



Commission économique pour l'Europe**Comité des transports intérieurs****Groupe de travail des transports par chemin de fer****Soixante-dix-septième session**

Genève, 15-17 novembre 2023

Point 18 de l'ordre du jour provisoire

Changements climatiques et transport ferroviaire**Amélioration de l'efficacité énergétique dans le domaine
du transport ferroviaire****Note du secrétariat****I. Contexte**

1. Le Groupe de travail des transports par chemin de fer (SC.2) se souviendra qu'à sa soixante-seizième session, un atelier sur les changements climatiques avait été organisé, dans le prolongement des travaux qu'il avait déjà effectués dans ce domaine. Dans le droit fil de ces travaux et étant donné que le Comité des transports intérieurs met l'accent sur l'atténuation des changements climatiques en élaborant une nouvelle stratégie, le présent document porte sur les moyens de renforcer l'efficacité énergétique du transport ferroviaire afin d'améliorer encore la bonne réputation du secteur en la matière.

II. Introduction

2. Le transport ferroviaire est l'un des moyens les plus durables de transporter des passagers et des marchandises. La quantité d'énergie utilisée et les volumes de gaz à effet de serre émis sont inférieurs à ceux des autres moyens de transport, ce qui explique pourquoi la transition vers le chemin de fer est un objectif important, que de nombreux pays ont intégré dans les programmes établis en vue d'atteindre les cibles définies dans l'Accord de Paris et dans les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies.

3. Comme le secteur ferroviaire bénéficie déjà d'un niveau de durabilité élevé, il n'a pas été jugé urgent d'en améliorer les performances et, par rapport aux autres moyens de transport, le secteur a fait l'objet de moins d'attention ces dernières années pour ce qui est du développement de technologies innovantes et de l'amélioration de l'efficacité. Faute de travaux de recherche et d'investissements, seules de légères améliorations ont été enregistrées, en particulier par rapport au secteur du transport routier, dans lequel les technologies modernes ont permis de réduire considérablement la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.



4. Pourtant, des améliorations non négligeables sont possibles dans le secteur ferroviaire et certaines d'entre elles pourraient être mises en œuvre à faible coût et dans des délais relativement brefs. Le recours à de nouvelles technologies nécessiterait, tout d'abord, un effort de la part des exploitants de chemins de fer, mais les investissements seraient remboursés en peu de temps grâce aux économies réalisées sur la consommation d'énergie.

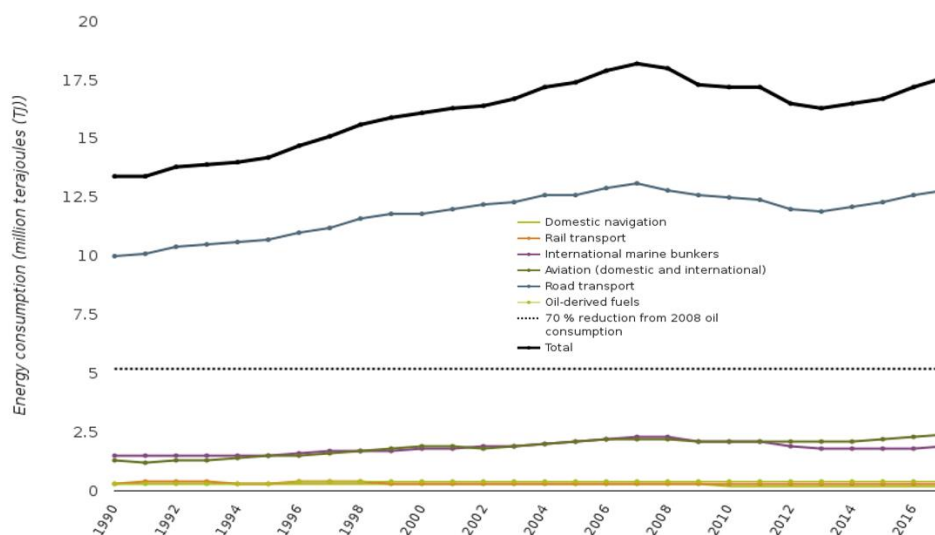
5. Le présent document donne un aperçu du niveau actuel de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur ferroviaire, par rapport aux autres moyens de transport. Une analyse des meilleures pratiques permettant d'améliorer la durabilité des chemins de fer, en particulier grâce à une baisse de la consommation d'énergie, y est présentée. Les exemples de meilleures pratiques sont divisés en deux catégories : celles qui nécessitent des dépenses d'investissement et celles qui n'impliquent que peu ou pas de dépenses. En conclusion, d'autres pistes susceptibles d'être envisagées dans ce domaine sont proposées au Groupe de travail.

II. Consommation d'énergie dans le secteur des transports

6. Comme indiqué précédemment, le transport ferroviaire est l'un des moyens de transport les plus durables. Les niveaux actuels de consommation d'énergie et le volume des émissions de gaz à effet de serre sont analysés dans les paragraphes suivants.

Figure 1

Consommation d'énergie dans le secteur des transports (1990-2017)

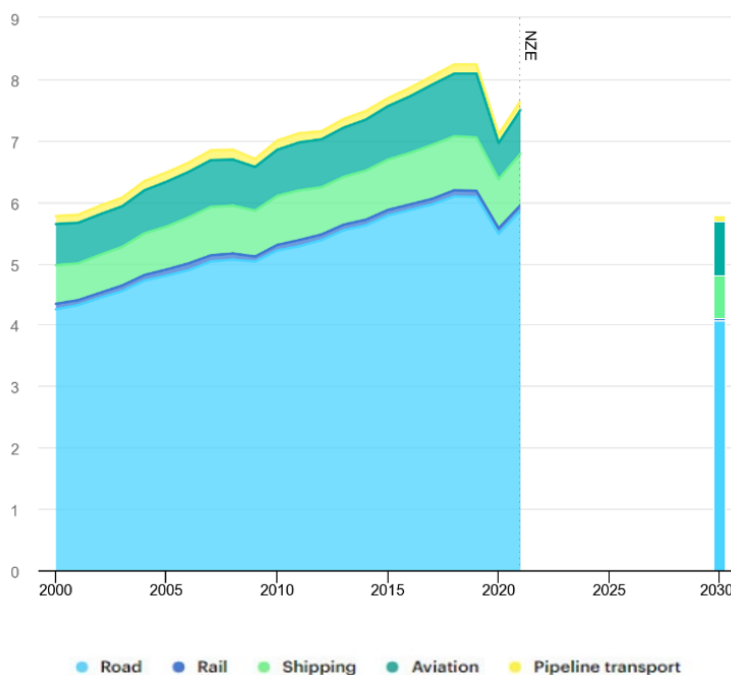


Source : Agence européenne pour l'environnement, 2019, « Consommation finale d'énergie dans les transports par type de carburant », données fournies par l'Office statistique de l'Union européenne (Eurostat). https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/final-energy-consumption-by-transport-6#tab-chart_3.

7. La figure 1 ci-dessus montre la consommation d'énergie des différents modes de transport, tant pour le fret que pour les passagers, dans l'Union européenne (UE) entre 1990 et 2017. Ce graphique, qui a été élaboré à partir de données fournies par Eurostat, est affiché sur le site Web de l'Agence européenne pour l'environnement. Le transport ferroviaire (courbe orange) ne représente qu'une petite fraction de la consommation totale d'énergie dans les pays analysés, ce qui s'explique par la faible part de marché du transport ferroviaire, mais aussi par la plus grande efficacité énergétique du secteur. En 2017, dans l'Union européenne, le secteur ferroviaire représentait 6,8 % du trafic total et consommait 0,3 million de térajoules (TJ) d'énergie, soit moins de 2 % de la consommation totale d'énergie du secteur des transports¹.

¹ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f0f3e1b7-ee2b-11e9-a32c-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-287498905>.

Figure 2
Émissions mondiales de CO₂ dues aux transports, par sous-secteur, dans le scénario « zéro émission nette », 2000-2030



Source : AIE, Paris, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-sub-sector-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>, AIE. Licence : CC BY 4.0.

8. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) indique qu'une situation semblable peut être observée au niveau mondial : en 2021, la consommation totale d'énergie dans le secteur des transports s'élevait à 113,4 millions de térajoules (TJ), le transport ferroviaire représentant 2,27 millions de TJ (2 %)². Le schéma est le même en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre : comme le montre la figure 2 établie par l'AIE, en 2019, le transport ferroviaire a émis 0,1 giga tonne (GT) de CO₂ sur un total de 8,24 GT pour l'ensemble du secteur des transports³. Plus précisément, le transport ferroviaire de marchandises émet en moyenne un quatorzième du CO₂ produit par le transport routier, tandis que le transport de passagers par chemin de fer émet en moyenne moins d'un dixième du CO₂ produit par une grosse voiture par kilomètre⁴,⁵.

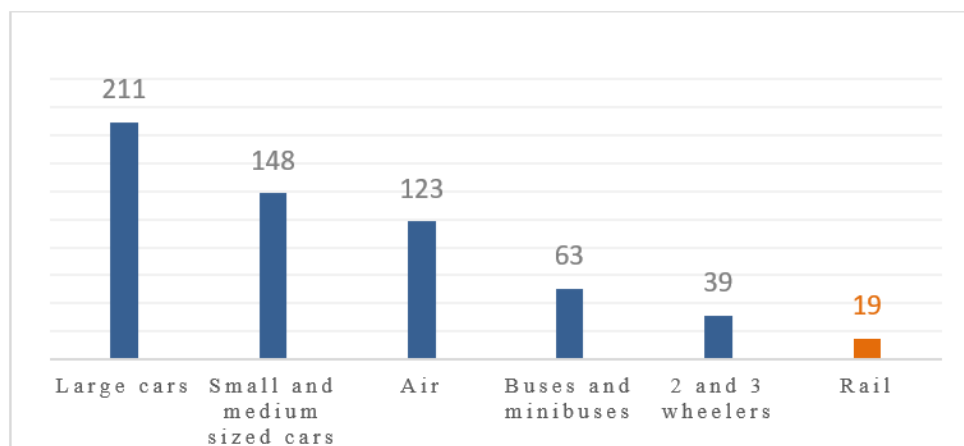
² <https://www.iea.org/reports/rail>.

³ <https://www.iea.org/reports/transport>. À noter : seules les émissions directes sont prises en compte. Par conséquent, à titre d'exemple, les émissions provenant de l'électricité produite pour faire fonctionner les trains ne sont pas comptabilisées.

⁴ <https://climate.mit.edu/explainers/freight-transportation#:~:text=Breaking%20down%20freight%20emissions&text=Most%20ships%20burn%20fossil%20fuels,of%20freight%20the%20same%20distance.>

⁵ [https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/well-to-wheel-wake-wing-ghg-intensity-of-motorised-passenger-transport-modes-2.](https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/well-to-wheel-wake-wing-ghg-intensity-of-motorised-passenger-transport-modes-2)

Figure 3
Émissions moyennes de CO₂ par passager-km (grammes)



Source : AIE, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/well-to-wheel-wake-wing-ghg-intensity-of-motorised-passenger-transport-modes-2>.

9. La différence est plus flagrante si l'on compare les différents modes de transport. La consommation d'énergie et les émissions de CO₂ de différents modes de transport sont comparées dans le tableau 1 ci-dessous pour un passager voyageant entre Genève et Paris, un jour ouvrable.

Tableau 1
Consommation d'énergie et émissions de CO₂ entre Genève et Paris : passagers

Passagers	Train	Voiture	Avion
Consommation d'énergie (l d'équivalent essence)	16,9	25,7	40,2
Émissions de CO ₂ (kg)	4	57,8	95,8

Source : Eco passenger.

10. Le tableau ci-dessus a été élaboré à partir des données fournies par Eco passenger⁶. Comme on peut le constater, la consommation d'énergie du train exprimée en litres d'équivalent essence, y compris l'énergie requise pour produire l'électricité nécessaire au transport ferroviaire, est inférieure à celle des deux autres modes de transport.

11. La même comparaison est présentée dans le tableau 2 ci-dessous, mais pour le transport de marchandises, en utilisant les données d'EcoTransIT World, ce qui montre l'avantage significatif du secteur ferroviaire⁷.

Tableau 2
Consommation d'énergie et émissions de CO₂ entre Genève et Paris : transport de marchandises

Passagers	Train	Camion	Avion
Consommation d'énergie (mégajoules)	264	645	13 732
Émissions de CO ₂ (kg)	1,3	40,5	931,2

Source : EcoTransIT World.

12. Plus précisément, dans l'exemple du transport de marchandises, sachant qu'un train peut facilement transporter plus de mille tonnes de marchandises, une économie d'énergie de 10 % permettrait d'économiser 26 gigajoules, ce qui correspond à la consommation d'énergie annuelle de sept personnes en Suisse.

⁶ http://ecopassenger.org/bin/query.exe/en?ld=uic-eco&L=vs_uic&protocol=https:&OK#focus.

⁷ <https://www.ecotransit.world/fr/calculateur-demissions/>.

13. La différence est encore plus saisissante si l'on compare les émissions de CO₂ des tableaux 1 et 2 : voyager en train permet d'émettre moins d'un quatorzième des émissions produites lorsque l'on conduit une voiture et moins d'un vingt-cinquième de celles produites si l'on prend l'avion. Pour le transport de marchandises, la différence est encore plus grande, puisque le transport ferroviaire n'émet qu'une infime partie du CO₂ qui serait produit par les deux autres modes de transport.

III. Consommation d'énergie par le transport ferroviaire dans les pays de la CEE

14. Comme l'indique l'Union internationale des chemins de fer (UIC), l'efficacité énergétique est une importante source potentielle d'économies – une amélioration de 1 % de l'efficacité énergétique permettrait d'économiser plusieurs millions d'euros par an pour la plupart des chemins de fer – et serait également le moyen le plus direct de réduire les émissions de CO₂ et d'obtenir de bonnes performances environnementales⁸. Une estimation de la quantité totale d'énergie utilisée dans les pays de la Commission économique pour l'Europe (CEE) par le transport ferroviaire est donnée dans la présente section, sur la base des informations figurant dans la base de données statistiques de la CEE-ONU pour le nombre total de passagers-km et de tonnes-km (données de 2019). Cette estimation porte sur 41 pays partageant des données sur le trafic de passagers^{9, 10} et 37 pour le transport de marchandises¹¹. Une répartition 50-50 entre les véhicules électriques et les véhicules diesel a été utilisée dans l'estimation. Ce calcul ne tient compte que de la consommation d'énergie nécessaire à la circulation des trains.

15. En 2019, un total de 509 623 millions de passagers-km et de 1 414 019 millions de tonnes-km a été enregistré.

16. Selon la méthode élaborée par EcoTransIT World¹², un train de marchandises électrique de taille moyenne consomme, pour transporter une tonne de marchandises, 15,7 Wh par km, tandis qu'un train diesel consomme 42,4 Wh par km. Par conséquent, la consommation totale des trains de marchandises électriques est d'environ 11,1 millions de mégawattheures, tandis que les trains diesel consomment environ 30 millions de mégawattheures par an. À noter que les trains diesel consomment en moyenne 2,7 fois plus d'énergie que les trains électriques.

17. S'agissant du transport de passagers, en utilisant la méthode d'Eco passenger¹³, la consommation moyenne d'énergie d'un passager par kilomètre est égale à 88,2 Wh pour les trains électriques et à 25,2 g de diesel pour les trains non électriques. En multipliant ces valeurs par le nombre total de passagers-km, on obtient une consommation totale de 22,5 millions de MWh et de 6 421 millions de kg de diesel. Comme la consommation en wattheures n'est pas disponible pour les trains diesel de passagers, le même ratio que celui indiqué ci-dessus pour le fret a également été utilisé pour les passagers (les valeurs relatives au diesel étant 2,7 fois plus élevées que celles relatives à l'électrique). Sur la base de cette hypothèse, la consommation totale d'énergie pour le secteur du transport ferroviaire de passagers est d'environ 60 millions de MWh.

⁸ <https://uic.org/sustainability/energy-efficiency-and-co2-emissions/>.

⁹ Albanie, Autriche, Azerbaïdjan, Bélarus, Bulgarie, Canada, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, États-Unis d'Amérique, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Israël, Italie, Kazakhstan, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Macédoine du Nord, Monténégro, Norvège, Ouzbékistan, Pologne, Portugal, République de Moldova, Roumanie, Royaume des Pays-Bas, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Serbie, Slovaquie, Slovaquie, Suède, Suisse, Tchéquie, Türkiye, Ukraine.

¹⁰ Seule l'énergie consommée par les transports, à l'exclusion de celle des gares ferroviaires, est incluse.

¹¹ Albanie, Allemagne, Autriche, Azerbaïdjan, Bélarus, Bosnie-Herzégovine, Bulgarie, Canada, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Israël, Italie, Kazakhstan, Lettonie, Lituanie, Monténégro, Macédoine du Nord, Norvège, Pologne, Portugal, République de Moldova, Roumanie, Royaume des Pays-Bas, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Slovaquie, Slovaquie, Suède, Suisse, Tchéquie, Ukraine.

¹² https://www.ecotransit.org/wp-content/uploads/20230612_Methodology_Report_Update_2023.pdf.

¹³ https://ecopassenger.hafas.de/hafas-res/download/Ecopassenger_Methodology_Data.pdf, p. 18.

18. La consommation totale d'énergie par les chemins de fer dans les pays de la CEE analysée est égale à environ 124 millions de MWh, soit approximativement 0,45 million de térajoules. Si l'on considère que le total de la consommation d'énergie du secteur ferroviaire dans l'Union européenne est de 0,3 million de térajoules, l'estimation relative aux pays de la CEE semble acceptable.

19. À titre de comparaison, si l'on considère que la consommation moyenne d'électricité d'un foyer aux États-Unis est d'environ 10 MWh par an¹⁴, l'énergie totale utilisée pour l'exploitation des chemins de fer pourrait alimenter 12,4 millions de foyers pendant une année entière. Cette comparaison permet de comprendre pourquoi il demeure important de réaliser des économies d'énergie dans le secteur ferroviaire : un niveau d'économie réalisable de 10 % permettrait de libérer de l'électricité pour plus d'un million de foyers.

IV. Investissements axés sur les économies d'énergie

20. Comme indiqué précédemment, des améliorations significatives sont encore possibles dans le transport ferroviaire si des mesures pour économiser l'énergie et, par conséquent, réduire les émissions de CO₂ sont adoptées. Ces stratégies peuvent être divisées en deux catégories : celles qui nécessitent un investissement important, mais qui sont susceptibles d'entraîner les économies les plus importantes à l'avenir, et d'autres mesures davantage liées à l'exploitation, qui nécessitent peu ou pas de dépenses initiales, mais pourraient néanmoins contribuer à éviter le gaspillage d'énergie et à réduire les émissions de CO₂ qui y sont liées. Ces deux approches sont définies dans la présente section.

Remplacement et entretien du matériel roulant ancien

21. S'il est évident que les locomotives et autres matériels roulants modernes sont plus efficaces sur le plan énergétique que les modèles plus anciens, le remplacement des véhicules, qui représenterait un investissement coûteux, n'est pas toujours nécessaire : la programmation d'un entretien fréquent peut encore avoir des effets importants sur la réduction de la consommation d'énergie. Pour prendre un exemple simple, le remplacement et l'entretien corrects des essieux peuvent diminuer les frottements de contact avec les rails, ce qui réduit la puissance nécessaire au déplacement du train.

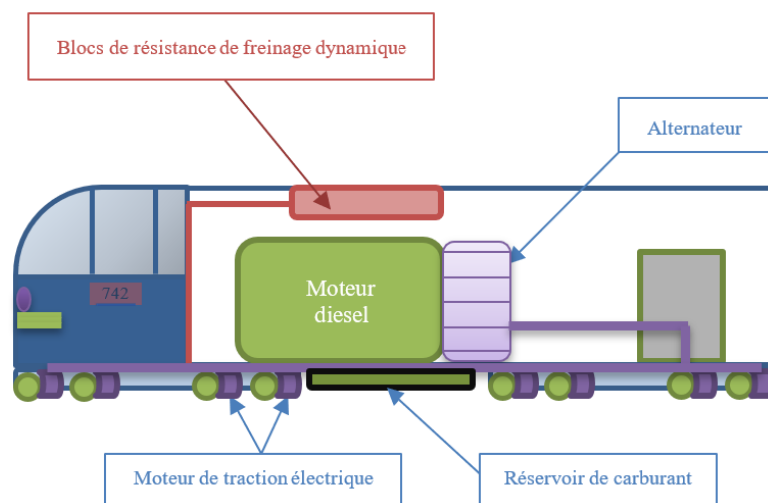
Remplacement du diesel

22. Comme indiqué dans les paragraphes précédents, les trains électriques sont plus efficaces que les trains fonctionnant au diesel, tant pour le transport de passagers que pour celui de marchandises. En effet, comme le montre l'Environmental and Energy Study Institute (EESI)¹⁵, les locomotives diesel ne peuvent transformer en énergie utilisée pour faire avancer le train que 30 % à 35 % de l'énergie brûlée, alors que les trains électriques peuvent utiliser jusqu'à 95 % de l'énergie électrique captée par le pantographe. Cette caractéristique est due au mode de fonctionnement des locomotives diesel : la puissance générée par le moteur diesel n'est pas directement utilisée pour entraîner les roues, mais sert à faire fonctionner un alternateur qui produit de l'énergie électrique, laquelle est transmise à des moteurs de traction électriques pour transférer l'énergie aux roues (voir fig. 4 ci-après). Ce processus entraîne un gaspillage important lors de la production de l'énergie de traction. Les trains électriques sont également moins coûteux en termes de frais d'exploitation et d'entretien. Il existe des locomotives diesel à traction hydraulique, qui ne transforment pas le carburant en énergie électrique, mais elles sont rarement utilisées, car elles sont encore moins efficaces que les locomotives diesel-électriques.

¹⁴ <https://www.energybot.com/blog/average-energy-consumption.html#:~:text=The%20EIA%20aggregates%20data%20for,at%2014%2C302%20kWh%20per%20home.>

¹⁵ <https://www.eesi.org/articles/view/electrification-of-u.s.-railways-pie-in-the-sky-or-realistic-goal.>

Figure 4
Composants de traction diesel-électrique



Source : Secrétariat.

23. Bien que le matériel roulant électrique soit plus efficace, les coûts de l'électrification sont souvent très élevés, ce qui rend cette technologie non viable d'un point de vue économique sur les lignes moins fréquentées. La Commission européenne l'a également confirmé par l'intermédiaire de l'Observatoire européen des carburants alternatifs, lequel indique que sur les lignes à faible densité, il n'existe pas aujourd'hui de solution rentable et éprouvée pour remplacer les trains à moteur diesel¹⁶.

24. Dans la région de la CEE, le degré d'électrification varie considérablement : en moyenne, plus de 50 % des lignes sont actuellement électrifiées dans les États membres de l'Union européenne, tandis que les niveaux sont nettement plus bas dans les États non membres.

25. En guise d'alternative et de complément à la traction électrique, des locomotives bi-modes ou multisystème ont été mises en service. Ces locomotives peuvent fonctionner à la fois à l'électricité et au diesel, parfois avec l'aide d'une batterie électrique supplémentaire. Cette technologie permet de réaliser des économies d'énergie lorsque le train circule sur des lignes électrifiées et/ou lorsque la batterie électrique est utilisée. Pour l'instant, le matériel roulant entièrement alimenté par batterie n'est pas courant sur les grandes lignes, en raison du temps de charge, qui est long, et des coûts élevés associés à la construction et à l'entretien. Cette technologie est utilisée principalement sur des locomotives de manœuvre. Des travaux de recherche ont été effectués et des prototypes ont été élaborés en vue de convertir le matériel roulant diesel existant afin qu'il puisse être utilisé de manière hybride avec des carburants de remplacement, mais le coût de la conversion est très élevé et le processus de réenregistrement et de certification est pesant. Cette solution n'est donc pas viable pour l'instant et ne constitue qu'une option.

26. D'autres carburants, tels que le biodiesel, ont déjà été utilisés pour remplacer le diesel afin d'émettre moins de polluants, mais le marché est encore limité. L'hydrogène a été testé avec succès en tant que solution de remplacement, mais cette technologie n'en est qu'à ses débuts. Des recherches plus poussées sur les moteurs à hydrogène permettraient d'en élargir l'utilisation.

Augmentation de la tension des lignes aériennes

27. Pour les lignes électrifiées, l'augmentation de la tension entraînerait une diminution des pertes au niveau du transport de l'électricité. En outre, l'équipement électrique d'une locomotive qui fonctionne à 25 kV est en moyenne plus léger que celui d'une locomotive à

¹⁶ <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/rail#:~:text=Rail%20transport%20is%20currently%20by,is%20running%20on%20these%20lines.>

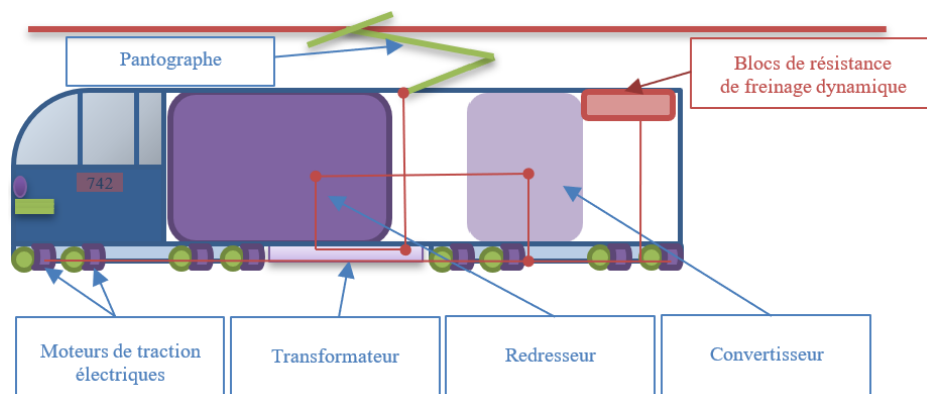
3 kV, ce qui se traduit par une économie d'énergie supplémentaire. Cette solution serait efficace tant pour les lignes électrifiées déjà en place que pour les nouvelles, mais les coûts prohibitifs de l'adaptation des locomotives actuelles à une tension plus élevée font que cette solution ne devrait être envisagée que pour l'électrification des nouvelles lignes.

Systèmes de freinage à récupération

28. Le matériel roulant peut utiliser deux systèmes de freinage différents : mécanique et dynamique. Le premier est fondé sur l'activation des freins, qui ralentissent directement le train au moyen d'une force mécanique, tandis que le freinage dynamique implique l'inversion des moteurs de traction électrique qui entraînent normalement les roues : ces moteurs de traction sont alors utilisés comme générateurs électriques, lesquels créent une résistance au mouvement réel du train, qu'ils ralentissent. Généralement, l'électricité produite est transformée en chaleur et transférée à des blocs de résistance (voir fig. 4 et 5). Ces dernières années, les fabricants de trains ont produit des systèmes permettant de restituer directement au réseau électrique cette énergie produite par les trains électriques par l'intermédiaire du pantographe ou de la stocker dans une batterie embarquée à bord du train.

Figure 5

Locomotive électrique avec résistance de freinage dynamique



Source : Secrétariat.

29. Le système sans batterie actuel ne permet de réaliser des économies que si un autre train ou d'autres dispositifs connectés au même réseau électrique utilisent l'énergie produite en même temps, le surplus d'énergie étant utilisé pour alimenter les blocs de résistance. Des essais ont été réalisés en installant des batteries ou des supercondensateurs au bord des voies¹⁷, mais plus la distance à parcourir est longue, plus la perte d'énergie augmente, de sorte que cette technologie est optimale sur les lignes urbaines. Sur le matériel roulant électrique, le freinage à récupération sans batterie s'est déjà révélé très efficace pour économiser de l'énergie : les différentes études réalisées ont toutes montré que les économies dépendent du type de locomotive, de la vitesse, de la température ambiante et d'autres facteurs, mais qu'une économie d'au moins 10 % de la consommation d'énergie était possible.

30. Comme indiqué précédemment, l'énergie peut également être utilisée pour charger une batterie embarquée à bord d'un train, mais à ce jour, les dispositifs de stockage de l'énergie ne sont pas suffisamment efficaces pour stocker d'importantes quantités d'électricité. L'avantage de l'utilisation de batteries est qu'elle permet d'économiser de l'énergie, y compris pour les locomotives diesel. En outre, les batteries peuvent être utilisées par les trains pour manœuvrer dans les terminaux ferroviaires lorsqu'ils ne sont pas électrifiés.

¹⁷ <https://www.fsnews.it/it/focus-on/sostenibilita/2021/4/22/fs-energia-frenata-treni-progetto-rfi-stazione-forli.html>.

Systèmes anti-ralenti et moteurs auxiliaires

31. Dans le secteur ferroviaire, il est courant de laisser les locomotives tourner au ralenti au lieu de les arrêter, car la mise en marche d'une locomotive est une procédure longue. De plus, les moteurs des locomotives utilisent de l'eau comme liquide de refroidissement, ce qui peut les empêcher de fonctionner si la température est inférieure à 5 °C. D'autres systèmes mécaniques, tels que le système de freinage, nécessitent que le moteur tourne pour fonctionner correctement, ce qui entraîne un gaspillage d'énergie considérable, que ce soit au niveau du carburant diesel ou de l'électricité. C'est pourquoi différentes technologies ont été mises au point ces dernières années pour remédier à ce problème. Ces mesures peuvent avoir un effet important sur la réduction de la consommation d'énergie, à des coûts très faibles, voire nuls.

32. Le système de démarrage et d'arrêt automatique du moteur est l'une des technologies disponibles les plus simples : il permet d'éteindre le moteur en fonction d'une série de paramètres, tout en maintenant l'eau à la bonne température et les autres instruments prêts à fonctionner. Cette technologie permet de réduire la durée du fonctionnement au ralenti de jusqu'à 40 %, mais ne permet pas les interruptions si la température ambiante est inférieure à 5 °C¹⁸.

33. L'utilisation d'un groupe électrogène d'appoint est plus efficace que le système de démarrage et d'arrêt automatique du moteur : un petit moteur supplémentaire, installé sur la locomotive, fonctionne à la place du moteur principal lorsque le train n'est pas en mouvement. Souvent électrique, ce groupe électrogène de taille plus réduite est suffisamment efficace pour maintenir les systèmes mécaniques en fonctionnement et permet d'éteindre le moteur principal, ce qui se traduit par une réduction considérable de la consommation d'énergie. Des économies d'énergie plus importantes peuvent être réalisées si le groupe électrogène d'appoint est alimenté par une batterie. Les groupes électrogènes d'appoint peuvent également être associés à un système de démarrage et d'arrêt automatique du moteur de manière à fonctionner en parallèle¹⁹.

34. L'utilisation d'un système électrique externe, non embarqué, pourrait réduire la consommation d'énergie pendant les périodes de ralenti habituelles sans installation d'un moteur auxiliaire. En effet, grâce à cette technologie, le moteur principal est directement relié à une source d'énergie externe lorsque le train est en stationnement, ce qui pourrait permettre de l'éteindre, au moyen de systèmes supplémentaires.

35. Tous ces systèmes peuvent également permettre de réaliser des économies en réduisant l'énergie consommée et en prolongeant la durée de vie des moteurs de locomotive.

Terminaux de fret et triage

36. Les terminaux de fret ferroviaire sont rarement électrifiés. Cela peut être dû aux coûts élevés liés à l'électrification et à l'entretien de lignes multiples, mais surtout à des restrictions de nature opérationnelle. Par conséquent, des véhicules de manœuvre ou de vieilles locomotives équipées de moteurs diesel sont utilisés pour déplacer le matériel roulant jusqu'à sa destination finale ; or l'efficacité énergétique de ces déplacements est faible.

37. Le fait d'investir dans la rénovation de la flotte de manœuvre en privilégiant du matériel roulant équipé de batteries ou de systèmes anti-ralenti, comme mentionné précédemment, serait une solution particulièrement efficace pour ce type de véhicules.

Technologies d'aide à la conduite

38. Les fabricants et les exploitants de trains ont mis au point des instruments et des technologies pour surveiller et améliorer la conduite des trains afin d'économiser de l'énergie. Parmi ces technologies figurent des systèmes qui indiquent aux conducteurs les meilleures pratiques pour augmenter ou réduire la vitesse et la marche en roue libre en fonction des différents trajets. D'autres contrôlent directement les dispositifs d'accélération et de freinage dynamique. Par exemple, la régulation adaptative élaborée et utilisée par les

¹⁸ <https://otc-cta.gc.ca/fra/publication/bruit-et-vibrations-causes-par-fonctionnement-au-ralenti-des-locomotives>.

¹⁹ <https://sgp.fas.org/crs/misc/IF10978.pdf>.

Chemins de fer fédéraux suisses (CFF) « ...fournit des recommandations de conduite au personnel des locomotives afin d'éviter des arrêts non planifiés provoqués par des signaux d'arrêt²⁰ », réduisant ainsi l'énergie totale consommée.

39. Les CFF ont également mis en service un système d'« affichage de la ponctualité », qui indique l'heure estimée de passage à différents points de contrôle afin d'économiser l'énergie utilisée pour modifier la vitesse. Ce système permet aux trains d'arriver à l'heure en évitant les retards susceptibles d'avoir des répercussions sur la reprogrammation des lignes, laquelle oblige les autres trains à consommer plus d'énergie. Les CFF ont estimé que, grâce aux économies d'énergie réalisées, l'investissement serait remboursé en l'espace de 6 mois²¹.

Éclairage, systèmes de climatisation et appareils auxiliaires dans les trains de voyageurs et les gares ferroviaires

40. Le fonctionnement du matériel roulant, la climatisation et l'éclairage représentent jusqu'à 90 % de l'électricité consommée par les chemins de fer²².

41. Les systèmes destinés à assurer le confort des passagers peuvent représenter environ 20 % de la consommation d'énergie des trains de voyageurs. Cependant, la longue durée de vie des voitures est susceptible d'avoir des répercussions sur la qualité des dispositifs installés. En effet, les technologies installées dans les voitures peuvent être anciennes et moins efficaces d'un point de vue énergétique que les technologies plus récentes. Investir dans la rénovation de l'éclairage et d'autres dispositifs permettrait de réaliser des économies significatives tout en améliorant les performances et, donc, le confort des passagers. Cela est vrai aussi bien pour les installations embarquées à bord des trains que pour les gares. Les technologies modernes pourraient également limiter la consommation d'énergie uniquement à la demande : l'installation d'instruments automatisés permettant d'adapter l'utilisation des dispositifs à des besoins spécifiques, accompagnés de minuteries et de capteurs, peut éviter le gaspillage d'énergie. Par exemple, les systèmes de climatisation peuvent être réglés sur une puissance plus faible le soir et les escaliers mécaniques peuvent fonctionner uniquement à l'approche d'un passager. Ainsi, les CFF établissent des horaires précis afin de ne chauffer les trains de voyageurs qu'en cas de besoin²³.

Énergies renouvelables

42. L'installation de panneaux solaires sur les infrastructures ferroviaires telles que le toit des gares, des dépôts et des terminaux de fret peut permettre aux chemins de fer de réaliser d'autres gains d'efficacité énergétique et d'alimenter certains des systèmes hybrides mentionnés aux paragraphes précédents.

V. Stratégies et comportements en matière d'économie d'énergie

Planification des itinéraires, réglage de la vitesse et marche en roue libre

43. Pendant le trajet d'un train, la majeure partie de l'énergie est consommée pour augmenter la vitesse, que ce soit lors d'un redémarrage après un arrêt, pour gravir une pente ou lors d'une marche normale. Ces caractéristiques devraient être prises en compte lors de la conduite et de la planification de l'utilisation des voies par les trains.

44. Certaines stratégies permettent d'économiser de l'énergie, par exemple accélérer davantage dans les premières phases du trajet pour ralentir dans les autres tronçons ; n'accélérer que dans les premières phases de la montée pour profiter de l'inertie lors de la descente ; privilégier la marche en roue libre plutôt que le freinage. L'expression « conduite proactive » résume tous ces comportements.

²⁰ <https://company.sbb.ch/fr/les-cff-comme-partenaire-commercial/prestations-eft/energie/energie-durable/efficacite-energetique.html>.

²¹ <https://news.sbb.ch/fr/medias/article/123593/nouvel-affichage-dans-les-locomotives-trains-plus-ponctuels-economies-d-energie>.

²² <https://www.ns.nl/en/about-ns/sustainability/climate-neutral/energy-saving-measures.html>.

²³ Efficacité énergétique CFF.

45. Il peut être déterminant d'appliquer un système de planification visant à éviter les arrêts en cours de route et de favoriser un style de conduite caractérisé par des augmentations de vitesse aussi douces que possible et qui tire parti des caractéristiques de la morphologie naturelle pour économiser de l'énergie. À titre d'exemple, la société allemande Deutsch Bahn indique que ses programmes de formation des conducteurs visant à garantir une utilisation efficace de l'énergie ont permis des réductions de la consommation d'énergie allant jusqu'à 13 %²⁴.

46. Plusieurs exploitants ont également indiqué que la réduction de la vitesse moyenne et/ou de la vitesse maximale permettait de réduire la consommation d'énergie. Les gouvernements pourraient envisager d'adopter des réglementations visant à réduire la vitesse maximale, mais celles-ci pourraient être difficiles à appliquer sur les itinéraires très fréquentés. En effet, le temps de parcours serait augmenté, ce qui entraînerait une diminution du nombre de trains circulant et affecterait également le niveau de service proposé.

Nombre de passagers et de voyages, volume du fret

47. Les locomotives, en particulier celles destinées au transport de marchandises, sont des machines puissantes capables de supporter une charge importante. Une fois le moteur démarré et le train en marche, le fait de tirer une tonne de fret ou un wagon de passagers supplémentaire n'a pas d'incidence importante sur la consommation d'énergie. En planifiant mieux la fréquence des trains, il serait possible de réduire le nombre de trajets tout en remplissant les trains de manière plus efficace. Par conséquent, il convient d'effectuer des études sur la manière de programmer et d'organiser les voyages en train de façon à réaliser des économies d'énergie sans répercussions sur le niveau de service proposé. La réduction du nombre de voitures et d'arrêts en fonction de la demande pourrait également être envisagée pour les trains de passagers. Ces comportements pourraient entraîner une réduction importante de l'énergie utilisée par passager ou par tonne de fret. Cependant, en mettant à tout prix l'accent sur l'efficacité, les passagers et les clients risquent de ne pas vouloir utiliser le train plutôt que d'autres moyens de transport.

48. Même s'il est pratique pour les exploitants, le recours à une voiture-restaurant ou à des voitures proposant des services similaires n'est pas efficace du point de vue de la consommation d'énergie. En revanche, l'utilisation de voitures à deux étages est un moyen très efficace de fournir des services aux heures de pointe et/ou sur des lignes très fréquentées.

49. Pour les trains de marchandises en particulier, l'augmentation de la longueur et/ou du poids maximum autorisé sur les lignes par le gestionnaire de l'infrastructure contribuerait grandement à la réduction de la consommation d'énergie. Il conviendrait d'évaluer soigneusement, en vue de les modifier, toutes les dispositions relatives à la longueur et/ou au poids maximum en tenant compte des paramètres de sécurité nécessaires.

50. Pour reprendre l'exemple précédent d'un voyage entre Genève et Paris, si le coefficient de remplissage des trains était supérieur à la moyenne actuelle, les émissions de CO₂ par passager diminueraient de 4 à 1,4 kilogramme et la consommation d'énergie serait réduite à 5,9 litres d'équivalents essence.

Aérodynamisme et poids

51. Comme la vitesse moyenne est faible, le profil aérodynamique du train n'a pas d'effet significatif sur la réduction de la consommation d'énergie des trains de marchandises, mais il est important pour les trains de passagers à grande vitesse. L'aérodynamisme des véhicules ferroviaires est un aspect sur lequel les gouvernements et les opérateurs ferroviaires n'ont qu'un faible contrôle, mais ils pourraient tout de même s'en préoccuper pour ce qui est du chargement des conteneurs. Ces éléments devraient également être pris en compte au moment de décider de la répartition du poids sur l'ensemble du train. Des propositions visant à améliorer l'aérodynamisme des pantographes, qui représentent 8 % de la traînée aérodynamique, et des wagons de marchandises ont été présentées, de même que des propositions concernant la résistance à l'air des bogies²⁵. En outre, le fait de couvrir les wagons de marchandises à toit ouvert peut réduire considérablement le frottement de l'air, mais les économies d'énergie qui en résultent sont mineures par rapport aux coûts liés à la couverture de l'ensemble des wagons.

²⁴ <https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/en/measures/train-drivers>.

²⁵ Technologies (railway-energy.org).

Répartition de la puissance (trains à plusieurs locomotives)

52. Dans le cas des trains de marchandises pour lesquels plusieurs locomotives sont nécessaires pour transporter une cargaison, le fait de ne pas placer toutes les locomotives à l'avant, mais de les répartir sur toute la longueur du train pourrait permettre de réduire la puissance et l'énergie nécessaires. Des études sur les meilleurs schémas de répartition devraient être par conséquent effectuées.

Fonctionnement à vide

53. Les efforts visant à réduire les trajets à vide, principalement pour les trains de marchandises, mais aussi pour les trains de voyageurs, auront également un effet positif sur la réduction du gaspillage d'énergie. Pour y remédier, certains exploitants ont adopté des solutions créatives. Par exemple, en Australie, le « train de l'infini » utilise l'énergie créée par le freinage à récupération lors des descentes en charge pour revenir à la gare d'origine.

Fonctionnement des systèmes auxiliaires

54. Un certain nombre de mesures peuvent être prises pour économiser l'énergie dans d'autres domaines. Par exemple, réduire la puissance nécessaire à un système de refroidissement en réglant la température un degré plus haut ou plus bas peut entraîner une réduction significative de la consommation d'énergie. Des économies analogues sont possibles pour le système de chauffage et d'éclairage. Pour l'éclairage, l'optimisation de la lumière naturelle peut avoir un effet, d'où l'importance d'un nettoyage approprié des fenêtres et des surfaces translucides. La fermeture de certaines parties d'une gare en dehors des heures de pointe peut également permettre de réaliser des économies d'énergie, de même que la réduction du temps de fonctionnement des éclairages décoratifs dans les gares.

Travaux d'entretien et de renouvellement des lignes ferroviaires

55. Les travaux d'entretien et de renouvellement des lignes ferroviaires devraient être planifiés de manière à ne pas rediriger les trains vers des itinéraires plus longs, ce qui permettrait à la fois de réaliser des économies d'énergie et de garantir la continuité de la qualité du service. Il serait plus facile de prévoir d'effectuer ces travaux pendant la nuit et la planification permettrait également de mieux répartir la consommation d'énergie sur l'ensemble de la journée, évitant ainsi de surcharger les lignes électriques.

Formation de la main-d'œuvre et communication d'informations aux clients

56. Les employés du secteur ferroviaire, en particulier les conducteurs de train, devraient être parties prenantes des projets d'économie d'énergie : les mesures qu'ils prennent pour économiser l'énergie sont cruciales, et ils pourraient fournir des suggestions fondées sur leur expérience et sur les moyens qu'ils mettent en œuvre pour conduire d'une manière peu énergivore. Des modules de formation devraient également être proposés aux employés pour les aider à comprendre les caractéristiques de la consommation d'énergie actuelle et à améliorer leurs pratiques.

VI. Étapes suivantes

57. Le présent document a mis en évidence un certain nombre de mesures qui peuvent être prises par les exploitants de chemins de fer et les gestionnaires d'infrastructure sur la base d'exemples de bonnes pratiques dans le secteur. Il n'a pas été possible, à ce stade, d'établir une estimation des économies d'énergie totales qui pourraient être réalisées dans la région grâce à la mise en œuvre de ces initiatives. Les informations présentées ici devraient être considérées comme une première approche pour une analyse plus détaillée des mesures d'économie d'énergie susceptibles d'être prises dans le secteur ferroviaire.

58. Sur la base de ce document de référence et d'une analyse préliminaire, le Groupe de travail pourrait envisager d'adresser un questionnaire plus détaillé aux États membres et aux responsables des chemins de fer, afin de recenser les mesures qu'ils prennent pour réduire la consommation d'énergie de leurs réseaux et de leurs exploitants. Une analyse plus détaillée pourrait alors être effectuée sur la base des réponses reçues.

59. Le Groupe de travail peut souhaiter envisager de demander au secrétariat de solliciter la collaboration d'organisations internationales partenaires pour l'élaboration de cette analyse, dans le but de formuler des recommandations clés sur la réduction de la consommation d'énergie dans l'ensemble du secteur. Dans un premier temps, les délégués peuvent souhaiter consulter la liste de contrôle relative aux économies d'énergie figurant en annexe du présent document.

Annexe

Liste de contrôle : économies d'énergie

Les investissements et les pratiques pouvant être envisagés par les chemins de fer nationaux sont résumés dans la liste de contrôle ci-après. Cette liste est destinée à servir de guide pour l'élaboration de nouvelles stratégies et la définition de nouveaux investissements en matière d'efficacité énergétique.

1. Rénovation de la flotte, du réseau ferroviaire et des gares :

- a) Remplacement et entretien du matériel roulant ancien ;
- b) Remplacement des locomotives diesel par des locomotives électriques, lorsque cela est possible, ou par des locomotives bi-modes ou multisystème ;
- c) Utilisation de locomotives équipées de systèmes de freinage à récupération ;
- d) Utilisation de locomotives équipées de systèmes anti-ralenti ;
- e) Utilisation de nouveaux véhicules de manœuvre ou de locomotives bi-modes économes en énergie dans les terminaux de fret ;
- f) Installation de technologies d'aide à la conduite ;
- g) Rénovation des équipements relatifs au confort des passagers, tels que l'éclairage et la climatisation ;
- h) Installation de capteurs, de minuteries et de technologies d'économie d'énergie ;
- i) Installation de dispositifs fonctionnant avec des énergies renouvelables ;
- j) Électrification des lignes et installation de lignes aériennes à haute tension.

2. Comportements permettant des économies d'énergie :

- a) Planification d'itinéraires prévoyant peu d'arrêts ;
 - b) Abaissement de la vitesse moyenne et maximale et réduction de la marche en roue libre ;
 - c) Augmentation du remplissage des trains afin de planifier moins de voyages ;
 - d) Prise en compte de l'aérodynamisme et du poids ;
 - e) Utilisation de la répartition optimale de la puissance pour les trains comportant plus d'une locomotive ;
 - f) Réduction du temps de travail dans les bureaux ;
 - g) Optimisation de l'utilisation des dispositifs auxiliaires dans les gares et les trains ;
 - h) Formation de la main-d'œuvre à consommer moins d'énergie ;
 - i) Communication d'informations et de suggestions aux clients et aux passagers pour qu'ils consomment moins d'énergie.
-