détaillée, sur base d'un certain nombre d'analyses rapides qui se concentrent sur les avantages possibles de l'électrification de ces lignes.

Nous commençons l'étude par une revue de la littérature de projets similaires. Les conclusions suivantes se dégagent de l'étude de la littérature. Les alternatives durables aux trains de voyageurs électriques sont actuellement au stade d'offrir une opportunité réaliste de réduire les coûts et d'améliorer la durabilité du réseau ferroviaire. Cependant, la faisabilité dépend fortement de la situation. Par exemple, dans un projet similaire à Groningen et en Frise, la solution initialement préférée de l'électrification partielle avec des trains à batteries a été remplacée par des tests avec des trains à hydrogène à la dernière minute. Toutefois, cela n'a pas encore été traduit par l'utilisation permanente des trains à hydrogène. En Allemagne, dans certaines régions, le coût de l'électrification est si élevé que cette possibilité est exclue à l'avance. L'hydrogène a alors un avantage important en tant que technologie pratiquement sans infrastructure. Il y a beaucoup d'intérêt pour l'hydrogène de la part de l'industrie. L'industrie voit des synergies possibles avec le réseau énergétique, l'industrie chimique et l'hydrogène comme combustible et stockage temporaire d'énergie. Cependant, le rôle du rail dans la stimulation de la croissance de l'hydrogène ne doit pas être surestimé, vu la taille relativement limitée du rail par rapport à l'économie totale des transports. En conséquence, le rail est avant tout un suiveur du développement industriel.

Dans le cas du transport de fret par chemin de fer, les alternatives à l'électrification totale ne semblent pas encore pleinement développées. Pour le moment, les batteries n'ont pas encore la densité énergétique pour fournir suffisamment d'énergie pour acheminer de manière fiable des trains de fret lourds de plus de 1000 tonnes sur de longues distances. Une option possible est un moteur hybride qui combine le diesel et l'électricité. Un exemple potentiellement intéressant disponible en Allemagne est la locomotive bicarburant Vectron. Il combine un moteur diesel à pleine puissance avec un moteur électrique. Aussi l'option hydrogène semble ici plus attractive à première vue. L'hydrogène a une densité d'énergie très élevée en fonction de son poids. Dans l'étude, nous référons à un essai prometteur du consortium Anglo Belgian Corporation & CMB sous le nom de BeHydro. Ils adaptent les moteurs diesel existants pour fonctionner (partiellement) à l'hydrogène. Cela conduit à des économies de CO₂ potentiellement importantes (50 à 85%) et à une diminution des polluants locaux tels que les Nox et les particules fines. En tous cas, il reste un certain nombre de restrictions à l'utilisation de l'hydrogène qui n'ont pas encore été résolues. Par exemple, il manque d'infrastructure de ravitaillement en hydrogène et les options pour stocker suffisamment d'hydrogène sur une

locomotive sont limitées. Le désavantage principal est le plus grand volume d'hydrogène nécessaire pour fournir la même équivalence énergétique que le diesel. Cependant, une percée technologique n'est pas impossible d'ici à quelques années.

Dans une analyse rapide, nous étudions le cas de l'électrification de la ligne 21c Genk-Bilzen, la ligne 204 Gand-Terneuzen et la ligne 55 Wondelgem-Terneuzen. Pour la ligne 21c on peut montrer que le bénéfice social de l'électrification est considérable (14 millions d'euros). Selon Infrabel une décision a déjà été prise d'électrifier le tracé, en prolongation de l'électrification de la ligne Mol-Hamont. Un aspect fortement positif est la possibilité d'éviter un détour de 45 minutes pour les trains (marchandises) électrifiés à destination de Bilzen.

Impact	Année	VAN (30 jaar)
Avantages du temps de déplacement (M€)	1.782 €	32.60 €
Bénéfices d'émissions (option) (M€)	0.076 €	1.39 €
Entretien (M €)	-0.39 €	-7.08 €
Total (M €)	1.585 €	26.91 €
Investissement en caténaires (M€)	12.90 €	
VAN (M€)		14.01 €
TRI (%)		12.50%

Dans le cas de la ligne 204, une électrification de l'itinéraire s'avère tout simplement non positive, alors qu'elle est très négative pour la ligne 55. La principale différence entre ces lignes est l'intensité avec laquelle elles sont utilisées. Dans une analyse de sensibilité limitée, nous montrons que le paramètre le plus important est les bénéfices d'émissions (en € / tkm) dus à la disparition des trains de fret à moteur diesel. Si elle passe de 1,5 € / tkm à 2 € / tkm, la ligne 204 obtient un score positif. Toutefois, ce n'est pas le cas pour la ligne 55. On peut en conclure que la ligne 55 n'est actuellement vraisemblablement pas utilisée de manière suffisamment intensive pour justifier une électrification du tracé. L'électrification de la ligne 204 comporte un élément supplémentaire, à savoir qu'elle pourrait potentiellement être utilisée pour le transport de passagers dans le futur.

Scénario	Ligne 204		Ligne 55	
	VAN (€)	TRI	VAN (€)	TRI
Valeur de base	-3 324 139 €	1.9%	-19 417 786 €	/
Coût d'entretien 2% de l'investissement	-613 260 €	3.60%	-16 147 171 €	-9%
Bénéfices d'émissions 0.02 € / tkm	3 319 090 €	5.90%	-16 597 481 €	-10.20%
Horizon 40 années	-1 672 994 €	3.20%	-19 599 193 €	/
Combinaison	8 887 303 €	7.90%	-12 676 826 €	-2.45%

Si nous examinons plus en détail les différentes technologies disponibles pour le transport de passagers, nous pouvons dire que l'électrification complète nécessite l'investissement initial le plus élevé dans le réseau. Cependant, le coût de fonctionnement des trains électriques est le plus bas, à la fois en termes d'entretien et d'énergie. En outre, un train purement électrique présente également les coûts environnementaux les plus bas. En conséquence, en théorie, l'électrification complète présentera les coûts sociaux les plus bas si la route est utilisée de manière suffisamment intensive. Avec des itinéraires moins intensivement utilisés - comme beaucoup des itinéraires diesel restants en Belgique - l'investissement sur l'itinéraire peut être trop important par rapport aux avantages en termes d'énergie et d'entretien. L'utilisation d'un train à batteries peut être comparée au mieux à l'électrification partielle, car ces trains doivent toujours pouvoir fonctionner sous un câble aérien pendant une durée minimale de charge. Comme la batterie doit être remplacée environ deux fois pendant la durée de vie du train, le coût d'exploitation du train à batteries est plus élevé. Ce qui est économisé en coûts de réseau, est en partie récupéré dans la maintenance et le remplacement de la

batterie. Cette situation semble encore plus extrême dans le cas des trains à hydrogène. Là où l'investissement concernant l'itinéraire des trains à hydrogène est faible à très faible, les coûts de maintenance et autres coûts variables des trains à hydrogène sont beaucoup plus élevés, entre autres en raison de la vulnérabilité des piles à combustible. Celles-ci doivent être remplacés environ tous les deux ans. L'absence quasi totale de réseau et d'infrastructure de ravitaillement en hydrogène entraînera des coûts élevés pour l'hydrogène en tant que source d'énergie. En outre, le bénéfice environnemental de l'hydrogène peut être surestimé, car beaucoup d'énergie est perdue dans la synthèse et le stockage de l'hydrogène par rapport à l'utilisation directe d'énergie (renouvelable).

Concrètement, dans cette étude, nous examinons six scénarios pour les lignes de passagers, en plus d'un scénario Zéro dans lequel nous supposons une utilisation ultérieure des trains diesel au-delà de 2035. Dans le scénario Elek 2035, nous supposons l'électrification de la ligne en 2035. Les cinq autres scénarios sont (toujours à partir de l'année 2025), Elek 2025 (électrification), Diesel 2025 (nouveau train diesel), Bat 2025 (trains batteries), Wat_5 2025 (train hydrogène, prix hydrogène 5 € / kg) et Wat_2 2025 (train hydrogène, prix hydrogène 2 € / kg). En outre, nous utilisons deux autres variantes d'évaluation des émissions: une évaluation des émissions plus faible utilisée par le Bureau fédéral du Plan et une évaluation des émissions plus élevée basée sur une étude CE Delft pour la DG MOVE.

Les principaux résultats de la dédiésélisation des autres lignes passagers sont présentés ci-dessous. Nous utilisons les bénéfices sociaux complets en Valeur Actuel Net Environnemental (ENPV). Cela entraîne d'éventuels coûts financiers pour l'opérateur ferroviaire (NMBS) et le gestionnaire du réseau (Infrabel), ainsi que des coûts et des bénéfices pour la société dans son ensemble.

Faible taux d'émission (M €)	Elek 2035	Elek 2025	Bat 2025	Diesel 2025	Wat_5 2025	Wat_2 2025
Alost-Burst	-1	-14	-10	-13	-15	-14
Charleroi-Couvin	20	10	0	-20	-51	-27
Geraardsbergen	9	-4	-2	-17	-31	-19
Eeklo-Renaix	55	62	32	-19	-61	-19
Total	84	54	20	-70	-158	-79

Les scénarios d'électrification complète (à la fois en 2035 et 2025) et d'électrification partielle en 2025 (train à batteries) obtiennent des résultats très similaires en termes des bénéfices sociaux. Avec un faible taux d'émissions, l'électrification complète en 2035 est la meilleure option avec des bénéfices sociaux de 84 millions d'euros (pour toutes les lignes ci-dessus) par rapport au scénario zéro. Ce n'est pas sans importance, c'est aussi le seul scénario avec un possible avantage financier positif pour le rail en général. En effet, le maximum est obtenu à partir du stock existant (MW 41), après quoi l'alternative électrique conduit à des coûts d'énergie et de maintenance inférieurs par rapport à la technologie diesel. L'utilisation de trains à batterie obtient toujours un score positif par rapport au scénario zéro (utilisation de trains diesel après 2035), mais nettement inférieur à l'électrification.

Si l'on sépare le résultat par ligne, l'électrification d'Eeklo-Renaix s'avère être le projet le plus bénéfique et aussi le projet qui obtient le meilleur score pour l'électrification rapide (62 millions d'euros dans le scénario Elek 2025). Les bénéfices potentiels sur l'axe Gand-Geraardsbergen et Charleroi-Couvin sont moins importants à court terme. Les investissements dans Alost-Burst ont un score global négatif en raison de l'utilisation limitée de cette ligne.

Taux d'émissions élevée (M€)	Elek 2035	Elek 2025	Bat 2025	Diesel 2025	Wat_5 2025	Wat_2 2025
Alost-Burst	0 €	-13 €	-8 €	-13 €	-14 €	-13 €
Charleroi-Couvin	51 €	58 €	47 €	-10 €	-12 €	13 €
Geraardsbergen	24 €	20 €	22 €	-12 €	-12 €	0 €
Eeklo-Renaix	107 €	145 €	113 €	-2 €	7 €	49 €
Total	182 €	209 €	173 €	-37 €	-31 €	48 €

Si nous choisissons de valoriser les émissions à un taux plus haut, l'électrification complète en 2025 apparaît comme la meilleure option, avec des bénéfices sociaux de 209 millions d'euros par rapport au scénario zéro. Nous pouvons obtenir des bénéfices environnementaux relativement élevés plus rapidement dans ce scénario (10 ans plus tôt). Donc, ce que nous faisons, c'est peser un coût d'investissement public plus élevé contre des bénéfices environnementaux plus hauts (moins d'émissions par rapport aux trains diesel). L'Elek 2035 (182 millions d'euros) et l'utilisation de trains à batterie (173 millions d'euros) obtiennent des résultats assez similaires. Le remplacement par des trains diesel (-37 millions d'euros) ou de l'hydrogène 'cher' (-31 millions d'euros) obtient un score négatif par rapport au scénario zéro. Dans le scénario Wat_2 (48 millions d'euros), il y a un avantage, mais il est plus petit que pour les autres alternatives. En général, les trains à hydrogène semblent avoir peu de valeur ajoutée dans les conditions technologiques actuelles par rapport à la technologie diesel (mature).

Si l'on sépare à nouveau le résultat par ligne, on constate également que l'électrification d'Eeklo-Ronse est le sous-projet le plus bénéfique (145 millions d'euros dans le scénario Elek 2025). Les tracés Gand-Geraardsbergen et Charleroi-Couvin obtiennent un très bon score relatif pour l'électrification partielle avec train à batteries en 2025 (respectivement 22 millions d'euros et 47 millions d'euros) par rapport à l'électrification complète en 2025 (respectivement 20 millions d'euros et 58 millions d'euros). Les investissements pour Alost-Burst obtiennent à nouveau un score globalement négatif en raison de l'utilisation limitée de ce trajet.

Nous avons également réalisé une analyse approfondie de la sensibilité de manière systémique. Cela allait plus loin que de nombreuses études similaires, mais était nécessaire pour arriver à un rapport cohérent et fiable. Nous effectuons cette analyse en trois étapes. Premièrement, nous fixons des limites supérieures et inférieures réalistes pour les chiffres clés les plus importants afin de déterminer le meilleur et le pire des cas potentiels dans chaque scénario. Nous examinons ensuite l'influence de différents paramètres sur le résultat dans des conditions dites 'ceteris paribus'. Enfin, nous effectuons une analyse Monte-Carlo complète dans laquelle des résultats probables sont déterminés pour chaque scénario.

Ci-dessous, nous considérons d'abord la valeur théorique (VAN) que chaque scénario suppose (en millions d'euros) lorsque tous les chiffres clés prennent leur valeur la plus favorable (meilleur des cas ou best case) et lorsqu'ils prennent leur valeur la plus défavorable (pire des cas ou worst case). Cela montre que pour les alternatives, et certainement pour l'hydrogène, il existe une grande variation dans la valorisation possible des scénarios. D'un point de vue théorique, l'option train-batterie semble avoir le plus grand avantage potentiel (378 millions d'euros avec des taux d'émission élevés) et l'hydrogène le plus négatif (-385 millions d'euros avec des taux d'émission faibles).

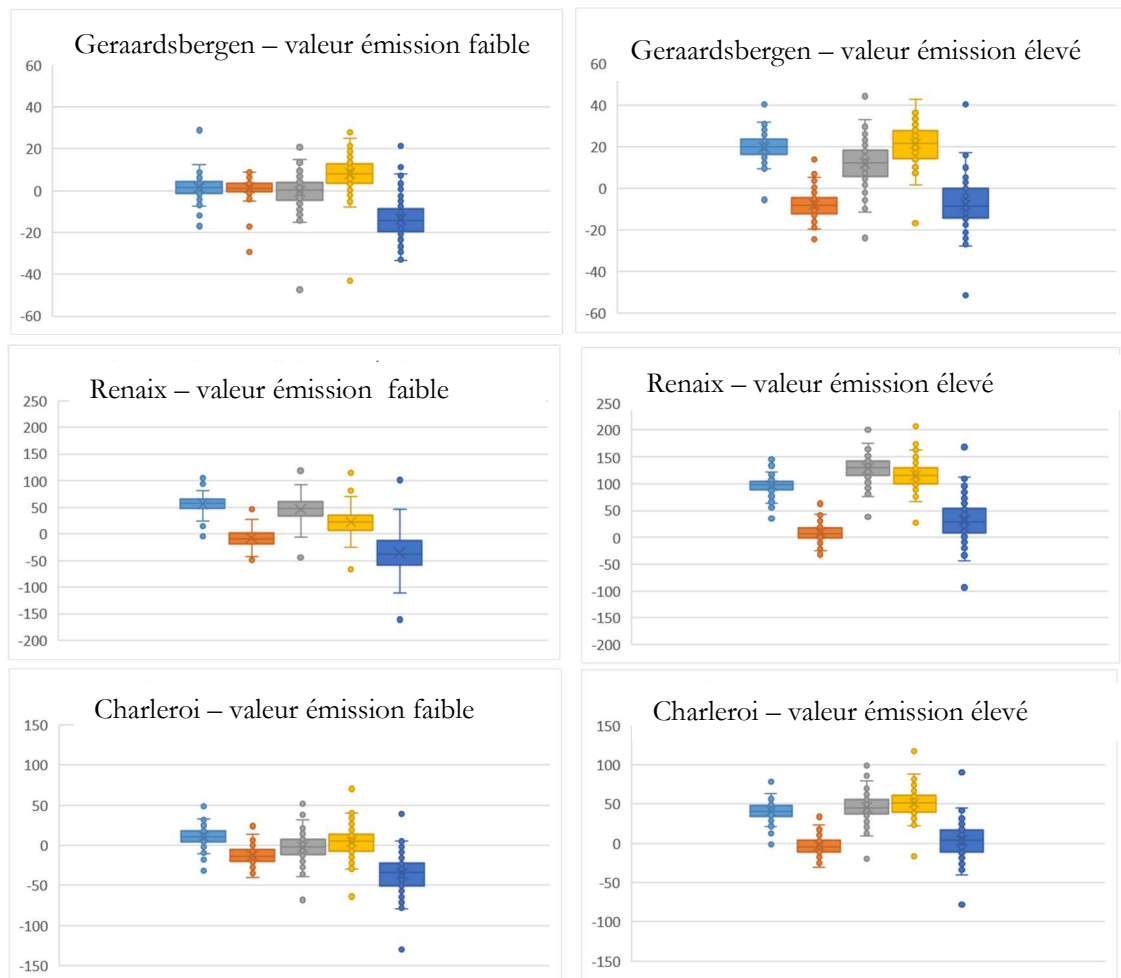
Scénario	Taux émissions (Impact en Million €)	Best case	Base	Worst case
		Electrification 2035	Faible	187 €
Diesel 2025	75 €	-70		-136 €
Electrification 2025	185 €	54		-186 €
Batterie 2025	210 €	20		-191 €
Hydrogène 2025	155 €	-158		-385 €
Electrification 2035	Élevé	270 €	182 €	20 €
Diesel 2025		107 €	-37 €	-104 €
Electrification 2025		341 €	209 €	-31 €
Batterie 2025		378 €	173 €	-22 €
Hydrogène 2025		295 €	-31 €	-245 €

L'analyse de sensibilité ajoute beaucoup de perspicacité à l'étude, mais n'entraîne pas de changements significatifs. Les avantages des variantes à électrification (partielle) étant raisonnablement proches les uns des autres, ils peuvent conduire à des différences dans le classement relatif des scénarios. Le coût d'électrification (investissement initial) est ici un paramètre essentiel. S'il s'avère être jusqu'à 50% (ou plus) supérieur par rapport à l'estimation initiale, l'électrification partielle (Bat 2025) semble avoir un meilleur score. En revanche, l'électrification complète avec des caténaires permet de créer une flotte de réserve plus petite ou d'utiliser un stock générique, ce qui joue bien sûr en faveur du train électrique classique. De plus, il existe des incertitudes quant aux coûts d'achat et d'entretien des trains à batteries. Si l'on prend en compte l'impact d'un stock de réserve plus faible, les bénéfices d'une électrification totale se présentent beaucoup plus fortement.

À la dernière étape de l'analyse, nous générons un ensemble de résultats plus larges, dans lesquels nous supposons que les ratios sont affectés par une distribution triangulaire. À partir de là, un ensemble de valeurs aléatoires est affecté pour les valeurs clés correspondant à la distribution initiale. A chaque fois un nouveau résultat est calculé pour la VAN. Pour chaque scénario on calcule 200 valeurs. Cela donne un aperçu de la distribution des principaux paramètres de l'investissement, ce que l'on appelle une analyse Monte Carlo. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut fournir des informations supplémentaires sur la distribution possible des résultats avec un minimum d'information. L'analyse Monte-Carlo nous montre que les avantages et inconvénients de chaque technologie se neutralisent à peu près, mais que les coûts d'électrification peuvent peser un peu plus.

Nous présentons les résultats de l'analyse complète de Monte Carlo de manière simplifiée, à l'aide d'un Box (Boîte) plot. Cela fournit une représentation facile à interpréter des résultats. La boîte au milieu de chaque scénario est délimitée par les premier et troisième quartiles des résultats avec une ligne indiquant la médiane. Un x dans le graphique indique la valeur de la moyenne. La ligne en haut et la ligne en bas sont respectivement limitées par 9% et 91% des valeurs. Les points montrent des résultats extrêmes (valeurs aberrantes). Les valeurs Meilleur cas (Best case) et Pire cas (Worst case) sont également affichées comme des valeurs extrêmes. Nous faisons à nouveau une distinction dans l'analyse avec des valorisations faibles des émissions et des valorisations élevées.

Ci-dessous, nous présentons les résultats pour toutes les lignes de passagers, à l'exception d'Alost-Burst, où cette analyse semble avoir peu de valeur ajoutée.



A partir de l'analyse de sensibilité, utiliser les trains à batteries semble plus avantageux que l'électrification totale pour les lignes Charleroi-Couvin et Geraardsbergen. La raison principale est que nous prenons en compte les éventuels surcoûts dans la réalisation de l'électrification. L'utilisation de trains à batteries est moins sensible par rapport à des surcoûts éventuels. La technologie alternative la plus prometteuse est donc le train à batteries. S'il y a une indication que les coûts de l'électrification peuvent largement dépasser les estimations du rapport, c'est cette technologie qui doit surtout être considérée. Cela semble plus probable dans le cas de la ligne Charleroi-Couvin. Les trains à batteries sont une solution qui est commercialement disponible et qui offre certainement des possibilités, mais il ne faut pas sous-estimer dans quelle mesure des modifications du réseau peuvent encore être nécessaires, principalement à cause d'une infrastructure de recharge relativement coûteuse. Ici, l'exploitant doit peser les avantages de pouvoir utiliser des trains électriques à partir du parc (générique) existant et d'avoir besoin d'une réserve plus petite ou d'avoir accès à un parc de trains utilisables dans des circonstances où la caténaire est absente ou endommagée (sur les lignes discutées dans ce rapport ou d'autres lignes).

La technologie la plus incertaine reste le train à hydrogène. L'analyse indique qu'il s'agit de l'investissement le plus risqué. Les trains à hydrogène n'obtiendront de bons résultats que dans des circonstances optimales (coût d'investissement élevé dans les lignes caténaires, faibles coûts de maintenance et faible prix de l'hydrogène), mais cela reste un résultat dépendant de la situation. Un autre facteur est ici le manque d'infrastructure de ravitaillement et une soi-disant écologie industrielle pour la synthèse de l'hydrogène. Bien qu'elle puisse être développée à Gand au cours de la prochaine décennie, l'électrification semble être une meilleure option dans ce cluster, car de nombreux itinéraires

sont déjà équipés de caténaires. Pour la ligne Charleroi-Couvin, les coûts et les risques liés à l'électrification sont plus élevés en raison du terrain plus difficile et de l'absence totale de caténaires le long du tracé. Cela peut également jouer en défaveur des trains à batteries. En principe, le potentiel pour l'hydrogène est donc plus important pour la ligne Charleroi-Couvin, mais pour l'instant il semble peu probable que la synthèse d'hydrogène se fasse à grande échelle. Dans le rapport, nous signalons des synergies potentielles avec d'autres projets, par exemple le projet de test de bus à hydrogène en collaboration avec Engie et le transformateur de déchets Tibi.

Notre conclusion finale est que l'électrification complète des lignes diesel restantes présente un avantage social potentiellement important. A terme, nous recommandons donc fortement un renoncement complet à des trains diesel, même si des nouveaux trains diesel répondent à des normes plus élevées que l'actuel AR 41. Néanmoins, il y a relativement peu de différence en terme de bénéfices entre un scénario où il n'y est renoncé qu'en 2035 ou déjà en 2025. Le choix appartient principalement aux décideurs et dans quelle mesure l'impact négatif local (principalement autour de Gand) des trains diesel serait à l'ordre du jour. S'il devait être décidé d'électrifier, nous recommandons de prioriser les lignes entre Eeklo, Gand et Renaix. En ce qui concerne l'exploitation de la ligne Alost-Burst, il faut souligner que cette ligne est mieux considérée comme une partie d'un projet plus grand d'électrification ou d'alternatives. Cette ligne ne doit pas être vue comme une île dans le réseau.

Dans le cas des lignes de fret, ce rapport soutient l'électrification de Genk-Bilzen (21c). L'électrification de la ligne 204 semble potentiellement intéressante. En particulier, il convient de vérifier si une option de transport de passagers sur cette ligne sera éventuellement retenue. Ce rapport n'a pas mené une étude distincte à ce sujet, mais on fait référence à l'étude de Goudappel-Coffeng (2018). Dans le cas de la ligne 55, l'électrification ne semble pas intéressante, à moins qu'une forte augmentation de la demande de transport puisse être réalisée sur cette ligne.