

Le rail ferraille face aux vagues de chaleur

TANIA MARTHA THOMAS • Chargée de recherche, Observatoire mondial de l'action climat, Climate Chance

Si le rail est un des modes de transport les moins émetteurs, il est aussi l'un des plus vulnérables au changement climatique. L'année 2022 et sa succession de vagues de chaleur dans le monde a mis les lignes ferroviaires sous tension, même si la question est étudiée depuis bien plus longtemps. Si des pistes d'adaptation existent, y compris celles fondées sur la nature, leur adoption n'a pas été rapide jusqu'à présent, les mesures étant davantage prises pour répondre aux crises à court terme que pour s'adapter à plus long terme.



PANORAMA DES DONNÉES

La cartographie de l'électrification des réseaux ferrés

Le train est l'un des moyens de transport de passagers les moins émetteurs de gaz à effet de serre (GES) : en moyenne, son intensité carbone se situe autour de 15 gCO₂e¹ par passager-kilomètre^a, moins d'un dixième de celle de grosses voitures ou de l'avion². Son efficacité est similaire pour le transport de marchandises. Alors qu'il représente approximativement 9 % du transport mondial de passagers et 7 % du fret mondial³, le train ne totalise que 2,2 % de la consommation finale d'énergie du secteur des transports en 2021⁴, et 1,5 % de ses émissions directes de CO₂⁵. En 2021, les émissions mondiales directes du transport ferroviaire étaient de 96,8 MtCO₂, en hausse par rapport à 2020 (89,91 MtCO₂, soit une augmentation de 7 %), mais bien en dessous du pic atteint en 2019 (104,22 MtCO₂)⁶. L'augmentation annuelle depuis 2019 des opérations ferroviaires au diesel étant inférieure à 1 %, et le rail électrique n'émettant pas directement de CO₂, il n'est pas prévu que ces émissions atteignent à nouveau le niveau de 2019⁷.

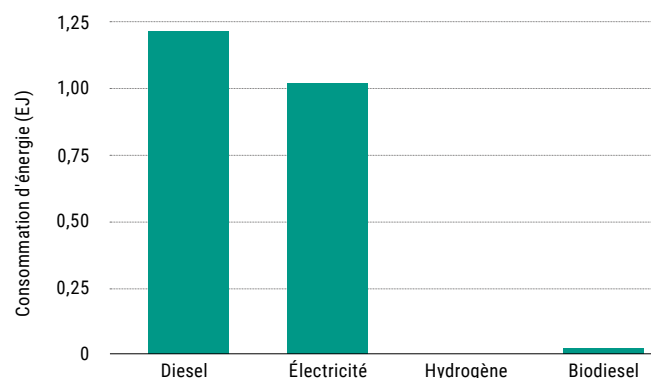
Face à des options limitées pour accroître les gains d'efficacité du matériel roulant, les stratégies de décarbonation des acteurs du secteur ferroviaire misent essentiellement sur l'électrification des lignes, une tendance qui a déjà connu des avancées ces dernières années – la part des voies ferrées électrifiées dans le monde est passée de 36,7 % en 2015 à 40,2 % en 2019⁸. Les taux d'électrification du rail pour le transport de passagers et de fret restent éloignés l'un de l'autre, le rail électrique représentant environ 80 % de l'activité de transport de passagers et environ la moitié des mouvements de fret.

De ce fait, la consommation finale d'énergie du transport ferroviaire en 2021 reste presque également répartie entre l'électricité et le diesel, le biodiesel ne représentant qu'une part minuscule, tandis que les développements des trains à pile à combustible (hydrogène) ne sont pas encore suffisamment significatifs⁹ (FIG. 1).

FIGURE 1

MIX ÉNERGÉTIQUE FINALE DU TRANSPORT FERROVIAIRE EN 2021

Source : Agence internationale de l'énergie, 2022



Des variations régionales et intrarégionales persistent toutefois dans les taux d'électrification ferroviaire. Si une part conséquente des réseaux européens est déjà électrifiée (plus de 60 % des lignes principales¹⁰), c'est en Europe occidentale que l'électrification est la plus élevée. Selon les données de la Commission européenne et du ministère allemand des transports et de l'infrastructure numérique, compilées par l'ONG Pro-Rail Alliance, la Suisse arrive en tête avec un taux d'électrification de 100 %, devant la Belgique avec 86 %. Les

a Le passager-kilomètre, qui correspond au transport d'un passager sur un kilomètre, est l'unité de référence pour mesurer un volume de transport de passagers. De même, la tonne-kilomètre correspond au transport d'une tonne de marchandise sur un kilomètre. Ces unités dépendent donc de l'empreinte carbone du moyen de transport utilisé ainsi que de son remplissage (en passagers ou en marchandises).

Pays-Bas, la Suède, l'Autriche, l'Italie, la Pologne et l'Espagne suivent, tandis que l'Allemagne se situe à 61 % – n'ayant augmenté son électrification ferroviaire que de 2 % entre 2009 et 2019¹¹, et la France à 58 % – ayant augmenté de 0,22 % depuis 2014 et de 4 % depuis 2019¹². La compagnie ferroviaire allemande Deutsche Bahn a annoncé en 2021 son objectif de neutralité climatique pour 2040, en l'avançant de dix ans par rapport à son objectif précédent. La société s'est également fixée pour objectif d'approvisionner ses usines, bureaux et gares à 100 % en énergie renouvelable en 2025. En 2021, elle a signé des accords d'achat d'énergie renouvelable avec Statkraft et RWE¹³. Pour sortir du diesel les « petites lignes » à faible trafic, la SNCF mise sur une stratégie dite d'« électrification frugale », qui s'appuie sur le développement des trains à batterie, et notamment pour des portions de voie qui seraient difficile à électrifier – comme a été fait avec le projet pilote de cette stratégie en déployant des trains à batteries sur le tronçon Aix-Marseille. Cette stratégie implique aussi une réflexion sur des besoins de chaque ligne, qu'elle soit plutôt parcourue par des passagers ou par du fret, et de choisir les options d'électrification en conséquence – caténaire ou autre¹⁴.

Dans toute l'Europe, des efforts sont déployés pour électrifier davantage de lignes ou développer des alternatives plus écologiques aux trains diesel. En Lituanie, ABB a remporté un contrat pour l'électrification de la ligne Vilnius-Klaipėda, dans le cadre d'un programme plus large visant à électrifier 39 % des lignes ferroviaires du pays (actuellement, seules 8 % sont électrifiées), et à assurer une meilleure interopérabilité avec le réseau européen¹⁵. Alstom et Avax vont travailler sur la modernisation de la ligne Thessalonique-Idoméni au nord de la Grèce, la ligne faisant partie du corridor paneuropéen X, qui relie Thessalonique à Budapest, en passant par la Macédoine du Nord, la Serbie et la Hongrie – un des principaux corridors de fret en Europe centrale et orientale¹⁶. La Hongrie mise sur les trains hybrides pour verdir son réseau¹⁷, et a récemment renforcé sa collaboration avec Alstom, avec la signature d'un accord de coopération stratégique, pour développer à la fois le secteur ferroviaire national et la production d'équipements dans les sites d'Alstom dans le pays¹⁸.

En parallèle de l'électrification qui avance, la crise énergétique en Europe a rajouté l'enjeu de sobriété aux priorités du secteur ferroviaire. Les opérateurs majeurs prennent des mesures pour réduire leur consommation d'énergie : la SNCF s'efforce de réduire la consommation d'énergie de ses trains en régulant leur vitesse, en utilisant une technologie de traction plus efficace, en coupant le moteur lors des arrêts et en réduisant la consommation d'énergie de ses bâtiments et de son chauffage¹⁹. La Deutsche Bahn a proposé aux employés une incitation à réduire la consommation d'énergie²⁰, tandis que les Chemins de fer fédéraux suisses (CFF) réduisent la vitesse des trains, la température à l'intérieur des trains et l'éclairage dans les gares²¹.

Aux États-Unis, où le réseau ferroviaire est largement utilisé pour le fret mais moins pour les passagers, le taux d'électrification est inférieur à 1 %²². Sa progression future et sa rentabilité restent incertaines²³, l'Association des chemins de fer américains affirmant que l'électrification caténaire du réseau est « irréaliste », tout en vantant les investissements dans les trains électriques à batterie²⁴. De l'autre côté du monde, en Asie, l'électrification bat son plein. En mars 2022, l'Inde avait électrifié près de 80 % de son réseau²⁵, tandis que le Pakistan et le Bangladesh modernisaient également leurs réseaux²⁶. L'Asie du Sud-Est a progressé sur les deux fronts de l'électrification et de la construction de lignes à grande vitesse, comme en témoignent le développement de la ligne Jakarta-Bandung en Indonésie (ouverture prévue en 2023) ou les travaux de construction de la ligne Bangkok-Nong Khai en Thaïlande²⁷.

Alors que l'électrification progresse, la source de l'électricité utilisée pour alimenter le train influe sans aucun doute sur l'empreinte carbone finale du transport ferroviaire, une préoccupation qui est prise en compte sur le continent africain²⁸ à mesure que de nouveaux projets ferroviaires voient le jour : au Sénégal, au Nigeria, au Kenya, en Guinée, et ailleurs. Si l'électrification ferroviaire sur le continent est actuellement de 15 %, de nouveaux projets sont en cours de développement, notamment ceux financés par l'initiative chinoise *Belt and Road*^b, ou en concurrence, par des investissements européens à travers l'initiative Global Gateway²⁹.



L'ŒIL DE L'OBSERVATOIRE

Adapter le transport ferroviaire au réchauffement climatique pour rester sur les rails

Bien que le transport ferroviaire ait été identifié comme étant le moins vulnérable aux risques de responsabilité et de transition^c en raison de sa part relativement faible d'émissions, la part modale du transport ferroviaire, tant pour les passagers que pour le fret, pourrait être affectée par l'augmentation du trafic dans les années à venir, au fur et à mesure que les mesures d'incitation actuelles se concrétiseront (comme celles qui font partie de la stratégie de mobilité intelligente et durable de l'UE, ou le Green Deal, pour exemple, ou même les politiques nationales et locales)^{30,31}. Dans ce contexte, les opérateurs ferroviaires devraient être mieux préparés à gérer ce trafic supplémentaire, étant donné qu'ils sont exposés à des risques physiques liés aux impacts du changement climatique.

b Voir Observatoire de l'action climat non-étatique (2021). [Bilan mondial de l'action climat par secteur](#). *Climate Chance*.

c Selon la [proposition](#) de Mark Carney, ancien gouverneur de la Banque d'Angleterre, les risques dont font face les entreprises sont habituellement divisés en trois catégories : les « risques physiques », résultant des effets économiques incertains du changement climatique sur notre environnement ; les « risques de transition », résultant des effets de la mise en place d'un modèle économique bas carbone sur les acteurs économiques ; et les « risques de responsabilité », résultant des poursuites en justice lancées contre les acteurs lorsqu'ils sont tenus responsables d'inaction climatique.

Peu de flexibilité et haute vulnérabilité

Le plus grand défi des chemins de fer face au changement climatique provient de la faible flexibilité de leurs infrastructures et de leurs opérations, qui sont très vulnérables aux extrêmes de température et aux phénomènes météorologiques intenses. La panne d'un seul élément peut entraîner des coûts de remplacement élevés et des interruptions de service prolongées^{32,33}. Les températures et les précipitations, tantôt élevées tantôt basses, ainsi que les tempêtes peuvent avoir des effets sur diverses infrastructures ferroviaires, y compris les voies, la signalisation, le câblage caténaire, les structures de la voie (comme les ponts, les tunnels, les viaducs, etc.) et les structures en bordure de la voie (comme les remblais, les déblais, le drainage et la végétation) (FIG. 2).

Les effets des températures élevées peuvent, par exemple, se faire sentir directement sur les voies, par la dilatation thermique et le flambage des rails, ou sur les équipements électriques, par l'affaissement des câbles aériens. Dans la plupart des pays, les rails sont conçus pour fonctionner dans une fourchette de 45 °C, selon les conditions locales. En Grande-Bretagne, par exemple, les rails sont soumis à des tests de résistance à des températures allant jusqu'à 27 °C – une limite qui serait sans doute plus élevée dans un climat plus chaud – mais au-delà de laquelle ils restent exposés³⁴. Les incendies de forêt peuvent également affecter les rails ou les bloquer lorsque la végétation autour des rails brûle (feux de talus). Les vents violents peuvent entraîner la chute de lignes électriques, d'arbres ou d'objets sur les voies, etc. Les fortes et faibles précipitations peuvent affecter les infrastructures environnantes, comme les pentes et les talus, par des glissements de terrain et des inondations, ou causer des dégâts d'eau sur les équipements.

Les exemples les plus récents de ces effets ont eu lieu en 2022, lorsque la canicule a lourdement entravé les infrastructures et les itinéraires des trains dans toute l'Europe. En France, cet été dernier, des problèmes de caténaire et de feux de talus ont

entraîné une coupure du service en Bretagne, et des coupures d'électricité dues à la canicule ont entraîné une suspension du trafic dans les Hauts-de-France. Calculant la température des rails, la SNCF, et la RATP à Paris, ont imposé des limitations de vitesse beaucoup plus basses aux trains et métros qu'elles exploitent, en raison du risque de déformation des rails dû à la chaleur³⁵. De même, au Royaume-Uni, la vitesse des trains a été limitée dans le cadre d'une alerte rouge à la chaleur extrême³⁶, deux fermetures de lignes principales ont eu lieu, des dommages ont été causés aux câbles aériens et des incendies se sont également propagés aux voies³⁷.

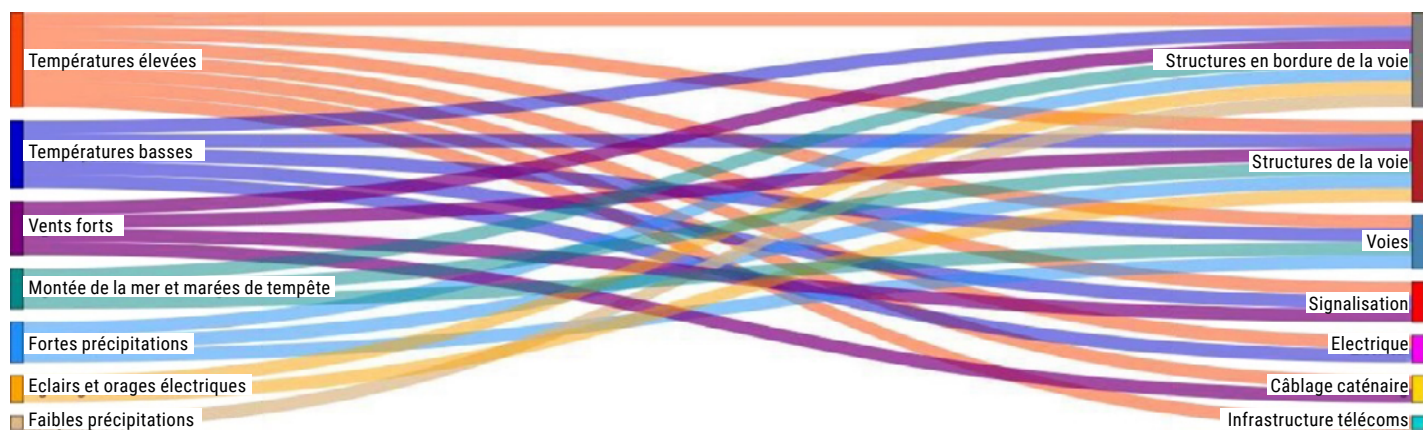
L'opérateur britannique Network Rail a rapporté la nécessité de reconstruire les infrastructures de remblai après des glissements de terrain, et la pression croissante sur les systèmes de drainage³⁸. Ce problème est particulièrement important en Europe et en Amérique du Nord, où de nombreuses infrastructures ferroviaires datent parfois d'un siècle et demi, et sont donc encore moins adaptées aux changements climatiques^{39,40}. En 2018, un glissement de terrain a provoqué un déraillement en Catalogne, entraînant un mort et plusieurs blessés⁴¹. En 2020, les fortes pluies ont entraîné un déraillement en Écosse, le premier accident ferroviaire mortel au Royaume-Uni depuis plus de dix ans. Les inondations de 2021 en Belgique et en Allemagne ont causé 1,3 milliard d'euros de dommages aux chemins de fer, par l'endommagement de passages à niveau, de ponts et de mâts de signalisation et d'électricité⁴².

Les coûts financiers de ces impacts augmentent chaque année, faisant passer les impacts du changement climatique de « désagréments » à « menaces sérieuses affectant chaque aspect de la structure de coûts d'un opérateur ferroviaire »⁴³. En 2021, les incendies de Lava et Dixie aux États-Unis ont causé de graves dommages aux infrastructures du géant du fret Union Pacific, de l'ordre de 100 millions de dollars. À cela s'ajoute le chaos qui règne sur le réseau, car les trains ont dû être réacheminés et ont emprunté des détours qui ont quadruplé la durée des trajets et exigé la mobilisation de main-d'œuvre et de ressources supplémentaires⁴⁴.

FIGURE 2

RISQUES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES AFFECTANT LES INFRASTRUCTURES FERROVIAIRES

Source : Blackwood, Renaud & Gillespie, 2022



Dans le monde entier, les opérateurs ferroviaires doivent également adapter leurs opérations aux impacts climatiques, qu'il s'agisse de réacheminer ou de reprogrammer les trains, ou de réexaminer les priorités du transport. Dans le nord de l'Inde, la canicule de l'été 2022 a contraint la compagnie ferroviaire indienne à annuler plus de 1 100 trains de passagers et de courrier pour laisser la place à des trains transportant du charbon vers les centrales électriques du pays⁴⁵. Si les horaires sont modifiés en raison des retards, les opérateurs demandent également aux passagers de limiter leurs déplacements en train⁴⁶, ou de se préparer à des températures plus élevées⁴⁷.

Les solutions « grises » et « vertes » pour adapter les infrastructures

Les solutions « grises » ou « dures », dans le contexte de l'adaptation (principalement l'adaptation côtière jusqu'à présent), font référence aux solutions d'ingénierie, qui font appel à des constructions artificielles. En revanche, les solutions « vertes » ou « douces » font référence à l'utilisation de la nature, par des interventions à plus petite échelle, et peuvent même compléter les solutions grises^{48,49}. Dans le contexte ferroviaire, la plupart des solutions adaptées jusqu'à présent ont été des solutions grises, tandis que l'utilisation de solutions vertes a été très limitée, avec très peu d'études à leur sujet⁵⁰.

En cas de températures élevées affectant directement les rails, un exemple de solution couramment adoptée consiste à peindre les rails en blanc dans les zones où ils sont directement exposés au soleil et risquent donc de se dilater – comme cela a été fait en Allemagne, en Italie⁵¹, en Suisse⁵² et au Royaume-Uni⁵³, entre autres. En même temps, l'efficacité de cette méthode fait débat, avec des appels à une meilleure anticipation et préparation à la dilatation et au flambage des rails en utilisant des matériaux composites, ou des joints de dilatation des rails laissant suffisamment d'espace^{54,55}. Network Rail a également eu recours au béton pour poser les rails plutôt qu'aux traditionnelles traverses ou pierres, le béton pouvant résister à des forces plus importantes⁵⁶.

Les câbles électriques aériens peuvent être adaptés à des températures plus élevées en les installant avec des poids ou des ressorts pour compenser l'affaissement ou, dans le cas de câbles plus anciens, en ajustant leur hauteur et leur tension⁵⁷. Si le ralentissement des trains est également une option, il comporte des risques de perturbation du trafic et de pertes potentielles pour l'opérateur. En général, dans le cas d'infrastructures comme les ponts et les viaducs, la protection la plus habituelle contre la surchauffe est l'utilisation de « *sprinklers* » – des systèmes d'arrosage automatique à eau – ou le remplacement des infrastructures existantes par des infrastructures faites de matériaux résistant à la chaleur⁵⁸.

En réponse aux inondations et à l'élévation du niveau de la mer, les options grises incluent l'élévation des gares, l'installation de digues et de pompes, et la stabilisation des flancs de collines et des pentes. Bien que toutes ces options aient

été mises en pratique à des échelles variables, un problème commun souvent rencontré par les réseaux ferroviaires plus anciens est lié aux contraintes d'utilisation des sols, car les terrains entourant les voies ne sont souvent pas possédés par les opérateurs, ou très peu – ce qui conduit par exemple à des pentes extrêmement raides le long des lignes ferroviaires. Cela reste un facteur limitant qui empêche de nombreux opérateurs d'agir, tout comme l'âge global du réseau ferroviaire^{59,60}.

C'est l'un des avantages que les solutions vertes pourraient avoir, étant relativement rentables et nécessitant des interventions plus petites. En outre, alors que les infrastructures grises se dégradent avec le temps, la végétation se renforce au fur et à mesure que les arbres et les plantes prennent racine⁶¹. Les corridors verts et la végétation pour l'ombrage ont été identifiés comme des moyens de réduire l'exposition directe au soleil, bien que la sélection d'espèces spécifiques et la gestion de la végétation soient cruciales pour garantir que les arbres ou les plantes ne deviennent pas une entrave ou ne bloquent pas les rails. Les plantations de brise-vent, la stabilisation biotechnique et la bio-ingénierie^d des talus et des pentes sont également des solutions potentielles pour « verdir » les infrastructures grises⁶².

Bien que limités, il existe des exemples d'utilisation de tels mécanismes, comme la politique de biodiversité positive nette du programme de modernisation et d'extension de la Thameslink, qui a impliqué la construction de remblais de part et d'autre de la voie ferrée à Londres, en plantant des espèces de fleurs sauvages indigènes pour réduire le ruissellement⁶³. La ligne Adelaide-Seaford en Australie a réalisé un projet de verdissement du corridor, en plantant des arbres le long de la ligne, mais ceux-ci ont finalement été déracinés pour l'électrification de la ligne – mettant en évidence les conflits potentiels entre les stratégies d'atténuation et d'adaptation dans le secteur. Bien que d'autres exemples aient été proposés et que des initiatives de plantation de végétation aient été menées, il n'y a pas suffisamment d'informations sur les avantages de ces initiatives en termes d'adaptation⁶⁴.

L'adaptation spécifique à la région est également à prendre en compte, car les chemins de fer sont confrontés à des défis différents selon les zones géographiques⁶⁵. Par exemple, en Égypte, les tempêtes de sable provoquent des problèmes sur les lignes ferroviaires, le sable s'accumulant et se déposant sur les voies. La société Egyptian National Railways, dès 1999, étudie la distribution du vent et la topologie pour apporter des modifications aérodynamiques aux pentes des remblais afin de protéger la ligne de fret Abou Tartour – Qena⁶⁶.

Dans plusieurs projets de pays émergents, l'adaptation est intégrée dès le début des nouveaux projets ferroviaires. En effet, l'intégration de l'adaptation comme un critère dès la phase de conception est également moins coûteux⁶⁷. En Inde, le projet de développement des *Dedicated Freight Corridor* (corridors dédiés au fret) prend des mesures d'adaptation

^d La bio-ingénierie et la stabilisation biotechnique des pentes comprennent l'utilisation de la végétation afin de maintenir la stabilité et de réduire le risque d'érosion et de ruissellement, au lieu d'utiliser des gabions ou des clous de terre, par exemple.

proactives, contre le brouillard (communication avancée entre les signaux de voie et la cabine du train), les variations de température (définition de seuils, développement de systèmes d'alerte précoce et de capteurs sur les rails), et les inondations (définition de seuils et intégration de provisions climatiques dans les normes de construction)⁶⁸. En Chine, la Railway Design Corporation met au point des mesures permettant aux lignes à grande vitesse de continuer à fonctionner dans des conditions de froid extrême, telles que des « remblais de gel-dégel », des matériaux antigel pour les ponts et autres ouvrages de génie civil, des interrupteurs pour faire fondre la glace et la neige, etc. En utilisant ces technologies, 2 659 km de rails avaient déjà été construits en 2017, et 2 572 km supplémentaires étaient en cours de construction en cette période⁶⁹. En 2021, le pays a testé avec succès le train à grande vitesse Fuxing, capable de résister à des blizzards et à des températures allant jusqu'à -40 °C⁷⁰.

Adaptation au niveau institutionnel : une question d'appropriation des enjeux

Au niveau transnational, notamment en Europe, plusieurs initiatives ont été lancées pour étudier l'impact des conditions météorologiques extrêmes et du changement climatique sur le transport ferroviaire et les infrastructures connexes. En 2009, l'Union internationale des chemins de fer (UIC) a lancé le projet « Adaptation de l'infrastructure ferroviaire au changement climatique » (*Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change*, ARISCC⁷¹), dans le but d'instaurer une coopération entre les secteurs et les domaines professionnels, les météorologues et les climatologues travaillant avec les experts ferroviaires pour améliorer la préparation⁷². Les connaissances et les cas d'étude issus du programme ont ensuite été mis à disposition sur le site web dédié. L'UIC dispose également d'un document cadre – RAIL ADAPT – pour aider compagnies ferroviaires à s'adapter au changement climatique et soutenir les engagements nationaux en matière de climat⁷³.

Diverses initiatives ont également été lancées au niveau européen, comme celles financées par la Commission européenne, telles que les programmes FP7 EWENT, FP7 WEATHER, FP7 SMART RAIL, MOWE-IT, ou le projet Horizon2020 Destination RAIL, qui ont toutes produit des résultats et des recommandations sur des sujets tels que les impacts, les conséquences et les coûts des conditions météorologiques extrêmes sur le rail, la modélisation des risques et les meilleures pratiques pour une gestion efficace de ces infrastructures et de leur maintenance⁷⁴. Des initiatives de recherche existent également au niveau national, souvent menées par les gouvernements en partenariat avec les opérateurs ferroviaires et les parties prenantes concernées – comme le projet TRaCCA (*Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation*) au Royaume-Uni⁷⁵. En Espagne, une initiative gouvernementale⁷⁶ travaillant avec tous les principaux acteurs du transport (y compris Renfe, la compagnie ferroviaire nationale) a étudié la vulnérabilité des infrastructures au changement climatique, afin de comprendre les besoins d'adaptation.

En s'appuyant sur ces connaissances et en travaillant dans des cadres institutionnels nationaux d'adaptation, les opérateurs ferroviaires ont adopté diverses stratégies, s'appro-

priant à des degrés divers les actions d'adaptation. Aux Etats-Unis, plusieurs opérateurs travaillent dans le cadre des programmes de l'administration fédérale des chemins de fer pour renforcer la résilience du secteur⁷⁷. La SNCF effectue des inspections annuelles afin d'évaluer les mesures d'adaptation chaque été et travaille actuellement sur sa feuille de route d'adaptation dans le cadre du plan national d'adaptation⁷⁸. Au Canada, dans le cadre de l'élaboration de la première stratégie nationale d'adaptation, le Programme d'adaptation aux changements climatiques dans le secteur ferroviaire fournira jusqu'à 2,2 millions de dollars en financement de contribution aux chemins de fer canadiens pour partager les coûts de la recherche sur l'amélioration de sa résilience⁷⁹. Network Rail, sur la base des conclusions de TRaCCA et de ses propres plans de résilience aux intempéries et d'adaptation du rail au changement climatique (*Weather Resilience and Climate Change Adaptation plans*, WRCCA), travaille sur son réseau^{80,81}. Réagissant à la canicule de 2022, Network Rail a aussi lancé son « taskforce » sur la résilience, composé d'experts indépendants⁸².

Ainsi, alors que la plupart des opérateurs ferroviaires, nationalisés ou non, ont mis en place une stratégie d'adaptation au changement climatique, l'articulation de ces stratégies varie, allant d'actions dispersées ou d'une adoption plus large de stratégies nationales, à des stratégies détaillées et documentées des opérateurs. Parmi les facteurs qui influencent l'efficacité des stratégies d'adaptation sont les valeurs organisationnelles des opérateurs, les connaissances des vulnérabilités au changement climatique et l'intégration de ces connaissances dans les opérations quotidiennes, et la prise en compte simultanée d'actions d'adaptation et d'atténuation⁸³.



GRANDS ENSEIGNEMENTS

Le transport ferroviaire est actuellement l'un des modes de transport relativement plus écologiques, tant pour le fret que pour les passagers, et il est en passe de le devenir davantage au fur et à mesure que l'électrification ferroviaire progresse – bien qu'à des rythmes variables selon les régions, et toujours à relativiser selon la composition du mix électrique. Cependant, alors que les effets du changement climatique commencent à se faire sentir, le secteur du rail se trouve vulnérable aux interruptions coûteuses et aux dommages causés aux infrastructures. Alors que des solutions « grises » à court terme sont adoptées en réponses immédiates aux crises, des opérateurs ferroviaires ont déjà entamé des réflexions de plus long terme visant par exemple l'intégration d'options plus « vertes » et fondées sur la nature. L'intégration des critères d'adaptation dans la conception des projets avant leur lancement fait son apparition dans les pays en développement. Si la production de connaissances sur l'adaptation du secteur du transport ferroviaire progresse, la mise en œuvre de ces recommandations est ralentie par plusieurs obstacles, notamment les questions de propriété foncière ou d'appropriation des enjeux de l'adaptation dans les cadres institutionnels nationaux.

RÉFÉRENCES

RETOUR PAGE PRÉCÉDENTE

- 1 AIE, UIC (2017). [Railway Handbook 2017](#). Agence internationale de l'énergie, Union Internationale des Chemins de fer
- 2 SLOCAT (2021). [Tracking Trends in a Time of Change : The Need for Radical Action Towards Sustainable Transport Decarbonisation](#). Transport and Climate Change Global Status Report – 2nd edition. SLOCAT.
- 3 AIE (2019). [The Future of Rail](#). Agence internationale de l'énergie.
- 4 Enerdata (2021). Global Energy & CO2 data. Enderdata.
- 5 Ibid.
- 6 Ibid.
- 7 AIE (2022). [Rail](#). Agence Internationale de l'Energie.
- 8 SLOCAT (2021). Tracking Trends in a Time of Change..., op. cit.
- 9 AIE (2022). Rail, op. cit.
- 10 Commission européenne (2017). [Electrification of the Transport System : Studies and Reports](#). Commission européenne.
- 11 Allianz pro Schiene (25/10/2021). [Deutschland fällt bei E-Mobilität auf Gleisen zurück](#). Allianz pro Schiene.
- 12 DataLab (2021). [Chiffres clés du transport – Edition 2021](#). Ministère de la Transition écologique.
- 13 Meza, E. (17/06/2021). [German railway accelerates transformation towards climate neutrality](#). Clean Energy Wire.
- 14 SNCF (02/06/2022). [L'électrification frugale pour décarboner les petites lignes](#). SNCF.
- 15 Artymiuk, S. (21/10/2022). [Vilnius-Klaipeda electrification contract signed](#). International Rail Journal.
- 16 Papatolios, N. (17/03/2022). [Alstom undertakes railway infrastructure upgrades in Greece](#). RailFreight.com
- 17 Zasiadko, M. (15/05/2020). [Hungarian Railways focuses on hybrid trains](#). RailTech.com
- 18 Robinson, E. (18/10/2022). [Alstom sign Strategic Cooperation Agreement with the Government of Hungary](#). Global Railway Review.
- 19 SNCF (30/09/2022). [Notre engagement au service de la sobriété énergétique](#). SNCF.
- 20 DW (08/02/2022). [Deutsche Bahn offers staff bonus to save energy](#). Deutsche Welle.
- 21 Augusteijn, N. & Steffers, K. (21/10/2022). [SBB taps the brakes in bid to save energy](#). RailTech.com
- 22 Nunno, R. (30/05/2018). [Electrification of U.S. Railways : Pie in the Sky, or Realistic Goal?](#) Environmental and Energy Study Institute.
- 23 Hoecker, J. et al (2022). [Rail Electrification in North America : Benefits and Barriers](#). Rail Electrification Council.
- 24 AAR (2021). [Freight Railroads and Climate Change](#). Association of American Railroads.
- 25 Central Organization for Railway Electrification (2022). [Home](#). Indian Railways.
- 26 Raina, A. et al (2022). [Railways in Developing Countries : A Global Review](#). Mobility and Transport Connectivity Series, Transport Global Practice. World Bank.
- 27 Clark, J. (18/10/2022). [Southeast Asia Railways Report – 2022 edition](#). Future Southeast Asia.
- 28 Filou, E. (06/07/2022) [How can Africa's under-developed railway network become one of the most modern in the world?](#) Electric & Hybrid Rail Technology.
- 29 Van Gaal, W. (14/04/2022). [Scepticism in Africa about the EU's green connectivity plan](#). EUObserver.
- 30 Chapuis, R., Delporte, T., & Lotz, C. (2022). [Boosting passenger preference for rail](#). McKinsey.
- 31 Chapuis, R. et al. (2022). [Bold moves to boost European rail freight](#). McKinsey.
- 32 Palin, E. J., Oslakovic, I. S., Gavin, K., Quinn, A. (2021). [Implications of climate change for railway infrastructure](#). WIREs Climate Change, vol. 12 (5).
- 33 Blackwood, L., Renaud, F. G., Gillespie, S. (2022). [Nature-based solutions as climate change adaptation measures for rail infrastructure](#). Nature-Based Solutions, vol. 2
- 34 Topham, G. (19/07/2022). [Why do Britain's roads melt and its rails buckle in heat?](#) The Guardian.
- 35 Slavicek, M. (23/07/2022). [Comment la canicule malmène les infrastructures ferroviaires et oblige les trains à rouler au ralenti](#). Le Monde.
- 36 Austin, K. & Race, M. (18/07/2022). [Train speeds limited over track buckling heatwave fears](#). BBC.
- 37 Topham, G. (20/07/2022). [Britain's rail services severely disrupted as heatwave damage is repaired](#). The Guardian.
- 38 Network Rail (28/01/2022). [Climate change and resilience report outlines future rail challenges](#). Network Rail.
- 39 Palin, E.J., et al (2021). Implications of climate change; op. cit.
- 40 Campbell, L. (08/04/2022). [Climate Change Poses a Huge Threat to Railroads. Environmental Engineers Have Ideas for How to Combat That](#). Inside Climate News.
- 41 MOMIT (18/12/2019). [December 19, 2018. Multi-scale Observation and Monitoring of Railway Infrastructure Threats](#).
- 42 Georgiadis, P. & Plimmer, G. (27/12/2021). [Climate change's challenge to UK's ageing railways](#). Financial Times.
- 43 Chavez, S. (16/09/2021). [Wildfires and 'violent' weather leave railroad giant facing \\$100m bill](#). Financial Times.
- 44 Ibid.
- 45 Sharma, M. (05/05/2022). [Power crisis : Train cancellations continue to facilitate movement of coal rakes](#). India Today.
- 46 Topham, G. (15/07/2022). [Rail passengers urged to avoid train travel in extreme UK heatwave](#). The Guardian.
- 47 Fleitour, G. (14/06/2022). [Face aux fortes chaleurs et risque de canicule, que prévoit la SNCF pour vos trajets en train ?](#) Ouest France.
- 48 Hausmann, H. (18/08/2019). [Soft vs Hard Engineering for Coastal Defense Adaptation](#). Climate Institute.
- 49 Blackwood, L. et al. (2022). Nature-based solutions as climate change..., op. cit.
- 50 Ibid.
- 51 Railway Technology (04/12/2019). [Cool runnings : is white paint the perfect solution to overheated tracks?](#) Railway Technology.
- 52 SWI (18/07/2018). [Swiss railway field tests white paint to keep tracks from buckling](#). Swissinfo.ch
- 53 Network Rail (n.d.). [Hot weather and the railway](#). Network Rail.
- 54 Le Figaro, AFP (22/09/2022). [Cadence lente, peinture blanche... Comment le train d'adapte au réchauffement climatique](#). Le Figaro.
- 55 Howe, B. (2017). [Railway equipment – Adapting to climate change \[slides\]](#). UIC.
- 56 Network Rail (n.d.). Hot weather and the railway, op. cit.
- 57 Ibid.
- 58 Blackwood, L. et al. (2022). Nature-based solutions as climate change..., op. cit.
- 59 Campbell, L. (08/04/2022). Climate Change Poses..., op. cit.
- 60 Palin, E.J., et al (2021). Implications of climate change; op. cit.
- 61 Campbell, L. (08/04/2022). Climate Change Poses..., op. cit.
- 62 Blackwood, L. et al. (2022). Nature-based solutions as climate change..., op. cit.
- 63 Oppla (2021). [Thameslink Programme : Bermondsey Dive Under](#). Oppla.
- 64 Campbell, L. (08/04/2022). Climate Change Poses..., op. cit.
- 65 Wang, T. et al. (2020). [Impact analysis of climate change on rail systems for adaptation planning : A UK case study](#). Transportation Research part D : Transport and Environment, vol 83.
- 66 UIC (2017). [Rail Adapt : Adapting the railway for the future](#). Union Internationale de chemins de fer.
- 67 Dépoues, V. (24/07/2022). [Pourra-t-on faire rouler les trains à la prochaine canicule ?](#) Libération.
- 68 Goetsch, H., Harinath, A.S. & Lawrence, M. (23/07/2019). [How do you build future-proof](#)



[railways in a changing climate?](#) *World Bank Blogs*.

69 UIC (2017). *Rail Adapt : Adapting...*, *op. cit.*

70 SCIO (17/08/2021). [Cold-capable Fuxing bullet train tests new line](#). *State Council Information Office, People's Republic of China*.

71 ARISCC (n.d.). [Home. Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change](#).

72 Climate ADAPT (n.d.). [Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change](#). *Climate ADAPT*.

73 UIC (2017). *Rail Adapt: Adapting...*, *op. cit.*

74 Palin, E. J. et al (2021). *Implications of climate change...*, *op. cit.*

75 ARUP (n.d.). [Increasing knowledge of the impacts of climate change](#).

76 CEDEX. (2013). [Working group for the analysis of the climate change adaptation needs of the core network of transport infrastructure in Spain. Final report](#). *CEDEX*.

77 FRA (03/10/2022). [Rail Climate Considerations](#). *Federal Railroad Administration*.

78 L'Express (07/08/2022). [Comment la SNCF s'adapte-t-elle aux vagues de chaleur et à la canicule ?](#) *L'Express*.

79 Transport Canada (05/07/2022). [Minister of Transport announces new measures to address extreme weather and climate change impacts on rail infrastructure](#). *Government of Canada*.

80 Dépoues, V. (2017). [Organizational uptake of scientific information about climate change by infrastructure managers : the case of adaptation of the French railway company](#). *Climatic Change*, Springer Verlag.

81 Network Rail (n.d.). [Climate change adaptation](#). *Network Rail*.

82 Network Rail. (20/07/2022). [Network Rail launches resilience taskforce in wake of record-breaking heatwave](#). *Network Rail*.

83 Palin, E.J., et al (2021). *Implications of climate change*; *op. cit.*