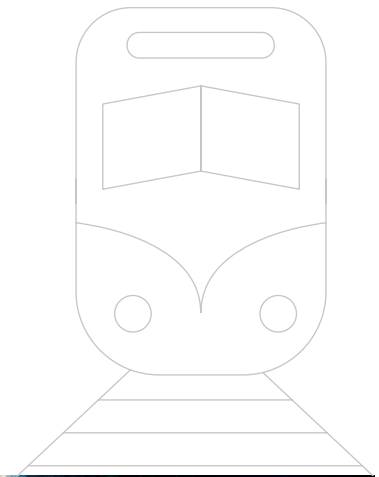



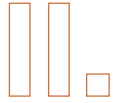

ÉTUDE D'IMPACT

des risques liés au changement climatique
sur l'exploitation ferroviaire
- précurseurs, méthodes et premiers résultats





SOMMAIRE

Table des matières	P4
Glossaire	P5
Introduction	P6
 Anticiper l'évolution du système ferroviaire face aux risques liés au changement climatique - la nécessité d'adaptation	P14
 Les initiatives des spécialistes du secteur ferroviaire	P28
 La synthèse des risques	P42
Conclusion	P55
Annexes	P56
Remerciements	P62

Glossaire	5
Introduction	6
I • Anticiper l'évolution du système ferroviaire face aux risques liés au changement climatique - la nécessité d'adaptation.....	14
1 • L'articulation de données climatiques disponibles permettant d'initier une analyse de risque sur l'exploitation ferroviaire	16
1a • Les études sur l'évolution du climat mondial	16
1b • Les organismes spécialisés dans les études climatiques françaises.....	18
2 • Les aléas climatiques identifiés à fort enjeu sur le secteur ferroviaire	21
2a • Les aléas climatiques identifiés comme potentiellement impactants sur le système ferroviaire	21
2b • L'identification des tendances climatiques à court terme.....	24
2c • L'identification des tendances climatiques à long terme	24
3 • Les méthodes d'étude et de mise en cohérence des données disponibles.....	25
3a • Les étapes préalables à l'analyse de risque.....	25
3b • L'analyse de risque.....	27
II • Les initiatives des spécialistes du secteur ferroviaire	28
1 • Les initiatives de Gestionnaires d'Infrastructure	30
1a • La ligne LGV Sud Europe Atlantique.....	30
1b • La ligne du Contournement de Nîmes et Montpellier.....	32
1c • Le gestionnaire historique français	33
2 • Les initiatives d'Entreprises Ferroviaires.....	35
2a • Le transport de marchandises : FRET SNCF.....	35
2b • Le transport de voyageurs : RENFE.....	36
3 • Les initiatives de l'EPSF.....	37
4 • Les témoignages et initiatives d'autres pays européens	38
4a • L'enquête auprès du NSA Network	38
4b • L'étude menée par Network Rail.....	41
III • La synthèse des risques	42
1 • Les risques redoutables identifiés et leurs conséquences	43
2 • Les recommandations	54
Conclusion	55
ANNEXE 1 : définitions de concepts	56
ANNEXE 2 : bibliographie.....	58
ANNEXE 3 : sources recherches ANS	60
Remerciements	62

ANS	autorité nationale de sécurité
BEA-TT	Bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CERFACS	Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique
CNRM	Centre national de recherches météorologiques
COP	Conférence des Parties
DRIAS	Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnement
EF	entreprise ferroviaire
EPSF	Établissement public de sécurité ferroviaire
ERA	Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer
GES	Gaz à effet de serre
GI	gestionnaire d'infrastructure
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace
LISEA	GI en partenariat public-privé de la ligne LGV Sud Europe Atlantique
LTV	limitation temporaire de vitesse
OC'VIA	GI en partenariat public-privé de la ligne LGV du contournement de Nîmes - Montpellier
ONU	Organisation des Nations unies
SFN	Système ferré national
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
TER	Train express régional
TGV	Train à grande vitesse

INTRODUCTION



“

Depuis quarante ans, le sujet du changement climatique préoccupe les plus grandes instances politiques et scientifiques.

”

► **Les initiatives et discussions autour du climat ont débuté en 1979 à Genève par une conférence mondiale de l'Organisation des Nations unies (ONU).** Treize ans plus tard, en 1992, naît la convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC). En 1997, le protocole de Kyoto fixant un premier objectif mondial de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est signé par les membres de la Conférence des Parties (COP). Viennent ensuite, en 2016, les Accords de Paris qui fixent un nouvel objectif ambitieux : maintenir le réchauffement climatique mondial en deçà de 2 °C.

► **En parallèle de ces instances politiques de niveau mondial, la communauté scientifique tente de démontrer depuis plus de quarante ans les effets du réchauffement climatique.**

Le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a pour mission de dresser un bilan des connaissances sur l'évolution du climat mondial, ses impacts, les moyens de les atténuer et de s'y adapter. Dans ses différents travaux, le GIEC a notamment dressé un bilan des risques à moyen et long terme, il prévoit :

- l'aggravation de phénomènes climatiques actuels : en termes de fréquence, d'intensité, de répartition géographique et de durée des événements météorologiques extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresses) ;
- l'extinction de 20 à 30 % des espèces animales et végétales ;
- la montée des eaux : d'ici 2050, 1 milliard de personnes vivant à une altitude inférieure à 10 m pourraient être affectées par une hausse de 15 mm du niveau de la mer par an⁽¹⁾ ;
- la perte de rendements agricoles provoquant le basculement de plus de 100 millions de personnes dans l'extrême pauvreté, près de 600 millions de personnes pourraient souffrir de malnutrition et 140 millions de personnes seraient amenées à migrer.

► **Les impacts du changement climatique peuvent être très différents d'une région à une autre, mais ils concernent toute la planète.**

En s'intéressant de plus près aux effets du changement climatique, la France est le deuxième pays d'Europe le plus concerné par les catastrophes naturelles. Depuis 1950, pratiquement 120 événements naturels très graves ont été recensés. Les événements extrêmes se caractérisent par une faible fréquence, mais une forte gravité. De nombreux aléas naturels menacent le territoire français : des inondations, des submersions marines, l'érosion côtière, les tempêtes, les cyclones, mais aussi les mouvements de terrain, les feux de forêts, les avalanches et les séismes. Leur caractère imprévisible ne permet pas d'anticiper de façon pérenne les conséquences plus ou moins dévastatrices pour l'ensemble de la société.

► **En France, ces vingt dernières années, la fréquence des événements naturels a quadruplé passant d'un événement exceptionnel par an entre 1950 et 1996 à près de quatre événements par an entre 1997 et 2017.**

Les deux tiers de ces événements sont causés par des inondations. Ce sont 17,1 millions d'habitants qui sont exposés aux différentes conséquences des inondations. Près d'1,4 million d'habitants sont exposés au risque de submersion marine. Plus de 9 millions d'emplois sont exposés aux débordements de cours d'eau et plus de 850 000 emplois sont exposés aux submersions marines⁽²⁾. La gravité de ces événements est d'autant plus forte en considérant les enjeux des territoires (population, activités économiques, patrimoines, etc.)⁽³⁾.

(1) Selon le scénario le plus pessimiste évalué par le GIEC. Les différents scénarios sont exposés dans la suite du rapport.

(2) Rida, E. (2023). Généralités sur le risque inondation en France. Ministères Écologie Énergie Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/generalites-sur-risque-inondation-en-france>

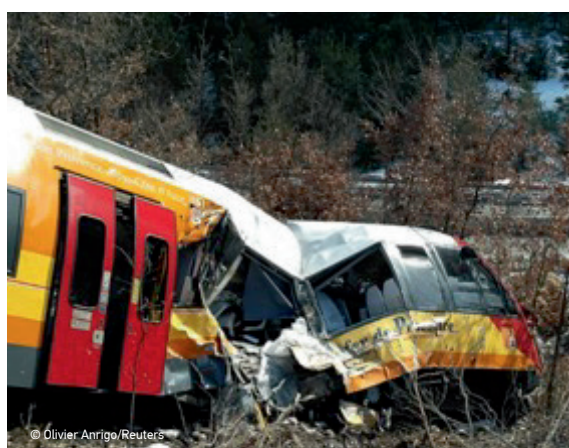
(3) Notre-environnement. (2023, 17 avril). Les risques naturels majeurs en France – Notre-environnement. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/risques/les-mouvements-de-terrain-et-les-erosions-cotieres-ressources/article/les-risques-naturels-majeurs-en-france>

INTRODUCTION

► Le secteur ferroviaire, comme tout autre secteur d'activité, n'est pas épargné par la nécessité de s'adapter au changement climatique. L'adaptation est un processus d'ajustement face au climat et à ses effets. Cette stratégie de l'adaptation vise à limiter les dommages pour maintenir une qualité/un niveau de service de transport à la hauteur des besoins. En effet, depuis plusieurs années, les événements de sécurité liés aux aléas climatiques ne cessent d'augmenter. En Europe, des événements marquants sont survenus durant la dernière décennie avec des conséquences considérables.

► En France, sur la période 2015-2022, les accidents ferroviaires significatifs liés à des aléas climatiques ont triplé. On comptabilise un événement de ce type en 2015 contre neuf en 2019⁽⁴⁾. L'expertise du Bureau d'enquête sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) reconnaît le caractère influant des causes climatiques dans ces accidents qui ont entraîné, notamment, des interruptions de circulations supérieures à six heures, des dommages aux matériels dépassant les 150 000 euros et surtout de graves conséquences humaines.

Pour ne parler que des faits les plus marquants, prenons l'événement survenu le 8 février 2014 dans les Alpes-de-Haute-Provence. Un autorail a été percuté par un rocher d'environ 15 m³ qui a dévalé la pente sur 130 mètres avant de heurter la première voiture du train qui déraile et tombe dans le ravin. Cet événement a eu lieu hors RFN et a tué deux voyageurs. L'enquête du BEA-TT a révélé que des pluies abondantes et des températures douces pour la saison ont été contributives à cet accident.



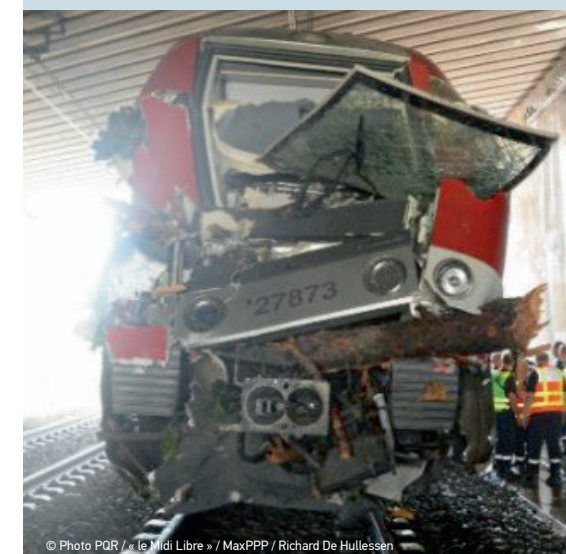
(4) Chiffre issu des remontées des événements de l'EPSF



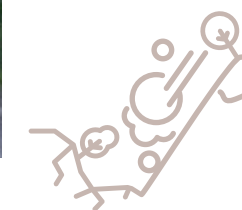
En 2015, les intempéries d'octobre et les pluies diluviennes associées ont noyé la gare de Cannes sous trois mètres d'eau. Les quantités d'eau ont creusé un gouffre de cinq mètres de large sous le ballast provoquant l'interruption totale du trafic. A la reprise de celui-ci, le trafic a été perturbé : la vitesse a été limitée à 30 km/h et les signalisations électriques, chargées d'habitude de réguler le trafic, ont été remplacées par des contrôles visuels.



En 2016, dans le département de l'Hérault, un conducteur de TER a percuté un arbre tombé sur les voies après de violents orages. Les dégâts ont été nombreux sur le matériel roulant et sur l'infrastructure. Un voyageur a été blessé grièvement, sept autres ont été blessés légèrement. L'enquête du BEA-TT révélera que l'arbre a été brisé sur sa partie haute, sous l'effet du vent violent. La partie supérieure d'environ quinze à vingt mètres de long, a été emmenée par le vent en direction de l'emprise ferroviaire et est tombée sur les voies ferrées au moment où le TER arrivait.



En 2020, la tempête Alex a fait des dégâts majeurs sur les voies ferrées de la vallée de la Roya et de la Vésubie. Des glissements de terrain, des arbres sur les voies, des éboulements et des affaissements de talus ont causé d'énormes dégâts sur les infrastructures ferroviaires. Deux ans de travaux ont été nécessaires pour remettre l'infrastructure en état.



INTRODUCTION



Le 14 juillet 2022, en période de sécheresse, des incendies se propagent près de Graveson, dans les Bouches-du-Rhône. La projection d'étincelles provenant d'un frein serré sur un wagon transportant de la matière dangereuse (MD) semblent être la cause de ces incendies. Les dégâts causés à l'environnement sont très importants (1500 ha de forêts brûlées). Cet accident a nécessité l'intervention de plus de mille pompiers.



A l'international, au Danemark, le 2 janvier 2019, sur le pont du Grand Belt, un train de voyageurs est entré en collision avec un train de fret croiseur. Une semi-remorque mal verrouillée sur un wagon s'est détachée et est venue s'encaster dans la voiture de tête. Les vents violents sont une cause contributive à cet accident qui a causé la mort de huit personnes et quatre autres personnes ont été grièvement blessées.



En août 2020, à Stonehaven en Écosse, un train de voyageurs fait marche arrière après qu'un glissement de terrain lui a été signalé par un agent du GI. Le train rencontre un autre glissement de terrain. Toutes les voitures déraillent entraînant la mort de trois voyageurs et six autres voyageurs sont blessés grièvement.



En mars 2023, dans le canton de Berne en Suisse, deux trains ont déraillé à quelques dizaines de kilomètres l'un de l'autre à cause de fortes rafales de vent. Ces rafales de vent ont été mesurées à plus de 130 km/h. Le premier déraillement survenu près de Lüscherz, a fait trois blessés légers. Le deuxième, près de Büren am Hof, a fait douze blessés, dont un grave. Les dommages sont chiffrés à plus de deux millions de Francs suisses⁽⁵⁾ pour les deux accidents.



(5) Environ deux millions d'euros

INTRODUCTION

Plus récent encore, un éboulement s'est produit entre Saint-Michel-de-Maurienne et Modane, en Savoie, le dimanche 27 août 2023. Environ 12000 m³ de blocs rocheux se sont détachés de la montagne sans faire de blessé. Cet éboulement a provoqué la fermeture de la ligne ferroviaire entre la France et l'Italie et au jour de la rédaction de ce document, le trafic ferroviaire n'a toujours pas repris. Il est acquis que ce phénomène, généré par le dégel du permafrost, est en très forte accélération. Il en a été constaté plus de 200 en 2022, là où ce phénomène n'existait pas dans les années 90.



► **La construction des infrastructures ferroviaires et du matériel roulant a été étudiée pour durer dans le temps.**

Les règles de conception et de construction se sont basées sur des données climatiques plus ou moins anciennes et souvent empiriques, ainsi les vulnérabilités des infrastructures et des matériaux ont évolué, évoluent et évolueront avec le changement climatique. Les territoires devront faire face à de nouvelles problématiques : des ruptures de réseaux, des infrastructures endommagées plus fréquemment ou avec des dégâts de plus grande ampleur.

► **La prise en compte des aléas naturels et de leurs risques associés, liés au changement climatique, est nécessaire pour assurer la pérennité puis la résilience des infrastructures ferroviaires et du matériel roulant.**

La résilience est devenue le maître-mot ancré dans la gestion des nouveaux enjeux. Elle se définit comme la capacité d'un système à faire face avec succès aux situations à risques, à s'adapter et réussir à se développer en dépit de circonstances défavorables. Il est donc primordial que chaque organisation se prépare à faire face aux risques climatiques potentiels en établissant une stratégie d'adaptation pour assurer cette résilience.

Bien que le changement climatique soit globalement plus préjudiciable que bénéfique, il existe également des effets positifs. On constate, par exemple, moins de dommages causés par le froid aux voies ferrées et les dépenses en énergie de chauffage diminuent.

► **Identifier les forces du réseau ainsi que les vulnérabilités face au changement climatique permet de mieux suivre l'état des composantes du système ferroviaire et de leurs évolutions.**

Initier une analyse de risque doit permettre d'identifier les points de fragilité qui contribueraient à la mise en place d'une stratégie

climatique. Cela permet également d'identifier les composants à risque du matériel roulant par exemple, mais aussi les scénarios d'exploitation du réseau qui seront mis en place face au changement et aux potentielles ruptures. L'analyse de risque permet d'améliorer la gestion de crises en anticipant les évolutions possibles.

Dans une plus grande dimension, la réunion des résultats de chaque analyse de risque propre à chaque activité sur le territoire étiera la politique d'aménagement du territoire qui doit dorénavant tenir compte des vulnérabilités territoriales identifiées.

► **Ce rapport constitue une première phase dans la prise en compte du changement climatique en France à l'échelle de toutes les activités ferroviaires et de l'interaction des acteurs.**

Il a pour objectif de livrer des premiers éléments de réflexion sur l'impact du changement climatique sur le système ferroviaire métropolitain. Le développement de cette réflexion s'articule autour de la présentation des études climatiques déjà disponibles pour permettre d'identifier les aléas climatiques auxquels les chemins de fer doivent faire face. Une méthode d'analyse de risque est également présentée, il s'agit d'une méthode développée par des organismes publics qui a fait ses preuves sur les réseaux d'infrastructures de transport français. Enfin, ce rapport préliminaire se veut également un recueil de témoignages de différents acteurs publics, privés, nationaux et internationaux.

Ce rapport répond donc à la problématique suivante : comment initier une étude d'impact des risques liés au changement climatique sur l'exploitation ferroviaire ?



Anticiper l'évolution du système ferroviaire face aux risques liés au changement climatique - la nécessité d'adaptation



Le panorama réglementaire européen et français incite à la transition énergétique des sociétés. Le domaine des transports est un des principaux leviers identifiés pour réduire nos émissions de GES. Les politiques qui régissent le domaine des transports et notamment le secteur ferroviaire incitent à la sobriété énergétique, à la transition vers des énergies plus propres et à la résilience des systèmes de transport. Pour satisfaire la volonté des politiques publiques, le secteur ferroviaire doit garantir un niveau de fiabilité compatible avec un contexte de report modal en faveur du train. Le mode de transport ferroviaire est un axe stratégique pour l'aménagement durable du territoire et pour atteindre les objectifs des Accords de Paris.

Initier une étude sur la résilience du système ferroviaire face au changement climatique constitue une première étape. L'identification des risques générés par le changement climatique permettra d'adapter le système ferroviaire en y introduisant des changements de nature technique, opérationnelle ou organisationnelle. Les réglementations européennes et nationales prévoient déjà des outils relatifs à l'analyse de ces changements et des risques qu'ils engendrent. Ainsi, après avoir analysé les risques liés au changement climatique, les acteurs ferroviaires pourront faire l'application du règlement d'exécution (UE) n° 402/2013 concernant la méthode de sécurité commune relative à l'évaluation et à l'appréciation des risques.

C'est pourquoi ce premier chapitre est destiné à donner quelques clefs pour permettre à chaque exploitant ferroviaire de se prémunir des risques liés au changement climatique. L'ambition est de sensibiliser et de rassembler les informations disponibles, les études déjà réalisées sur notre société et plus particulièrement sur nos infrastructures. Il s'agit d'études d'impacts globales qui vont au-delà du cadre du secteur ferroviaire, mais qui permettent une compréhension plus large des risques.

1 • L'articulation de données climatiques disponibles permettant d'initier une analyse de risque sur l'exploitation ferroviaire

► Pour comprendre les évolutions auxquelles nous devons faire face, des organismes ont mené des études dont les conclusions sont alertes. A l'instar du GIEC, des organismes se mobilisent pour tenter de modéliser les évolutions du climat pour le XXI^e siècle. Ces modélisations et ces jeux de données, mis à disposition du grand public, doivent permettre de se préparer au mieux au changement climatique. C'est en identifiant les risques naturels auxquels nous pourrions être confrontés qu'il sera plus aisé de s'adapter aux défis d'aujourd'hui et de demain.

La connaissance et l'accès à des bases de données existantes, qualifiant les évolutions

climatiques attendues, sont d'ores et déjà disponibles. Les données sur les aléas naturels d'aujourd'hui sont également à croiser avec les événements climatiques passés. Ceci permettra, d'une part de connaître l'évolution des aléas et, d'autre part, de caractériser ceux nécessaires à l'élaboration d'une stratégie face au risque climatique. Quelques bases de données et leurs utilisations possibles dans le cadre d'une analyse de risque sont présentées dans ce chapitre.

Cette liste de jeux de données n'est pas exhaustive.

1a • Les études sur l'évolution du climat mondial

► Le GIEC, organisme non-gouvernemental regroupant des scientifiques en charge d'évaluer les changements climatiques, publie régulièrement ses études, accessibles à tous. Dans le rapport daté de 2021⁽⁶⁾, le GIEC a établi cinq nouveaux scénarios d'évolution du climat au cours du XXI^e siècle en fonction des émissions de GES. Par l'utilisation de ces différents scénarios, il est possible d'établir de grandes orientations potentielles des sociétés humaines et leurs influences sur le climat. Ces scénarios n'ont pas pour ambition de prédire l'avenir, aucune probabilité n'a été associée aux différents scénarios. L'ambition est de prendre en compte les incertitudes liées aux futures activités humaines et d'éclairer la prise de décision.

Les cinq scénarios sont issus de trajectoires socio-économiques de référence appelées « Shared Socioeconomic Pathways » (SSP) qui ont été élaborées dans l'objectif de donner un cadre de

réflexion commun sur les enjeux liés au changement climatique. Ces cinq scénarios permettent de décrire les évolutions sociales, économiques, politiques et technologiques envisageables d'ici la fin du siècle.

Ces modélisations, de la plus optimiste à la plus pessimiste, permettent de balayer un large éventail de futurs plausibles. Le scénario le plus optimiste décrit un monde dans lequel les émissions de CO₂ diminuent drastiquement pour atteindre la neutralité carbone vers 2050 et deviennent négatives dans la deuxième moitié du siècle (SSP1-1.9). Le scénario le plus pessimiste décrit, quant à lui, un monde dans lequel les émissions de CO₂ continuent d'augmenter fortement jusqu'en 2050 pour atteindre un niveau deux fois supérieur à celui d'aujourd'hui et plus de trois fois supérieur en 2100 (SSP5-8.5) (cf. Figure 1).

► Ainsi, les cinq scénarios envisagés par le GIEC sont :

- SSP1-1.9 : scénario très ambitieux pour représenter l'objectif 1,5 °C de l'Accord de Paris
- SSP1-2.6 : scénario de développement durable
- SSP2-4.5 : scénario intermédiaire
- SSP3-7.0 : scénario de rivalités régionales
- SSP5-8.5 : développement basé sur les énergies fossiles

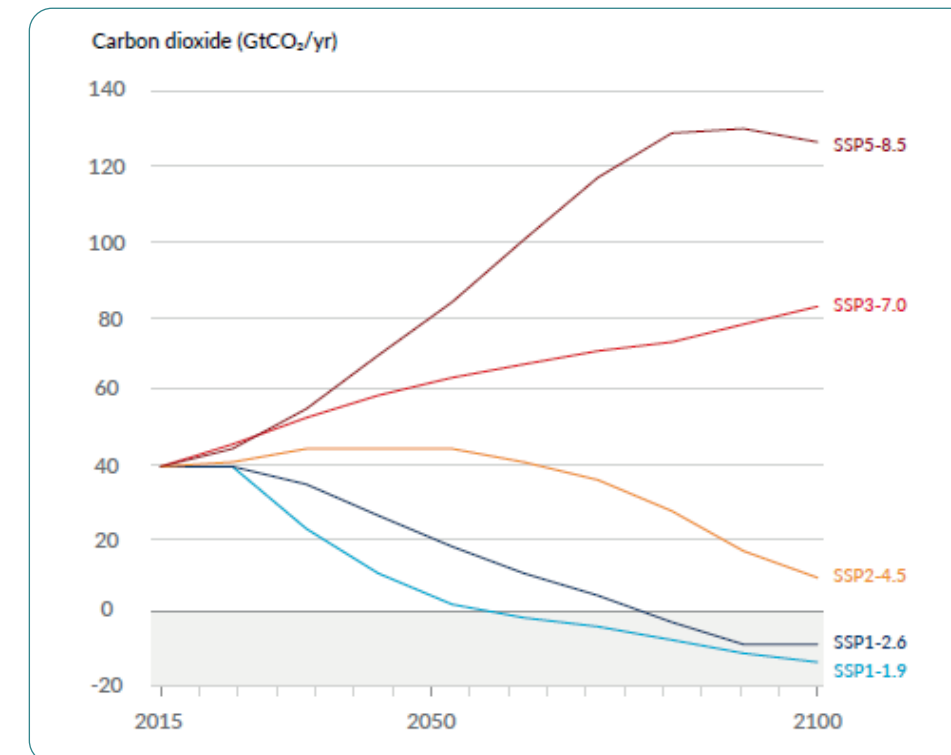


Figure 1 : Emissions de CO₂ futures dans les cinq scénarios illustratifs

Le rapport est accompagné d'un atlas interactif⁽⁷⁾ en ligne qui permet d'explorer l'évolution de variables climatiques observées ou simulées suivant les scénarios à différentes échelles géographiques et temporelles. Cette visualisation permet de rendre plus concrètes et exploitables les évolutions dues au changement climatique.

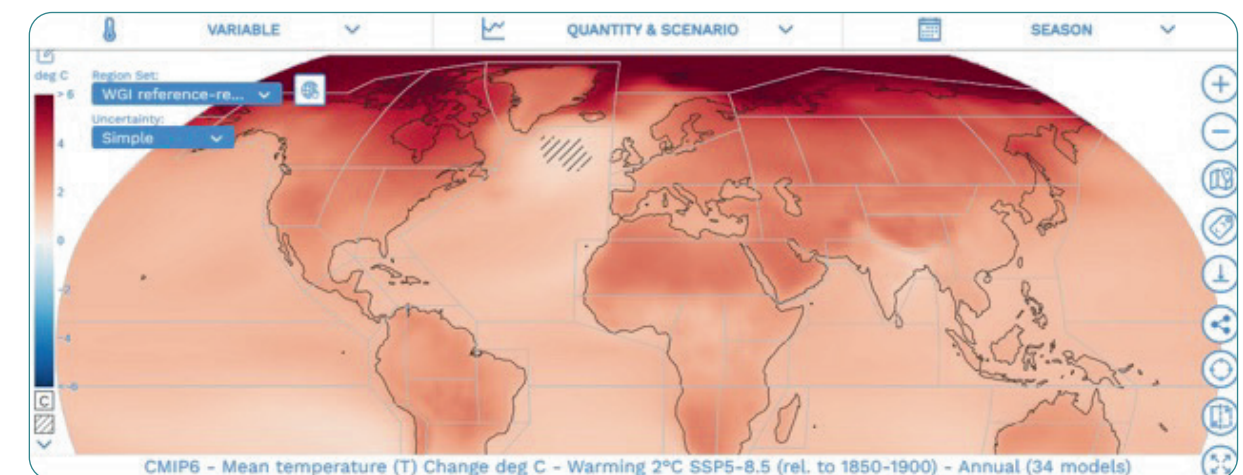


Figure 2 : Simulation d'évolution des températures

(6) Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553-672, doi:10.1017/9781009157896.006.

(7) IPCC AR6-WGI Atlas. (s. d.). <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

► **L'atténuation désigne, en politique et dans le contexte des études menées par le GIEC, une politique menée dans l'objectif de réduire l'empreinte des activités humaines sur le changement climatique. Le terme d'adaptation, quant à lui, définit qu'en dépit de tous les efforts d'atténuation des émissions de GES qui seront réalisés, une part du changement climatique est inévitable. Il conviendra donc de s'adapter aux nouveaux paramètres.**

Le GIEC conclut alors qu'il est plus que jamais temps d'agir pour l'adaptation et l'atténuation. Chacun des scénarios établit une hausse des températures supérieure au 1,5°C fixé par les Accords de Paris, dans les vingt prochaines années. Des actions immédiates sont requises pour l'adaptation et le GIEC nous aide à identifier les changements climatiques inévitables pour mieux nous y préparer.

1b • Les organismes spécialisés dans les études climatiques françaises

► **A l'instar du GIEC, qui étudie l'évolution du climat mondial, des organismes ont pour mission d'étudier l'évolution du climat sur le territoire national.** Leurs résultats sont libres de droits et permettent de s'approprier de façon plus locale les projections d'évolution du climat.

Par exemple, le portail DRIAS est une plateforme de données mise à disposition par le Ministère de la Transition écologique. Cette plateforme livre des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de

En mars 2023⁽⁸⁾, le rapport de synthèse du GIEC a été publié et conclut le sixième cycle lancé en 2021. Suite à cette publication, le gouvernement français a édité une synthèse de ce sixième cycle⁽⁹⁾. Il fait état de plusieurs constats alarmants notamment sur les politiques en place fin 2020 qui conduiraient à un réchauffement global de 2,4 à 3,5°C d'ici la fin du siècle par rapport à l'ère pré-industrielle.

► **Le gouvernement apporte cependant des éléments de réponses et des solutions par des politiques d'adaptation, de développement résilient, de transformation systémique et de prise en compte des liens entre ces différents concepts impactant tous les secteurs de la société, dont le secteur du transport⁽¹⁰⁾.**

modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM). Les informations climatiques sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques. Le dernier rapport du DRIAS date de 2020⁽¹¹⁾ et les projections sont basées sur les données du cinquième cycle du GIEC : les scénarios RCP⁽¹²⁾.

Pour illustrer ce travail, ci-dessous, est jointe une extraction effectuée sur une projection à horizon de temps proche (2035) des feux de forêts sur l'ensemble du territoire. Il est également possible de régionaliser cette recherche, d'affiner le pas de temps et de choisir un scénario d'émissions de GES.

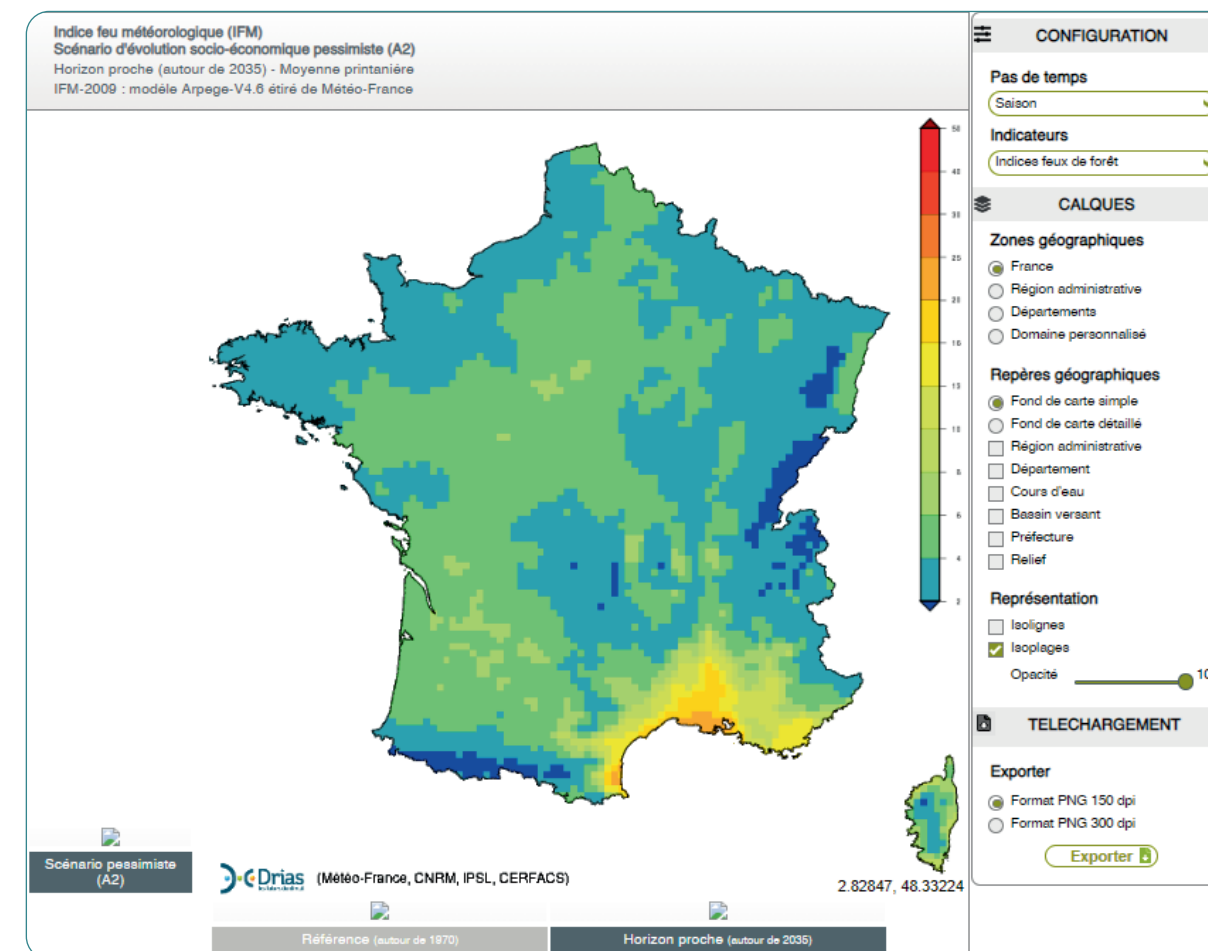


Figure 3 : Indice de feu météorologique pour un scénario d'évolution socio-économique pessimiste à l'horizon 2035 avec des moyennes printanières

► **Il existe une plateforme mise à disposition par Météo France, Climat HD⁽¹³⁾, qui propose une vision intégrée de l'évolution du climat passé et futur, à l'échelle nationale et régionale.** Sur cette plateforme internet, sont synthétisés les derniers travaux des scientifiques et climatologues permettant de mettre en avant des messages clef et des données illustrées afin de mieux comprendre et d'appréhender le changement climatique et ses impacts.

A titre d'exemple, nous pouvons joindre l'extraction suivante : le cumul hivernal de précipitation à horizon 2100 sous le scénario le plus pessimiste du GIEC. Ce résultat est accompagné d'un commentaire explicatif.

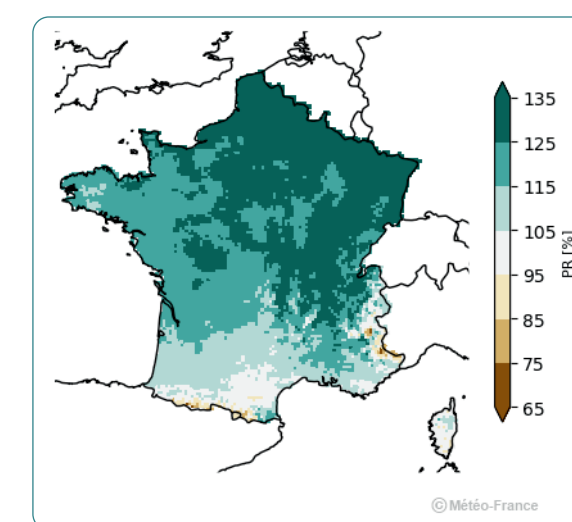


Figure 4 : Cumul hivernal de précipitations : rapport (%) à référence 1976-2005 pour l'horizon lointain (2071-2100) Scénario de fortes précipitations (RCP8.5)

(8) L'atlas interactif est disponible à l'adresse suivante : https://report.ipcc.ch/ar6syrr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

(9) Climat : un nouveau rapport alarmant du GIEC sur un réchauffement global de la planète. (2023, 21 mars). Vie publique au coeur du débat public. <https://www.vie-publique.fr/en-bref/288687-rechauffement-climatique-un-nouveau-rapport-alarmant-du-giec>

(10) Ce qu'il faut retenir du 6e rapport d'évaluation du GIEC. (s. d.). Dans Gouvernement. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20250_4pages-GIEC-2.pdf

(11) Les Nouvelles Projections Climatiques de Référence DRIAS 2020 pour la métropole. (2020). Dans <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

(12) Representative Concentration Pathway

(13) CLIMAT HD par Météo-France. (s. d.). <https://meteofrance.com/climathd>

► **Météo France propose également un outil d'auto-diagnostic, Climadiag Entreprise.** Cet outil permet aux acteurs de la vie économique de tester leur sensibilité au climat futur et de s'y préparer. Cet outil est accessible gratuitement depuis le site de Météo France⁽¹⁴⁾. A l'instar de Climat HD, porté par Météo France, d'autres portails, mettent à disposition des données climatiques et sont accessibles au grand public comme Pluies Extrêmes et Tempêtes Extrêmes.

D'autres acteurs institutionnels ont réalisé des études accessibles à tous : le centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA), l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'Observatoire régional climat, air et énergie (ORCAE) et l'Observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC).

► **Le CEREMA est un établissement public. Il a pour mission d'apporter son expertise et d'accompagner l'Etat et les collectivités territoriales dans l'élaboration de politiques publiques d'aménagement et de transport.** Les travaux du CEREMA sont accessibles au grand public via leur site internet.

► **L'ADEME a sept missions principales dont celle de mettre à disposition l'ensemble des données que l'agence récolte au cours de ses missions.** Elle a également pour mission d'accompagner et de mobiliser les acteurs face au changement climatique, de partager son expertise et d'accompagner la recherche.

► **L'ORCAE a, quant à lui, quatre missions en matière d'observation, dont notamment celle de contribuer à l'élaboration des diagnostics locaux intégrés « climat - air - énergie ».** L'ORCAE est aussi un lieu d'échanges entre acteurs (représentants de l'Etat et des établissements publics, des organismes de recherche et d'observation, des collectivités locales ainsi que des acteurs socio-économiques et des associations).

► **L'ONERC a pour mission principale de collecter et diffuser les informations sur les risques liés au réchauffement climatique,** de formuler des recommandations sur les mesures d'adaptation à envisager pour limiter les impacts du changement climatique et d'être en liaison avec le GIEC.

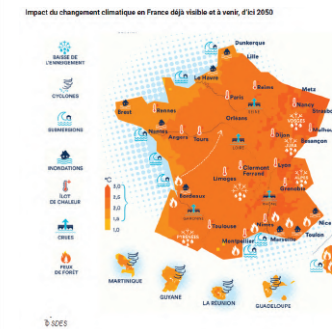


(14) Climadiag Entreprise accessible à l'adresse suivante <https://meteofrance.com/climadiag-entreprise>
 (15) L'adaptation au changement climatique dans la taxonomie européenne | Carbone 4. (s. d.). https://www.carbone4.com/analyse-adaptation-climat-taxonomie-europeenne?mc_cid=87e49bd788&mc_eid=305c502099
 (16) Notre-environnement. (2023b, avril 17). Les risques naturels majeurs en France – Notre-environnement. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/risques/les-mouvements-de-terrain-et-les-erosions-cotieres-ressources/article/les-risques-naturels-majeurs-en-france>
 (17) Comprendre le PNACC2. (2018) – https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2018.12.20_Comprendre_le_PNACC2_0.pdf
 (18) Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, volet infrastructures et systèmes de transport | Analyse des risques liés aux événements climatiques extrêmes sur les infrastructures, systèmes et services de transport | Recueil de concepts. Rapport d'étape. (2015). Cerema.

2 • Les aléas climatiques identifiés à fort enjeu sur le secteur ferroviaire

2a • Les aléas climatiques identifiés comme potentiellement impactante sur le système ferroviaire

Pour identifier les aléas climatiques auxquels le système ferroviaire est susceptible d'être confronté dans les années à venir, il convient de se baser sur des études déjà menées par des experts sur le sujet.



En premier lieu, au niveau européen, la Commission a défini une taxonomie qui constitue un « système de classification » des activités économiques. Cette taxonomie est destinée à identifier les activités qui apportent une contribution positive « substantielle » à la préservation de l'environnement. Ce travail de classification est orchestré par la Commission européenne depuis 2018.

Dans cette taxonomie, il existe plusieurs points clef, dont la réalisation d'une analyse de risque et de vulnérabilités climatiques, perturbant le fonctionnement des activités économiques. Pour cela, ils ont défini l'ensemble des aléas selon les différentes composantes du climat, selon leur fréquence et leur intensité. Ainsi ils ont identifié pas moins de 28 risques⁽¹⁵⁾ liés au changement climatique. Cette définition peut servir de base de réflexion pour identifier les aléas climatiques auxquels le secteur ferroviaire pourrait faire face dans la suite de ce développement.

Le ministère de la Transition Ecologique a, dans la même veine, mené une étude sur les risques naturels majeurs en France⁽¹⁶⁾. Cette étude constitue également une base de données pour identifier les aléas climatiques. Le graphique suivant issu de cette étude montre les aléas les plus courants survenus en France lors du siècle dernier. On constate que les inondations constituent environ deux tiers des événements climatiques dommageables en France.

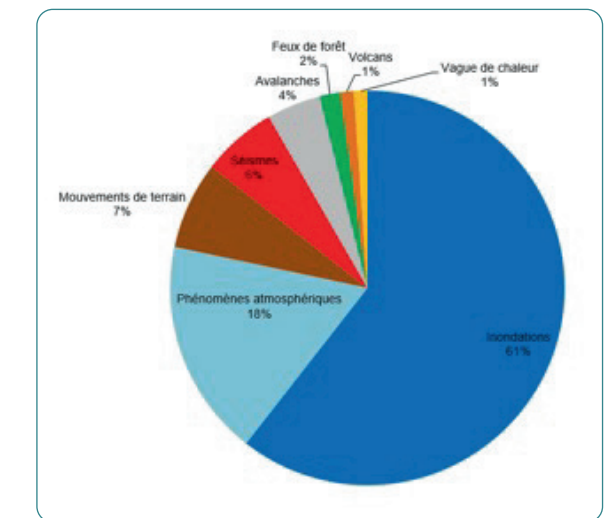


Figure 5 : Part des événements naturels dommageables par type de risque entre 1900 et 2017 (sources : MTEs/DGPR/SRNH et BARPI, BD Gaspar, derniers arrêtés pris en compte, publiés au Journal Officiel le 24/09/2017. AFP, CCR, FFSA/GEMA, Météo-France)

► **La France est exposée à d'autres risques naturels moins fréquents, mais pouvant être extrêmement dommageables, comme les séismes, les éruptions volcaniques ou les cyclones.** Néanmoins, si dommageables soient-ils, les séismes et éruptions volcaniques sont des événements d'une extrême rareté sur le sol métropolitain, ainsi, ils ne seront pas traités dans cette étude.

Pour compléter l'identification des aléas climatiques, le Plan d'adaptation au changement climatique version 2 (PNACC), publiée en 2018 identifie les dix impacts majeurs des aléas du climat et permet d'alimenter la réflexion sur les aléas climatiques impactant le système ferroviaire⁽¹⁷⁾. Ce plan a pour objectif de construire la résilience des principaux secteurs de l'économie face aux changements climatiques.

► **Enfin, le CEREMA, dans son recueil de définition de la méthodologie générale de l'analyse de risque, définit également une liste d'aléas climatiques appropriée au secteur des transports⁽¹⁸⁾.**

En s'inspirant de ces diverses identifications et en conclusion de ce chapitre, les aléas climatiques considérés comme redoutables pour le système et les activités ferroviaires français sont les suivants :

Cette liste d'aléas n'est pas exhaustive et pourra être complétée dans le cadre des analyses de risque propre à chaque acteur du secteur ferroviaire.

Aléas climatiques primaires	Aléas climatiques secondaires	Justification des impacts potentiels sur système ferroviaire	Chiffres clés
Aléas climatiques liés à la température	Augmentation des périodes de sécheresse	Permet de prendre en compte les impacts dus à une période de fortes chaleurs et sans pluie	Un événement de température extrême, qui se produisait 1 fois tous les 10 ans en 1900, sera vraisemblablement observé 4 fois tous les 10 ans avec + 1,5 °C de réchauffement et de 9 à 10 fois avec + 4 °C de réchauffement.
	Augmentation des valeurs extrêmes de température	Permet de prendre en compte les impacts des chaleurs extrêmes de façon ponctuelle (différence avec l'item ci-dessus où il s'agit d'une période)	Le rail est composé d'acier, un matériau sensible aux variations de températures. Pendant les périodes de fortes chaleurs, si la température est de 37 °C, celle du rail peut dépasser les 55 °C
	Vague de chaleur / canicule	Permet de prendre en compte les impacts d'une période de fortes chaleurs diurnes et nocturnes	La vitesse du train peut être limitée à cause des vagues de chaleur, passant d'une vitesse commerciale de 160 km/h à 100 km/h et générant ainsi de nombreux retards
	Incendie de forêt	Permet de prendre en compte les impacts des incendies sur le réseau (avec les abords)	D'ici à 2050, 50% des espaces naturels seront soumis au risque incendie ⁽¹⁶⁾
	Vague de froid / gel	Permet de prendre en compte les impacts de fortes températures négatives	
	Orage	Permet de prendre en compte les impacts dus à la foudre	
Aléas climatiques liés à l'eau	Modification des régimes de précipitations (pluie, neige, grêle)	Permet de prendre en compte les impacts dus aux épisodes de fortes précipitations	
	Inondation	Permet de prendre en compte les impacts dus aux inondations des eaux de surface qui ne touchent pas forcément les mêmes zones que la submersion marine ou l'augmentation du niveau des eaux souterraines	76 mm de pluie en 90 min : à Londres en juillet 2021, des fortes précipitations ont engendré des crues soudaines qui ont causé un incendie de sous-station électrique et l'arrêt des circulations pendant 7h ⁽¹⁹⁾
	Submersion marine	Permet de prendre en compte les impacts dus à l'élévation du niveau de la mer et les risques de corrosion qui ne touchent pas forcément les mêmes zones que les inondations ou l'augmentation du niveau des eaux souterraines	Le PNACC prévoit près de 2000 km de voies ferrées submergées d'ici la fin du siècle avec une hausse de niveau de la mer de 1 mètre ⁽²⁰⁾
Aléas climatiques liés au vent	Vent violent (tornades, cyclones)	Permet de prendre en compte les impacts dus aux fortes rafales de vent	En mars 2023 en Suisse, deux déraillements ont été causés par des vents violents
	Tempête de neige	Permet de prendre en compte les impacts dus aux fortes rafales de vent et au froid et à la neige	
	Tempête de sable	Permet de prendre en compte les impacts dus aux fortes rafales de vent et aux grains de sable (matériel roulant)	
Aléas climatiques liés aux masses solides	Avalanche	Aléas les plus courants en France, pouvant eux-mêmes être causés par un aléa climatique lié à la température, à l'eau, au vent ou autre	En 2022, une avalanche a causé le déraillement d'un train près de Villars en Suisse, la zone n'était pas réputée à risque
	Glissement de terrain	Aléas les plus courants en France, pouvant eux-mêmes être causés par un aléa climatique lié à la température, à l'eau, au vent ou autre	En 2014, en Suisse, un glissement de terrain a entraîné le déraillement du train de voyageurs : 7 blessés graves et 1 mort
	Eboulement	Aléas les plus courants en France, pouvant eux-mêmes être causés par un aléa climatique lié à la température, à l'eau, au vent ou autre	Un éboulement de 700 m ³ a provoqué, le 27/08/2023, l'interruption de la circulation des trains entre la France et l'Italie dans la vallée de la Maurienne ainsi que la fermeture de l'A43
	Coulée de boue	Aléas les plus courants en France, pouvant eux-mêmes être causés par un aléa climatique lié à la température, à l'eau, au vent ou autre	
	Chute de pierres	Aléas les plus courants en France, pouvant eux-mêmes être causés par un aléa climatique lié à la température, à l'eau, au vent ou autre	En Suisse en 2012, les chutes de pierre ont entraîné la mort d'un voyageur
	Affaissement	Aléas les plus courants en France, pouvant eux-mêmes être causés par un aléa climatique lié à la température, à l'eau, au vent ou autre	

Figure 6 : Tableau récapitulatif des aléas climatiques redoutables pour la France métropolitaine

(16) Notre-environnement. (2023b, avril 17). Les risques naturels majeurs en France – Notre-environnement. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/risques/les-mouvements-de-terrain-et-les-erosions-cotieres-ressources/article/les-risques-naturels-majeurs-en-france>

(19) Troisième Rapport d'Adaptation. Network Rail (décembre 2021). <https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2022/01/Network-Rail-Third-Adaptation-Report-December-2021.pdf>

(20) Comprendre le PNACC2. (2018). https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2018.12.20_Comprendre_le_PNACC2_0.pdf

2b • L'identification des tendances climatiques à court terme

► En vue de se prémunir au mieux du changement climatique, Météo France a créé une plateforme spécifique qui permet d'identifier les tendances du climat à trois mois⁽²¹⁾. Cette plateforme expose plusieurs scénarios de tendances de températures et de précipitations. Chaque scénario est pondéré par une probabilité pour une région d'environ 1000 km². Ces prévisions permettent d'identifier le scénario le plus probable sur la région recherchée : proche, en dessous ou au-dessus des normales. Les résultats présentés sont

donc sous la forme de scénario « chaud », « normal » ou « froid » pour la température et « humide », « normal » ou « sec » pour les précipitations.

Il ne s'agit pas de prévoir les conditions météorologiques des prochains mois. La volonté est de déterminer les tendances attendues en moyenne sur le trimestre. Ces prévisions sont une moyenne sur la saison et ne peuvent identifier un événement ponctuel et particulier, durant quelques jours ou quelques semaines.

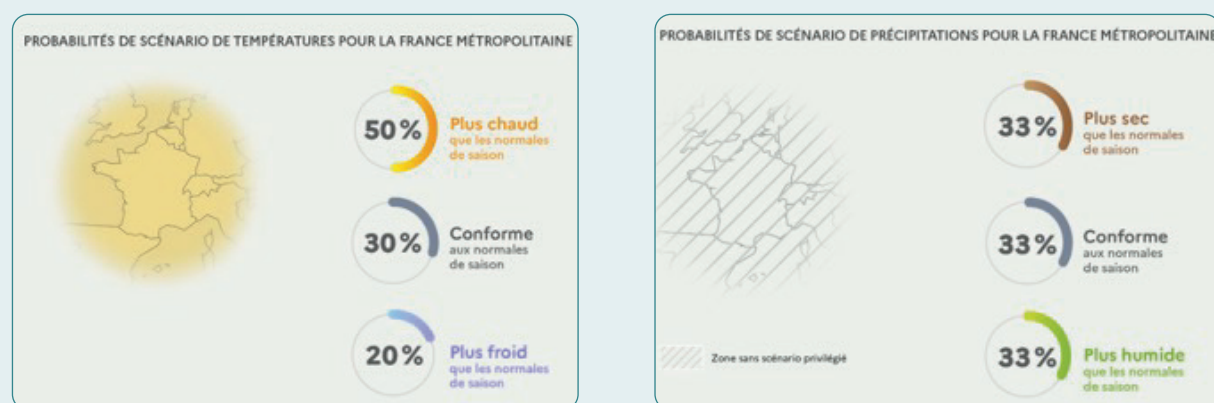


Figure 7 : illustrations de deux scénarios de températures et de précipitations pour la France métropolitaine

2c • L'identification des tendances climatiques à long terme

► En conclusion de ce chapitre, les tendances climatiques pour la fin du siècle ont fait l'objet de nombreuses études par divers organismes. Le croisement de ces données permet d'identifier une tendance à l'horizon de l'an 2100.

Ainsi, les tendances observées en début de siècle s'accroissent, avec notamment :

- une forte hausse des températures moyennes pour certains scénarios : de 0,9 °C à 1,3 °C pour le scénario de plus faibles émissions de gaz à effet de serre selon le GIEC, jusqu'à 2,6 °C à 5,3 °C en été pour le scénario le plus pessimiste du GIEC ;
- pour le scénario le plus pessimiste, une augmentation du nombre de jours de vagues

de chaleur dépassant les 20 jours au sud-est du territoire ;

- l'adoucissement des périodes d'extrêmes froids ;
- une augmentation des épisodes de sécheresse dans la majeure partie sud du pays ;
- une augmentation des précipitations extrêmes⁽²²⁾.

Ces tendances sont valables sur l'ensemble du territoire français. Il est également possible de connaître des tendances climatiques plus régionalisées, comme expliqué plus en amont dans ce rapport. Il est également important de connaître les tendances du climat passé pour mieux appréhender les évolutions futures, à l'instar de Climat HD par exemple.

(21) Les tendances à trois mois | Météo-France les dernières prévisions saisonnières. (s. d.). <https://meteofrance.fr/actualite/publications/les-tendances-climatiques-trois-mois>

(22) Nouvelles simulations du climat : quel réchauffement en 2100 ? | Météo-France. (s. d.). <https://meteofrance.com/changement-climatique/quel-climat-futur/nouvelles-simulations-du-climat-quel-rechauffement-en-2100> - Le climat futur en France | Météo-France. (s. d.). <https://meteofrance.com/changement-climatique/quel-climat-futur/le-climat-futur-en-france>

3 • Les méthodes d'étude et de mise en cohérence des données disponibles

► La suite de ce développement consiste à exposer une méthode permettant l'analyse des données issues de l'échantillon des sources citées ci-dessus. Cette étape permet d'obtenir un résultat spécifique de chaque acteur du ferroviaire et à son type d'activité. L'analyse des données doit conduire à un résultat permettant la prise de décision. Ce sont ces décisions qui doivent permettre de développer des systèmes résilients.

3a • Les étapes préalables à l'analyse de risque

Le CEREMA expose sa méthode d'analyse des vulnérabilités des infrastructures de transports face au changement climatique et de leurs évolutions dans plusieurs rapports⁽²³⁾.

Dans un premier temps, il est nécessaire de définir le périmètre et les objectifs de l'analyse. Pour cela il faut définir quelles sont les infrastructures à analyser. Cette première réflexion détermine ainsi la durée et le coût de l'étude, les personnes qui devront se mobiliser pour la réalisation et les données nécessaires.

- 1 - Etude de vulnérabilité

Cette étape est consacrée à l'évaluation des vulnérabilités des infrastructures. Schématiquement, le système ferroviaire est décomposé en actifs, qui eux-mêmes peuvent être décomposés de façon plus fine encore. L'objectif étant de décomposer le système ferroviaire en système ponctuel.

Dans cette étape, il ne faut pas négliger la bonne connaissance du patrimoine ainsi que l'état réel des infrastructures (dégradations existantes, niveau de trafic, retour d'expérience sur des événements passés, etc.).

On distingue alors deux types de vulnérabilité : physique ou fonctionnelle. La vulnérabilité physique représente une vulnérabilité du sous-système dépendant des composants de l'infrastructure, de leurs résistances et de leur comportement, etc. La vulnérabilité fonctionnelle représente, quant à elle, la vulnérabilité

du réseau d'infrastructure dépendant des caractéristiques fonctionnelles de celui-ci : sa capacité, son maillage, etc.

L'analyse de vulnérabilité physique désigne le fait de déterminer la vulnérabilité de chacun des sous-systèmes en fonction de leurs caractéristiques et pouvant subir des dommages importants. La caractérisation de la vulnérabilité des composants du système nécessite donc la réalisation d'une liste de facteurs. Les facteurs de vulnérabilité prioritaires à prendre en compte dans les analyses de risque peuvent être les éléments suivants :

- l'âge de l'infrastructure ;
- la durée de vie programmée du sous-système ;
- les règles de conception ;
- les matériaux utilisés ;
- les procédures de maintenance et d'inspection existantes ;
- les données de retour d'expérience ;
- la situation topographique de l'infrastructure (par rapport au niveau de la mer) ;
- la capacité du réseau ;
- le maillage.

Il est possible de s'appuyer sur des données existantes pour établir la vulnérabilité de l'infrastructure. Concernant les ouvrages d'art par exemple, il existe une base de données⁽²⁴⁾ qui fournit des indicateurs sur leur état. Il existe aussi des études statistiques ou historiques, des modélisations, etc.

(23) Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat. Dans la collection « Connaissances » (2019). Cerema - Changement climatique Les réseaux de transport aussi sont vulnérables ! Dans la collection « Le P'tit Essentiel » (novembre, 2018). Cerema - Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, volet infrastructures et systèmes de transport | Analyse des risques liés aux événements climatiques extrêmes sur les infrastructures, systèmes et services de transport | Recueil de concepts. Rapport d'étape (2015). Cerema.

(24) Images de Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA)

La vulnérabilité fonctionnelle désigne toutes les défaillances qui rendent une partie du système indisponible et qui obligent les usagers à subir des retards conséquents, à reporter tout ou partie de leur trajet, ou encore pour les opérateurs à mettre en place des solutions de remplacement. A titre d'exemple de fonction, on peut citer : la connectivité, l'accessibilité, la capacité, la performance, etc.

En considérant le caractère de connectivité du réseau ferroviaire, la vulnérabilité fonctionnelle sera d'autant plus faible qu'il existera d'itinéraires alternatifs pour relier deux points. Inversement, la vulnérabilité fonctionnelle sera très élevée si aucun itinéraire de substitution ne peut être envisagé.

Les analyses de vulnérabilité doivent toutes deux être effectuées puis combinées avant d'obtenir ce qu'on appelle communément une analyse de risque.

Enfin, la dernière étape consiste en l'analyse des impacts sur les déplacements. Les réseaux n'ont pas tous la même fonctionnalité ni les mêmes enjeux, l'analyse doit donc être construite via une approche systémique.

- 2 - La caractérisation des aléas climatiques

Pour le système ferroviaire, l'enjeu principal est le maintien des fonctionnalités de transports. La défaillance ou la rupture d'un sous-système, causée par l'impact d'un aléa climatique, impacte le niveau de service : régularité, capacité, trafic, etc.

Dans un second ouvrage⁽²⁵⁾, le CEREMA expose une méthode qui permet de caractériser les aléas climatiques. Les aléas désignent des événements climatiques extrinsèques aux sous-systèmes ainsi que leurs conséquences sur les territoires. Ils sont définis par une intensité et une probabilité d'occurrence spatiale et temporelle. Les aléas mentionnés dans ce rapport ont un impact sur les vulnérabilités physiques des sous-systèmes du réseau ferroviaire selon les caractéristiques

des composants, leur résistance, leur comportement, etc.

Il est donc nécessaire d'identifier les événements climatiques actuels et leurs évolutions. Les informations contenues dans le chapitre 1 devraient permettre de déterminer quels sont les événements climatiques présents sur le périmètre géographique étudié, quelles sont leurs caractéristiques, leur fréquence ainsi que leur intensité.

Les diverses simulations climatiques rendent possible la visualisation des évolutions en termes de temporalité, de fréquence et d'intensité des événements climatiques.

La liste d'aléas à étudier pourra ensuite être modifiée selon les objectifs de l'analyse de risque (se concentrer sur un aléa en particulier ou étudier l'ensemble des aléas identifiés) et/ou selon le périmètre de l'analyse de risque (différentes échelles spatio-temporelles). La détermination et le choix des aléas impactant se fait par itération en parallèle de la décomposition du système ferroviaire en sous-systèmes.

3b • L'analyse de risque

► **Après avoir caractérisé les aléas climatiques, décrit le réseau pour avoir une connaissance exhaustive de ses vulnérabilités et caractérisé les enjeux associés, il convient de confronter l'ensemble de ces éléments.** L'outil adéquat est l'élaboration d'une matrice de risque qui offre la possibilité de classer et de visualiser les risques en définissant différentes catégories (par sous-systèmes, par vulnérabilité fonctionnelle graduelle, par vulnérabilité physique, etc.).

L'exercice suivant consiste donc en l'évaluation de l'impact de chacun des aléas identifiés sur chacune des vulnérabilités critiques ou fonctionnelles des sous-systèmes ou composants ponctuels et en y associant les enjeux. L'évaluation peut se faire dans un premier temps à une échelle macroscopique en considérant les sous-systèmes puis dans un deuxième temps, si l'intérêt se justifie, à l'échelle des composants ponctuels de tout ou partie des sous-systèmes. Par exemple, il peut être judicieux dans un premier temps d'évaluer l'impact de fortes pluies sur la voie puis de décomposer l'effet de cet aléa sur chacun des composants de la voie (ballast, rail, sol support, etc.).

Le croisement des aléas, des vulnérabilités physiques et fonctionnelles des infrastructures et des enjeux est appelé analyse de risque. Il est important, après concertation, de définir une échelle pour permettre de noter la probabilité d'occurrence spatio-temporelle des aléas. Mais également de noter chaque vulnérabilité physique ou fonctionnelle. En multipliant alors la note de l'aléa avec la note de vulnérabilité, on obtient une note de risque qui permet de hiérarchiser les différents risques identifiés.

Pour illustrer, supposons que nous ayons identifié quatre vulnérabilités et quatre aléas climatiques. Après concertation, nous avons analysé les choses comme suit :

- La vulnérabilité n°4 est la plus sensible selon nos enjeux : nous lui attribuons la note de 4 ;
- La vulnérabilité n°1 est la moins sensible selon nos enjeux : nous lui attribuons la note de 1 ;
- L'aléa climatique n°1 est le plus impactant selon nos enjeux : nous lui attribuons la note de 4 ;
- L'aléa climatique n°4 est le moins impactant selon nos enjeux : nous lui attribuons la note de 1.

Ce qui nous donne schématiquement :

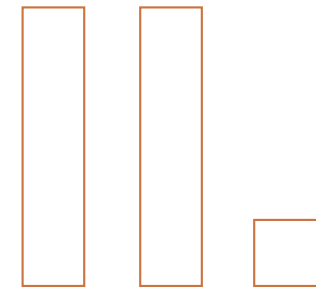
	Vulnérabilité n°4 de niveau 4	Vulnérabilité n°3 de niveau 3	Vulnérabilité n°2 de niveau 2	Vulnérabilité n°1 de niveau 1
Aléa climatique n°1 de niveau 4	16	12	8	4
Aléa climatique n°2 de niveau 3	12	9	6	3
Aléa climatique n°3 de niveau 2	8	6	4	2
Aléa climatique n°4 de niveau 1	4	3	2	1

Figure 8 : Matrice d'analyse des risques

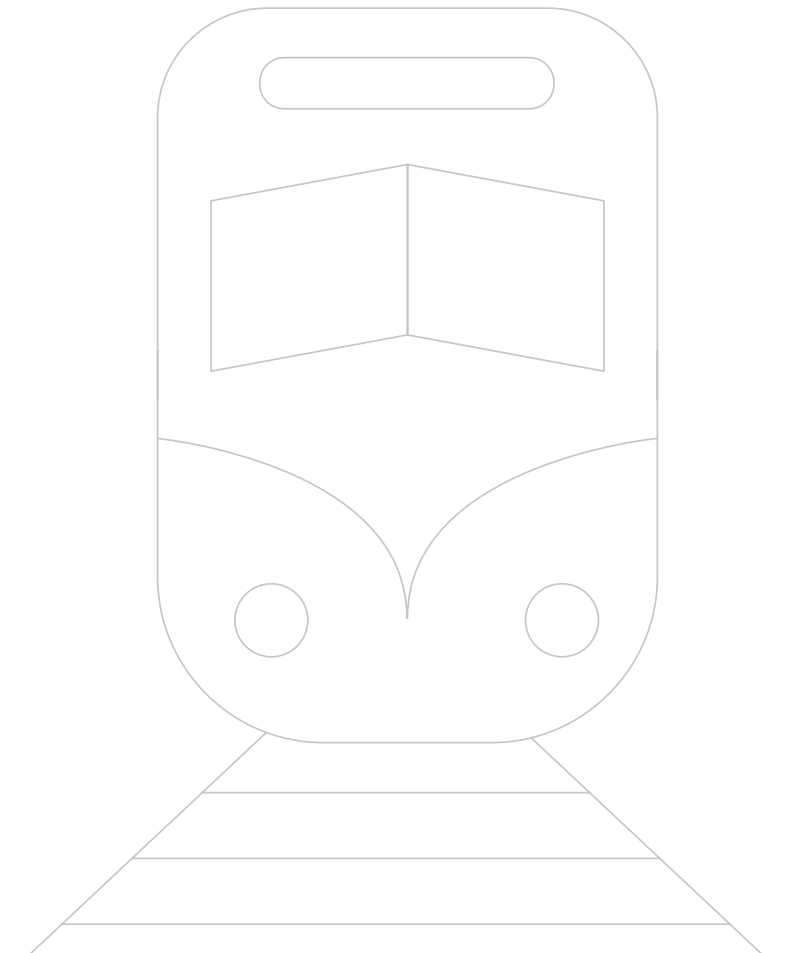
L'exercice consiste à définir le niveau d'acceptabilité du risque. Cela permet une hiérarchisation des risques graves qu'il faut maîtriser en priorité. Selon les limites définies, ces risques prioritaires donneront lieu à des actions à court terme. Ceci doit également mener à la définition de délais de mise en place pour des risques jugés moins critiques. Pour assurer la pertinence de cette démarche, il est important de définir l'échelle de gravité et d'acceptabilité du risque de façon collégiale.



Les initiatives des spécialistes du secteur ferroviaire



Pour se prémunir de ces risques, le secteur ferroviaire a déjà fait preuve d'initiative. Au sein des exploitants ferroviaires, des acteurs se sont déjà saisis de la problématique et ont initié des études sur les risques incombant à leurs activités. En Europe, les autorités nationales de sécurité se penchent également sur le sujet, plusieurs témoignages sont recueillis dans ce chapitre.



1 • Les initiatives de Gestionnaires d'Infrastructures

1a • La ligne LGV Sud Europe Atlantique

► LISEA est le premier gestionnaire d'infrastructure privé qui s'est vu confier le financement, la construction, l'exploitation et la maintenance d'une ligne à grande vitesse : la LGV Sud-Europe Atlantique (SEA). La ligne a été mise en service en 2017, pour un linéaire de 300 km entre Tours et Bordeaux. Les infrastructures sont donc très récentes.

Dans le cadre de leur volonté d'adaptation au changement climatique et suite à diverses sollicitations, LISEA a initié une évaluation de la résilience de la LGV SEA. Les questionnements tels que la disponibilité de la ligne (interruption de trafic, ralentissement, arrêts prolongés), la maintenance (les besoins de maintenance de l'infrastructure, les méthodes de maintenance, son organisation), les renouvellements (dégradation, destruction, vieillissement prématuré, évolution des composants) sont autant d'interrogations qui ont également contribué à lancer cette étude.

S'appuyant sur des études scientifiques qui modélisent les changements climatiques du siècle à venir, la démarche de LISEA consiste à évaluer les impacts potentiels pour la LGV, son exploitation et sa maintenance. L'objectif est de prioriser les enjeux et d'identifier les pistes d'actions en tenant compte des nouveaux paramètres de la gestion de la ligne. En effet, aujourd'hui, la maintenance ne tient pas compte de l'évolution du climat et l'objectif est donc de comprendre les évolutions attendues pour les intégrer au mieux dans la gestion.

Cette étude a débuté en 2019 et près d'une année a été nécessaire pour établir une stratégie et une méthode d'étude. En termes d'organisation, un chef de projet a été désigné et a assuré le pilotage du projet et la coordination entre les prestataires mobilisés (apport méthodologique) et les experts métiers LISEA/MESEA (contribution sur la connaissance de la ligne et sur l'expertise ferroviaire). Une vingtaine de ressources internes LISEA/MESEA ont été sollicitées (entretien, transmission de documents, relecture des livrables et ajustements, etc.).

LISEA s'est appuyé sur le CEREMA et sa méthode d'analyse dite L3 datant de 2015⁽²⁶⁾. Deux objectifs ont été soulevés :

- comprendre et analyser les changements climatiques dans le périmètre géographique de la ligne ;
- analyser les impacts potentiels sur les aspects de la disponibilité de la ligne, de la maintenance et du renouvellement.

La première étape de cette étude était de définir son cadre. Pour ce faire, ils ont choisi deux scénarios proposés par le GIEC, un scénario réaliste et un scénario pessimiste⁽²⁷⁾.



► La deuxième étape était de cadrer l'espace-temps de l'étude. L'espace géographique a donc été délimité par le linéaire ferroviaire, les bassins versants et les installations aux abords. L'horizon temporel a été défini pour un avenir proche (avant 2050) et à moyen terme (avant 2075).

L'étude basée sur l'analyse des données a été réalisée en 7 séquences :

- identification des aléas climatiques auxquels le secteur géographique est confronté ;
- identification des composants du système étudiés ;
- analyse des sensibilités physiques et fonctionnelles des composants du système ;
- analyse des données climatiques ;
- notation via une échelle des sensibilités face aux aléas climatiques identifiés ;
- cartographie des résultats ;
- analyse des vulnérabilités en croisant la sensibilité avec l'exposition face au risque.

Dans cette deuxième étape, le travail primordial était de décomposer le patrimoine puis de mesurer la vulnérabilité par classe d'actifs selon les différents types d'aléas climatiques.

LISEA s'est également appuyé sur l'expertise d'autres acteurs comme VINCI Autoroute, le projet Contournement de Nîmes-Montpellier (CNM), SNCF Réseau, etc. Le benchmark a été utile pour l'identification des risques, la mise en

cohérence des pratiques et la méthodologie de traitements des risques.

Les risques immédiats identifiés sont notamment les feux de forêts et les mouvements de sols causés par le retrait et le gonflement des argiles. Ces deux risques ont été identifiés avec un impact important sur l'exploitation du réseau. En complément les risques identifiés à échéance plus lointaine sont :

- le risque lié à l'élévation des températures sur les caténaires ;
- le risque lié aux températures extrêmement basses qui ont un impact sur les appareils de voie par exemple.

Les actions à mettre en place sont, à court terme, le renforcement de la maîtrise de la végétation autour des sites connus pour les incendies. Il est également prévu de travailler sur un système d'évaluation de la sensibilité aux mouvements de retrait et le gonflement des argiles.

À moyen-long terme, il est prévu d'établir un plan d'adaptation qui précisera des actions de moyen et long terme avec une priorisation des actions (impact/coût/efficacité).

Il est également prévu dans l'organisation de l'entreprise de maintenir un chef de projet en charge du pilotage de ces missions.

(26) Méthode décrite dans le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), cette méthode a d'abord été testée sur des infrastructures routières, portuaires avant d'être appliquée aux infrastructures ferroviaires à l'aide de SNCF Réseau.

(27) Scénario réaliste : RCP 4.5 où une stabilisation des émissions de GES avant la fin du XXIe s à un niveau moyen est envisagé. Scénario pessimiste : RCP 8.5 où les émissions de GES continues de façon soutenue durant le XXIe s

1b • La ligne du Contournement de Nîmes et Montpellier

► OC'VIA est le concessionnaire et le gestionnaire d'infrastructure de la ligne LGV du Contournement Nîmes-Montpellier (CNM). CNM est une ligne nouvelle longue de 60 km, mise en service en 2017 qui a la particularité d'être une ligne LGV ouverte au trafic TGV et fret. OC'VIA s'est vu confier le financement, la conception, la construction ainsi que la maintenance de la ligne.

Tout comme LISEA, OC'VIA a également initié en 2021, une évaluation de la résilience de la ligne. Cette étude a été motivée par l'intensification des événements climatiques et de leur fréquence sur les cinquante dernières années (chaleur, tempêtes). Elle a également été motivée par des considérations économiques.

L'objectif de cette étude est d'estimer les coûts du changement climatique. La méthodologie a été sensiblement la même que pour LISEA à la différence qu'ils se sont appuyés sur l'expertise d'un organisme privé. Ils se sont également appuyés sur deux scénarios du GIEC plus récents⁽²⁸⁾. Le périmètre de l'étude a été plus ciblé et les systèmes suivants ont été analysés :

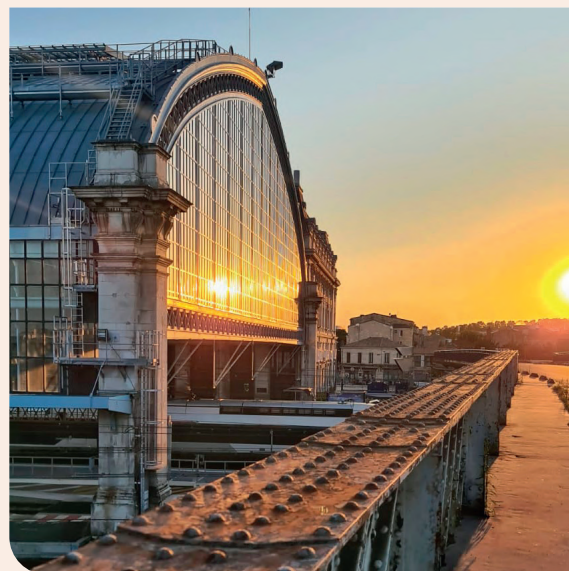
- les ouvrages en terre et de génie civil ;
- les ouvrages hydrauliques ;
- les ouvrages d'art ;
- la voie ferrée ;
- la signalisation ferroviaire ;
- la caténaire ;
- l'énergie HT/BT et les télécoms ;
- les bâtiments ;
- les abords.

Trois étapes ont été nécessaires pour réaliser cette étude. La première a été d'étudier l'exposition aux risques climatiques et l'évolution dans le temps. La deuxième a été d'analyser le niveau de préparation et le degré d'adaptation aux risques liés au changement climatique. Enfin, il a été nécessaire d'identifier et de formuler des recommandations d'adaptation stratégiques.

Ils ont établi une liste de huit aléas climatiques considérés comme génériques :

- inondations ;
- précipitations extrêmes/épisodes cévenols ;
- températures élevées (supérieures à 34 °C) ;
- incendie ;
- vents forts/tempêtes hivernales ;
- orages ;
- températures basses (inférieures à -5 °C) ;
- neige.

Ils ont ensuite établi une matrice des risques en croisant la gravité de l'impact avec la probabilité d'occurrence de l'aléa climatique. L'échelle de gravité est divisée en quatre, allant du plus faible au plus extrême.



(28) Le SSP2-4.5 : scénario conforme aux politiques climatiques actuelles et aux objectifs des contributions déterminées au niveau national pour 2030. Ce scénario devrait conduire à un réchauffement au milieu du siècle de 1,6 à 2,5°C.
Le SSP5-8.5 : scénario conduisant à un réchauffement climatique de 1,9 à 3°C au milieu du siècle, scénario le plus pessimiste, mais seulement 0,4°C de plus que le scénario SSP2-4.5 au milieu du siècle.

Ce travail a permis de cibler deux risques majeurs pour l'exploitation de la ligne. Premièrement, l'augmentation des précipitations extrêmes (fréquence et intensité) a été identifiée comme risque majeur notamment sur les ouvrages en terre. Deuxièmement, l'augmentation des températures et le risque d'incendie affectent les installations de signalisation, la voie et la caténaire par déformation ou destruction avec nécessité de remplacements des installations.

Face à ces constats, l'étude a démontré la résilience de la ligne et l'efficacité de la maintenance. Dans un second temps, OC'VIA a établi des mesures d'adaptation prioritaires. Par exemple, concernant le risque d'incendie, les zones de freinage des trains de fret ont été identifiées

1c • Le gestionnaire historique français

► En tant que gestionnaire du réseau ferré national, SNCF Réseau commercialise l'accès au réseau, gère les circulations (voyageurs et fret) et assure la maintenance des infrastructures ainsi que leur développement.

Pour SNCF Réseau, la stratégie d'adaptation au changement climatique est fondée sur les vulnérabilités actuelles et futures. L'anticipation des événements chroniques et extrêmes est en cours. La mise au point et le déploiement seront progressifs et sur une vision à long terme.

Au sein de cette organisation, il a été créé une division Risques naturels et technologiques (RNT) qui s'appuie sur les autres directions de SNCF RESEAU pour notamment : rédiger et mettre à jour la politique du domaine RNT, appuyer le déploiement de la politique du domaine RNT, suivre la mise en œuvre de la politique, définir les orientations et les plans d'actions sur les risques qu'elle anime, suivre et exploiter l'incidentologie, réaliser une veille réglementaire, événementielle et technique et représenter SNCF Réseau sur les sujets en

comme zone à risque de départ de feu. Afin de limiter la probabilité d'un départ de feu dans le périmètre de CNM, la recommandation associée est de traiter de manière renforcée (en fréquence et en surface) la végétation autour de ces zones. Le bénéfice identifié est donc de réduire le risque d'interruption de trafic et de réduire les dégâts causés à l'infrastructure.

Pour aller plus loin sur d'autres sujets OC'VIA expérimente également la télésurveillance climatique connectée (température du rail, température de l'air, la pluviométrie) et la prise en compte de ces données dans les REX incidentologie.

interface au niveau national (ministères, autres opérateurs de réseaux). La division RNT n'est pas responsable de la définition de la stratégie d'adaptation au changement climatique de SNCF Réseau mais y contribue par ses missions décrites ci-avant.

Cette division RNT a donc procédé à l'identification des risques naturels et technologiques auxquels SNCF Réseau est exposé. Ils ont ensuite regroupé ces risques par méthodes de traitement communes, impacts similaires sur l'infrastructure et les circulations, procédures, réglementations internes similaires.

Ainsi les aléas climatiques considérés comme redoutables sont :

- des vents violents / cyclones et tornades ;
- un froid extrême (givres, etc.) et les intempéries neigeuses ;
- une chaleur extrême ;
- le risque rocheux (chute de blocs, avalanches, etc.) ;
- le risque hydraulique (inondations, coulée de boue, érosion) ;
- les intrusions animales ;
- le risque meuble (glissement de terrain) ;
- les fontis (cavités, mines, etc.) ;
- les séismes ;
- le risque lié à la végétation (arbres dangereux, masquage des signaux) ;
- la foudre.

Ils ont ensuite procédé à une analyse de risque basée sur l'incidentologie en prenant en compte la fréquence et la gravité avérée des risques. Le positionnement des risques dans une matrice est revu chaque année en fonction de l'incidentologie des années précédentes ayant eu un impact sur la sécurité. Cette matrice permet une vision à court/moyen terme. Cette stratégie ne prend en compte que la gravité avérée du risque, notamment parce que SNCF Réseau dispose d'une base de données importante sur son incidentologie.

Sachant que les aléas climatiques ne sont pas la seule cause des incidents (vieillesse des ouvrages, défaut de conception, d'entretien), le risque identifié avec la plus haute gravité est le risque hydraulique suivi du risque rocheux avec un niveau de gravité moindre, puis du risque lié à la végétation et du risque lié à la foudre.



La politique de sécurité de SNCF Réseau sur les RNT est une stratégie à court/moyen terme basée sur une échelle de données microscopiques : localisées sur un site et donc à un climat actuel. Elle est également basée sur une identification et une cotation des risques en fonction de l'incidentologie avérée. Cette priorisation oriente les actions de prévention, protection, d'alerte, et de gestion de crise ainsi que les éventuelles révisions des normes de conception, des processus, en fonction d'incidents passés.

La politique de sécurité du domaine RNT, expliquée précédemment, alimente une stratégie d'adaptation au changement climatique à plus long terme. Cette stratégie d'adaptation se base plutôt sur une échelle de données macroscopiques : sur un territoire avec un maillage de plusieurs kilomètres. L'identification des risques est établie en fonction des scénarios climatiques et des vulnérabilités du système ferroviaire. Elle permet d'adapter les sujets liés à la maintenance, la production, la régénération ou le développement du réseau. Ils peuvent, par exemple, permettre de prioriser des régions les unes par rapport aux autres notamment en fonction des aléas les plus problématiques. Cette stratégie d'adaptation induit également une prise de conscience qui participe à la mise en œuvre de la politique de sécurité.



2 • Les initiatives d'Entreprises Ferroviaires

2a • Le transport de marchandise : FRET SNCF

► **Fret SNCF est une entreprise ferroviaire française. Filiale de la SNCF, elle fait partie de Rail Logistics Europe, le pôle fret et logistique ferroviaire du groupe SNCF.**

C'est dans le cadre de la stratégie d'adaptation du groupe SNCF, que Fret SNCF prend part aux politiques visant à la résilience de l'activité ferroviaire. Le groupe SNCF a, depuis longtemps, mis en place une stratégie d'adaptation face aux conditions météorologiques. C'est ainsi que, par le biais de l'expertise de SNCF Réseau, le groupe SNCF a établi des campagnes d'actions selon les saisons. En effet, ils ont mis en place des actions spécifiques pour la « saison chaude », pour le « patinage/enrayage » et pour la « saison froide ».

Les conditions climatiques exceptionnelles ont amené Fret SNCF et SNCF Réseau à devoir modifier des procédures et cadrer des activités jusqu'alors non identifiées. En effet, en 2021 un grave accident survenu en Rhône-Alpes a conduit SNCF Réseau à cadrer les opérations de déneigement des appareils de voie. Deux opérateurs de Fret SNCF ont dû réceptionner une desserte sur une ITE⁽²⁹⁾ or l'appareil de voie situé en amont était couvert de neige et ne pouvait pas fonctionner. L'opérateur a donc pris la décision de déneiger cet appareil de voie et a engagé la zone dangereuse de la voie principale contiguë. L'opérateur a malheureusement été heurté par une circulation TER. De cet événement grave et marquant a découlé une modification de procédure. Dorénavant, les opérateurs des EF ont l'interdiction de déneiger les appareils de voie. C'est SNCF Réseau qui se charge de cette mission qui est maintenant cadrée dans un texte réglementaire SNCF.

Autre événement, cette fois dû aux fortes chaleurs : un incendie s'est déclaré à cause d'un blocage de roue. Les dégâts sur l'infrastructure

ferroviaire, mais aussi sur le voisinage ont été considérables. Ces faits marquants poussent Fret SNCF à établir des retours d'expérience pour prendre en compte les risques et mettre en place des mesures conservatoires et des actions correctives. Fret SNCF utilise ainsi son REX comme une forme d'analyse continue des risques.

L'entreprise se dit sensible aux aléas climatiques tels que les fortes chaleurs. Elles ont un impact sur le matériel roulant (distributeurs, phénomène de « fer collé », problèmes dans les conduites pneumatiques). Les fortes chaleurs ont également un impact sur les circuits électroniques et informatiques qui nécessitent une climatisation efficace. En guise de mesures préventives, Fret SNCF réalise une maintenance préventive de l'ATS⁽³⁰⁾ pour la saison chaude, ils ont également des mesures spécifiques liées à l'informatique embarquée. Les fortes chaleurs peuvent aussi entraîner des conséquences sur le captage du courant. Il est donc prévu des visites régulières sur les toitures des engins moteurs pour déceler tout dysfonctionnement.

Le matériel roulant est également sensible aux vagues de froid (gel de la timonerie) et les phénomènes de redoux qui apportent de l'humidité dans les différents circuits. En guise de mesures préventives, Fret SNCF prévoit par exemple le préchauffage des engins moteurs, la vidange des bâches à eau et la maintenance préventive des ATS. Elle prévoit également la visite préventive des toitures des engins moteurs comme pour les fortes chaleurs. Il est également prévu d'adapter les pantographes des engins moteurs pour racler le givre sur la caténaire. Enfin, une vigilance est désormais accrue sur les signalements d'anomalies sur le matériel dues à la neige, au gel ou au givre.

(29) Site industriel privé

(30) Automatic Train Stop : l'arrêt automatique de train ou ATS est un système embarqué sur un train qui arrête automatiquement un train si certaines situations se produisent (opérateur ferroviaire insensible, tremblement de terre, rail déconnecté, train dépassant un signal d'arrêt, etc.) pour éviter les accidents

Les vents forts sont également identifiés comme problématiques. Ce phénomène peut provoquer des déraillements de trains. Enfin, l'impact des inondations constitue un futur axe de travail compte tenu des bouleversements climatiques que l'entreprise subit depuis quelques années.

D'autres mesures sont également mises en place pour pallier d'autres risques identifiés. Par exemple, des mesures concernant les installations fixes, des mesures organisationnelles dans le cadre de la SST (Santé, Sécurité au Travail), des mesures pour le matériel roulant (moteur ou remorqué) ou des mesures concernant les procédures de sécurité au sol ou en conduite dans le cadre de la Sécurité de l'Exploitation Ferroviaire.

2b • Le transport de voyageurs : RENFE

► **RENFE est la compagnie ferroviaire nationale de voyageurs espagnole. Elle intervient notamment à la frontière entre la France et l'Espagne pour faire circuler des TGV jusqu'à Marseille et Lyon.**

Les préoccupations de la RENFE au sujet des risques liés au changement climatique sont grandissantes et ont fait l'objet de discussions internes. Les inquiétudes de l'entreprise espagnole sont tournées vers les aléas climatiques extrêmes qui impactent le pays ainsi que le Sud de la France, à savoir :

- les pluies torrentielles ou inondations ;
- les vents extrêmes ;
- les vagues de chaleur extrême ;
- les changements de températures soudains sur une même journée ;
- les incendies extrêmes qui affectent le chemin de fer.

Outre les impacts sur l'infrastructure ferroviaire déjà mentionnés, la RENFE a identifié d'autres impacts notamment sur la gestion des situations d'urgences et l'autoprotection. Cela inclut la modification des périodes saisonnières pour le lancement des plans de prévention des saisons chaudes et froides. Est également incluse la réduction des délais d'intervention d'urgence dans des conditions extrêmes (transbordements, évacuations, conditions de confort, etc.).

Concernant le matériel roulant des adaptations doivent être envisagées comme l'amélioration de la performance des nouveaux matériels

(système de climatisation et de chauffage par exemple). De même, lors de la phase de construction de nouveau matériel, une réflexion devra être menée sur l'adaptation des plages de températures de fonctionnement.

Selon la RENFE, il est également important de s'intéresser aux méthodes de gestion de l'information et de coordination entre les autorités/acteurs impliqués dans les situations d'urgence. Ils ont ainsi défini cinq points d'améliorations :

- la coordination entre les acteurs et les autorités pour limiter les pertes de connexion et la perte d'information ;
- la gestion de l'information pour la détection des variations climatiques extrêmes ;
- les outils de prévision météorologique centrés sur les phénomènes locaux et adaptés au tracé de la voie ;
- l'utilisation du Big Data, de l'intelligence artificielle (etc.) comme peut le faire le secteur aérien ;
- la cartographie des points chauds et froids.

Pour conclure, la RENFE est convaincue qu'une centralisation des mesures et des actions entre les différentes parties prenantes est nécessaire à la performance de son système. Cela passe par exemple par le développement de nouveaux logiciels de gestion de l'information. Par ailleurs, la RENFE estime nécessaire d'analyser l'impact que pourrait revêtir le changement climatique dans la gestion des risques dans le cadre du travail.

3 • Les initiatives de l'EPSF

► **L'EPSF, en tant qu'autorité nationale de sécurité (ANS) française, joue un rôle d'accompagnement sur les sujets d'actualité qui animent le secteur ferroviaire (sécurité, règlements, innovations technologiques, etc.). Établissement public indépendant, l'EPSF mène une activité de surveillance de l'ensemble du secteur qui lui confère une vision macroscopique du système ferroviaire français. Cela lui permet notamment de partager et de sensibiliser les acteurs sur les sujets de demain surtout pour ce qui concerne la sécurité.**

Le secteur ferroviaire est un domaine où se côtoient de nombreux experts sur différentes thématiques. Ils sont amenés à travailler ensemble dans l'objectif de faire circuler des trains dans les meilleures conditions de sécurité et de productivité. Au niveau national, l'EPSF organise divers temps d'échanges, planifiés au cours d'une année, dans un objectif de partage des connaissances et de retour d'expérience. C'est un moment privilégié où les membres du secteur sont invités à prendre la parole et présenter leurs travaux, bonnes pratiques ; des débats y sont menés, des réponses et éclaircissements sont apportés. Ces temps d'échanges permettent également d'aborder des sujets plus globaux comme la résilience du système ferroviaire face au changement climatique. La coopération entre les différents acteurs est plus que jamais nécessaire afin de progresser ensemble plus rapidement vers des solutions adaptatives au changement climatique.

Dans sa mission de veille de la sécurité, l'EPSF récolte l'ensemble des événements de sécurité qui surviennent sur le SFN. Ces remontées d'événements permettent dès aujourd'hui d'effectuer une veille du niveau de la sécurité, d'élaborer des statistiques et de compléter le retour d'expérience afin de s'adapter au mieux au changement climatique.

De plus, l'Établissement public de sécurité ferroviaire a fait le choix en 2023 d'interroger les exploitants ferroviaires sur leur niveau présumé de maturité sur les questions en lien avec le changement climatique. L'EPSF a pour volonté de mesurer le niveau de prise en compte de ces changements et des réflexions en cours sur la question. Ce travail aura pour vertu d'être partagé au secteur pour initier autant que possible la prise en considération des risques liés au changement climatique.

Au niveau international, le « NSA Network » supervisé par l'ERA⁽³¹⁾, regroupe l'ensemble des ANS européennes. L'EPSF y participe en tant qu'ANS française en soumettant des initiatives au niveau international. Dans ce contexte, l'EPSF en collaboration avec l'OFT⁽³²⁾, a interrogé ses membres pour mesurer le positionnement des pays européens sur les enjeux liés au changement climatique. Ce travail a notamment pour objectif de recueillir les événements marquants relevés par les ANS et leurs initiatives sur la question du changement climatique, les risques associés et les actions mises en place.



(31) Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer

(32) Office Fédéral des Transports : National Safety Authority Switzerland

4 • Les témoignages et initiatives d'autres pays européens

► L'EPSF a recueilli les témoignages de plusieurs ANS européennes. Ces témoignages permettent de mettre en lumière les faits marquants survenus dans les pays européens voisins, les études menées et les actions engagées ou à venir.

4a • L'enquête auprès du NSA Network

Le NSA Network est un groupe d'échange formé de l'ensemble des ANS européennes et de l'ERA. Ce groupe se réunit plusieurs fois par an pour échanger autour des évolutions (réglementaire, technologique, etc.) du secteur ferroviaire européen.

Dans ce contexte, l'EPSF, allié à l'OFT (ANS Suisse), a décidé de mener une enquête sur les impacts du changement climatique sur le système ferroviaire européen. Les quelques questions ont eu pour objectif de dépeindre rapidement le contexte du pays concerné, les événements climatiques récurrents auxquels il est confronté, leurs conséquences et les actions mises en œuvre.

Les réponses obtenues illustrent un large panorama des différents contextes climatiques présents en Europe. Pour permettre l'analyse de ses réponses voici quelques prérequis :

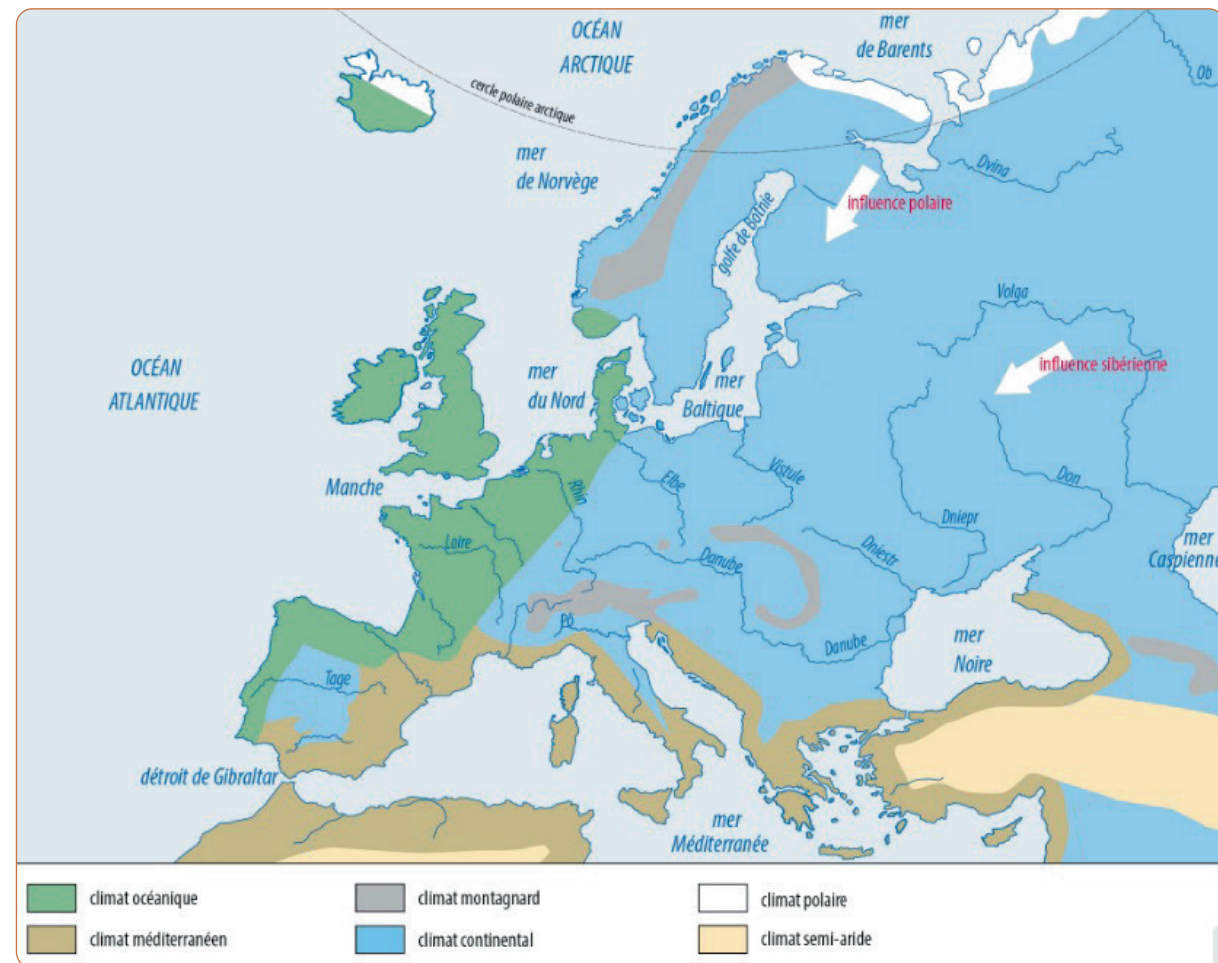


Figure 9 : carte des climats macroscopiques européens (source : www.universalis.fr)

Il existe six grands types de climat en Europe : océanique, continental, montagnard, méditerranéen, semi-aride et polaire. Ces climats sont des macroclimats qui caractérisent de grandes zones géographiques. Il s'agit d'une tendance annuelle. On s'intéresse à trois climats en particulier.

Le climat océanique est caractérisé par une faible amplitude de température, la différence entre la température moyenne estivale et la température moyenne hivernale est relativement faible (différence maximale 10°C). Il se caractérise donc par un hiver doux et un été chaud. Ce climat entraîne très souvent des intempéries accompagnées de précipitations et d'humidité abondantes. Ce climat se retrouve principalement sur la côte atlantique.

Les climats continentaux sont présents dans les zones reculées de la côte aux latitudes moyennes. Bien qu'il s'agisse d'un climat tempéré, un climat continental est considéré comme un climat extrême en raison des variations considérables de température au fil des mois. Les températures peuvent descendre jusqu'à -20°C en hiver et jusqu'à 30°C en été. Le printemps et l'automne sont très courts, passant souvent directement de l'hiver à l'été et inversement. Les précipitations sont faibles en raison de l'éloignement de la côte. Les précipitations se concentrent sous forme d'orages violents en été et sous forme de neige en hiver. Ces zones sont également sensibles aux incendies de forêt.

Le climat de montagne est le climat qui caractérise les différentes régions de montagne, quelle que soit la zone climatique dans laquelle elles se situent. Il se caractérise par des hivers froids et des étés frais et humides. Dans chaque zone climatique, les rythmes de température et de précipitations du milieu montagneux ressemblent beaucoup à ceux des plaines voisines, mais la température est plus basse et les précipitations augmentent jusqu'à une certaine altitude.

L'analyse des sept réponses obtenues a donc été réalisée sous le prisme des trois macro-climats décrits ci-dessus.

De cette enquête, il ressort plusieurs chiffres clef qu'il convient d'exposer dans ce rapport. Ainsi, 86 % des enquêtés reconnaissent la survenue

d'événements majeurs causés par une météo exceptionnelle sur les cinq dernières années. A titre d'exemple, en Suisse, de climat plutôt continental, deux déraillements ont été causés par de fortes rafales de vent entraînant des conséquences corporelles pour les voyageurs et des conséquences financières pour la compagnie. Dans un autre pays, cette fois-ci à dominante climatique océanique, il est tombé 80 à 100 mm de pluie en quelques heures. Un passage souterrain d'une gare a été inondé et les escaliers mécaniques et ascenseurs ont cessé de fonctionner. D'autres routes et tunnels pour vélos/piétons sous la voie ferrée ont également été inondés. Enfin, dans un pays à tendance climatique continental, un incendie de talus a endommagé l'infrastructure ferroviaire et la voie a dû être fermée. Le feu s'est propagé aux maisons voisines et a fait plusieurs blessés.

Les signes du changement climatique sont d'ores et déjà visible en Europe. D'après les résultats obtenus, nous avons pu dresser un tableau des événements climatiques les plus redoutés en Europe :

- 1 • Les rafales de vent
- 2 • Les fortes précipitations
- 3 • Les fortes températures (ou les changements de températures soudains)
- 4 • Les glissements de terrain et les chutes de pierres
- 5 • Les fortes chutes de neige
- 6 • La sécheresse
- 7 • Les feux de talus/végétation

Cette liste d'événements climatiques redoutables est à croiser avec la liste suivante indiquant les composantes du système ferroviaire les plus sensibles, selon les réponses obtenues :

- 1 • Les dommages sur l'infrastructure
- 2 • Les collisions du matériel roulant avec des obstacles
- 3 • Les dommages à la caténaire
- 4 • Le trafic perturbé ou interrompu
- 5 • Les déraillements
- 6 • Les dommages sur le matériel roulant
- 7 • Les feux de forêts
- 8 • La sécurité

Les principaux risques identifiés pour le futur par les ANS interrogées sont notamment des températures plus élevées qui entraîneront plus de déformations de voies, des incendies de forêt, des risques de pannes électroniques. L'alternance des températures entraînera, par exemple, des problèmes dans le rail, mais également dans les ouvrages en terre (remblai) à cause du retrait - gonflement des sols. Des difficultés seront à prévoir lors de la construction ou du remplacement des voies pour fixer une température de référence. Une maintenance préventive sera prolongée pour les fortes chaleurs pouvant entraîner un retard dans les activités opérationnelles de maintenance. Il faudra prévoir l'évacuation des passagers en raison d'un trafic perturbé et de véhicules défectueux. Il faudra également veiller aux conditions de travail des employés travaillant sans protection dans un climat plus chaud.

Pour s'adapter à ces phénomènes climatiques redoutables et pallier les conséquences sur le système ferroviaire redoutées, certains pays européens ont mis en place des actions. Des analyses de risques sont menées dans différents pays européens. Des outils d'aide à la prévision météorologique sont développés, des cellules d'échange entre différentes parties prenantes et décisionnaires sont créées (service météorologique, service hydrologique, spécialiste du climat, protection civile, politiques, etc.).

D'autres pays européens ont choisi de réglementer certains points de leur lutte contre les effets néfastes du changement climatique. A l'instar d'un pays au climat océanique qui a choisi de cartographier les zones les plus sensibles aux événements climatiques extrêmes et d'adapter les directives techniques de l'infrastructure et du matériel roulant (système de drainage et voiture climatisée par exemple). Dans un pays au climat continental, une loi impose une distance minimale entre les arbres implantés et le bord de voies. Cette même loi s'applique également pour protéger la voie des congères en hiver.

Alors que, dans un autre pays au climat continental, il a, d'une part, été décidé de renforcer les lignes aériennes de contacts pour prévenir les tempêtes de vents, mais surtout, il a été décidé de construire des paraneiges et paravents en créant des rangées d'arbres le long de la voie. On remarque ainsi la différence entre deux pays de même dominante climatique qui régulent la végétation aux abords des voies de manière stratégiquement antagoniste, l'un comme un potentiel obstacle, l'autre comme une potentielle protection. Ce qui montre que chacun doit s'assurer de la cohérence des actions mises en place face aux vulnérabilités et aux risques identifiés.

Un plan d'adaptation a été établi dans un pays à tendance climatique océanique et comprend des mesures spécifiques pour le secteur ferroviaire⁽³³⁾. Les mesures les plus pertinentes pour le secteur ferroviaire sont :

- cartographier la sensibilité de l'infrastructure ferroviaire aux différents événements météorologiques extrêmes pour une planification à long terme ;
- adapter des directives techniques pour la conception et la construction de nouveaux ouvrages de drainage ferroviaire par les gestionnaires de l'infrastructure ferroviaire ;
- gérer des conditions météorologiques particulières ;
- analyser les impacts du changement climatique sur les services essentiels pour la société.

Pour conclure cette enquête, plusieurs dizaines d'études différentes ont été menées dans les différents pays européens, elles sont disponibles en annexe 3.

4b • L'étude menée par Network Rail

► Network Rail possède, exploite et développe l'infrastructure ferroviaire britannique et est responsable de la gestion d'une vingtaine des plus grandes gares du Royaume-Uni. Le réseau britannique se compose de 17 000 km de lignes dont 7 200 km sont électrifiés.

Dans leur objectif d'assurer la sécurité et l'opérationnalité du réseau britannique, Network Rail a réalisé une étude⁽³⁴⁾ afin de comprendre les impacts liés aux conditions météorologiques sur les performances du réseau.

Partant d'un constat simple sur les coûts en termes financiers et temporels des événements climatiques exceptionnels, Network Rail a cherché à dresser une liste des aléas climatiques les plus impactant pour le réseau britannique. Après la réalisation d'une analyse de risque, ils connaissent désormais les risques les plus redoutables sur leur réseau. Cette liste de risques redoutables permet d'alimenter une stratégie nationale d'adaptation face au changement climatique. La suite du développement constitue une synthèse du rapport de l'étude.

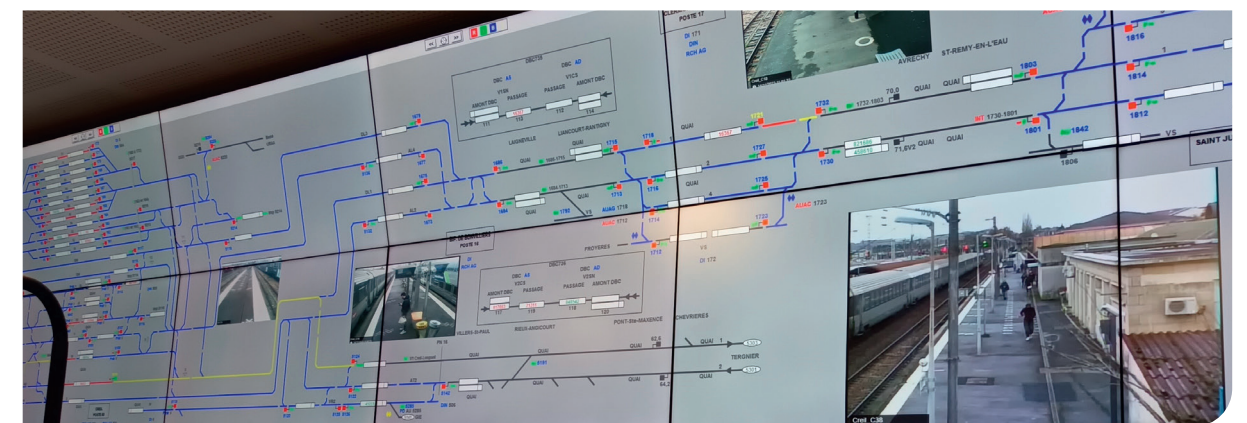
Premièrement, ils ont rassemblé et analysé une grande quantité de données notamment sur les coûts d'indemnisation des retards et la somme des minutes de retard associées depuis 2006-2007. Ils ont attribué ces données à des types d'événements météorologiques spécifiques et ont enregistré les valeurs de coût et de minutes perdues pour chaque incident. Bien que les impacts météorologiques défavorables et extrêmes varient considérablement d'une année à l'autre, cet ensemble de données sur 15 ans permet d'identifier certaines tendances générales.

Les variables climatiques identifiées par Network Rail comme potentiellement impactantes sur le réseau et évaluées sont :

- la neige, la glace, la grêle, l'hiver/printemps long et humide, la pluie abondante/averse, la pluie légère/bruine ;
- l'élévation du niveau de la mer, l'érosion côtière, inondation côtière, onde de tempête ;
- les températures extrêmement froides, les journées extrêmement chaudes, la vague de chaleur, une température moyenne plus élevée, une grande plage de températures diurnes, un été long/chaud/sec, l'éblouissement par le soleil ;
- la foudre, les vents violents, les tempêtes.

Ces aléas climatiques sont reconnus comme impactant la sécurité du système ferroviaire. Network Rail a notamment identifié quelques risques prépondérants face aux événements climatiques exceptionnels dus au changement climatique, par exemple l'adhérence, le froid et les inondations.

La stratégie adoptée en Grande-Bretagne est l'adaptation. Les actions clef de gestion des risques ont été identifiées comme l'établissement de programmes de renouvellement et de remise en état du drainage pour réduire le risque d'inondation.

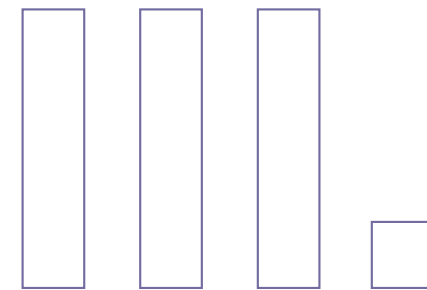


(33) Vers une société résiliente au changement climatique à l'horizon 2050 Mesures fédérales d'adaptation 2023-2026. (2020). Dans Adapt2climate.be.

(34) Troisième Rapport d'Adaptation. Network Rail (décembre 2021). <https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2022/01/Network-Rail-Third-Adaptation-Report-December-2021.pdf>



La synthèse des risques



1 • Les risques redoutables identifiés et leurs conséquences associées

► Les résultats présentés dans ce chapitre ne sont pas exhaustifs et sont le fruit du travail de réflexion conduit au sein de l'EPSF.

Il s'agit d'une réflexion à l'échelle du territoire national, qui de fait, ne peut pas prendre en compte les spécificités et exceptions régionales. Il conviendra alors de prendre cette réflexion comme telle et de compléter au besoin par une expertise plus fine de chaque territoire et pour chaque secteur envisagé.

Les résultats ont été obtenus en identifiant les aléas climatiques dont la probabilité d'occurrence est la plus élevée et plausible sur le territoire français. Ainsi, par exemple, les aléas climatiques tels que les séismes et éruptions volcaniques ont été écartés.

Pour identifier l'impact de ces aléas climatiques sur le système ferroviaire, celui-ci a été décomposé en deux sous-systèmes : infrastructure et matériel roulant. Ces sous-systèmes ont eux-mêmes été décomposés de façon plus fine afin d'obtenir un sous-système ponctuel au regard de l'impact des aléas climatiques. Pour illustrer le propos, l'infrastructure a été décomposée par des sous-systèmes plus fins comme la voie, la signalisation, la caténaire, etc.

Les sous-systèmes identifiés sont à considérer dans un bon état général de fonctionnement où la maintenance est réalisée correctement et dans les délais prescrits. Les résultats ne font donc pas état de sous-systèmes dégradés, cet aspect sera à ajouter par les exploitants ferroviaires. Il sera ainsi nécessaire de faire un état des lieux préalable des différents sous-systèmes et de leur vulnérabilité plus ou moins marquée face à chacun des aléas.

L'objectif est d'identifier les impacts de chaque aléa sur chaque composant du système ferroviaire. Ces impacts sont décrits par un code couleur en fonction de leur gravité. L'échelle de gravité permet de rendre compte de l'impact sur l'exploitation du réseau, allant du plus court terme au plus long terme.

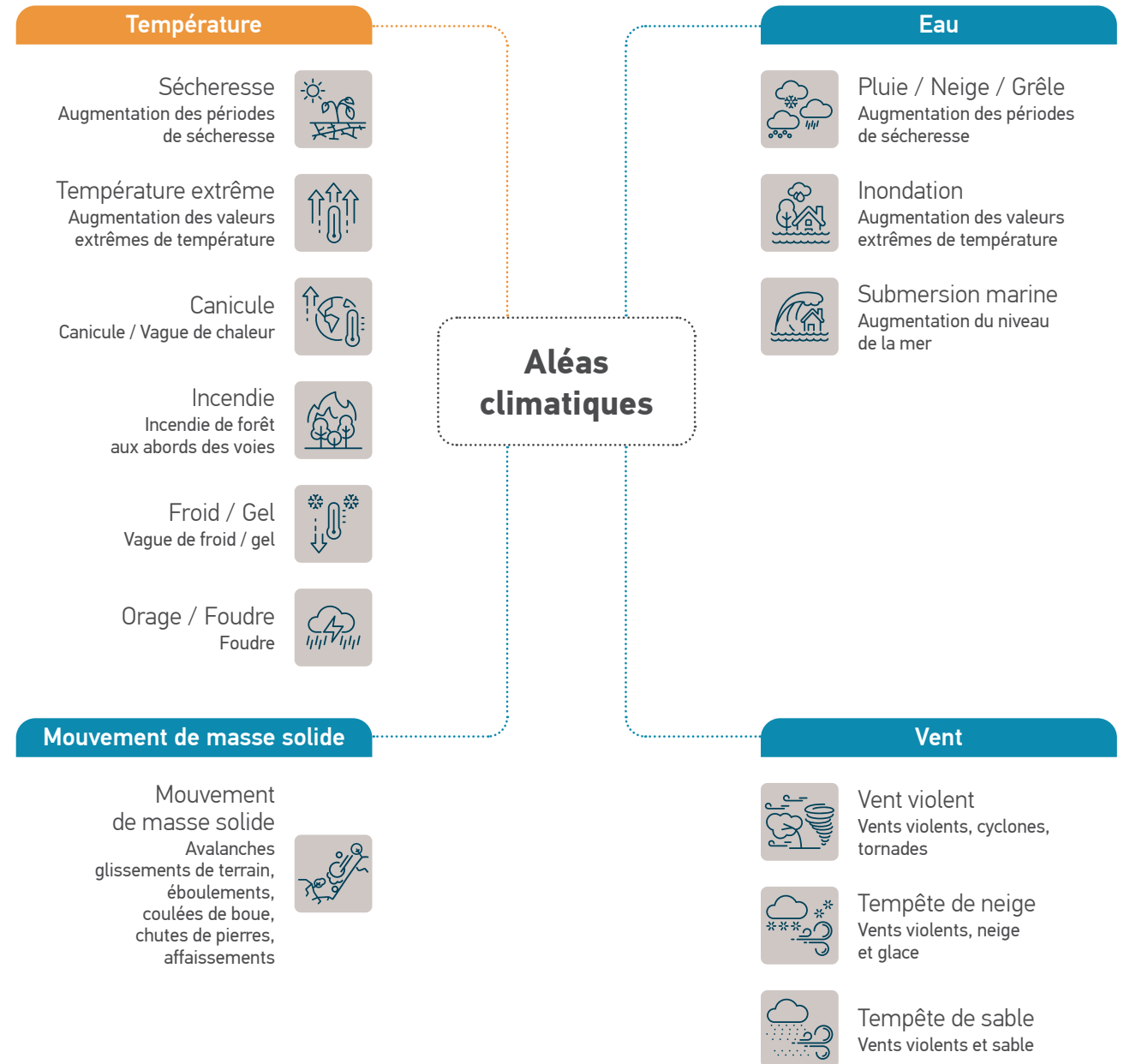
Les résultats sont présentés ci-après sous forme d'iconographie.

Pour aller plus loin, des aléas climatiques peuvent être ajoutés au gré des caractéristiques météorologiques du territoire étudié. Ces travaux pourront également être étayés par les probabilités d'occurrence des aléas climatiques sur les différentes zones étudiées. Une représentation SIG* pourra également servir de support visuel.


* SIG : Système d'information géographique





Légendes des aléas climatiques



Nature des impacts

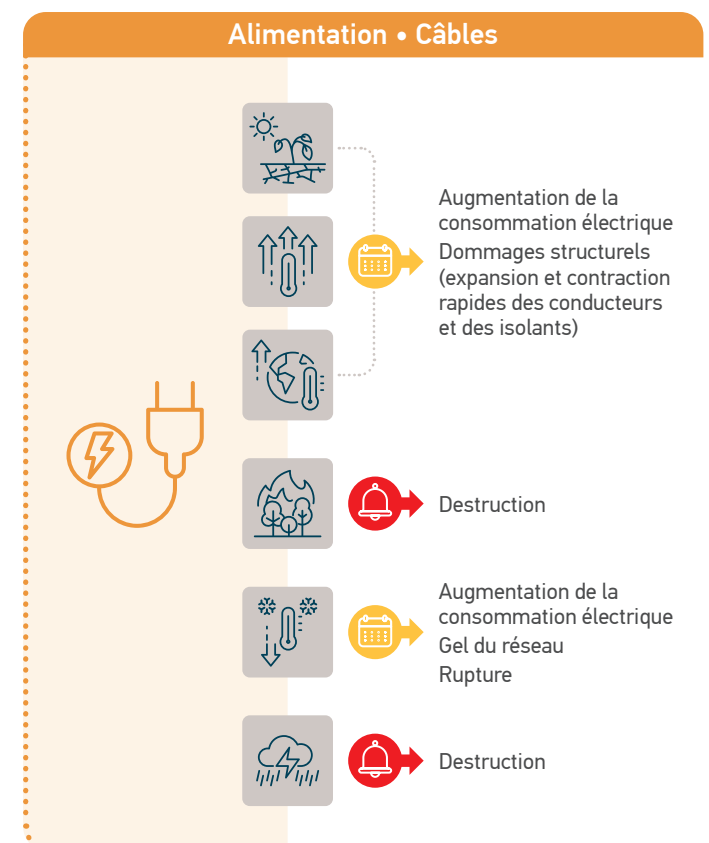
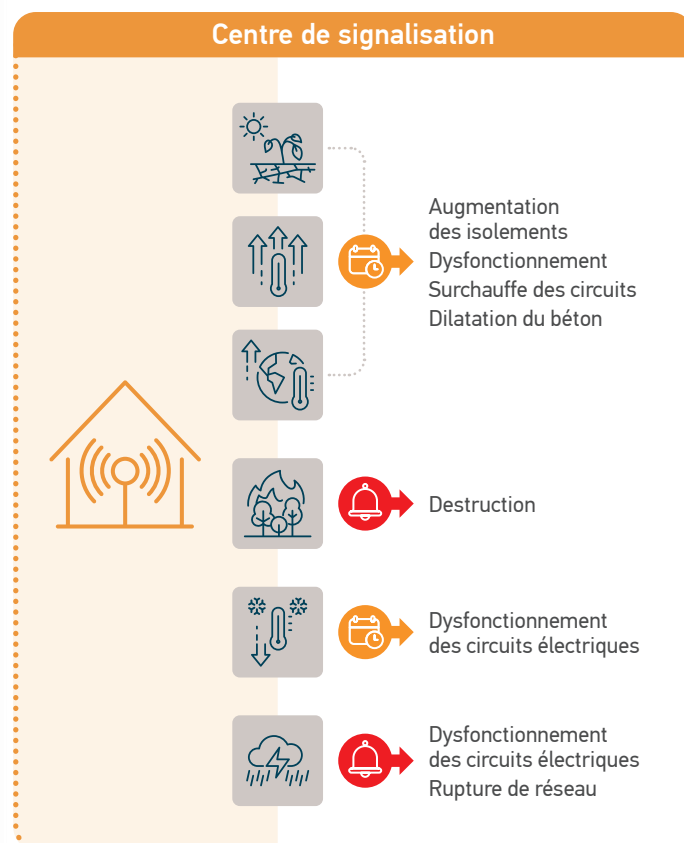
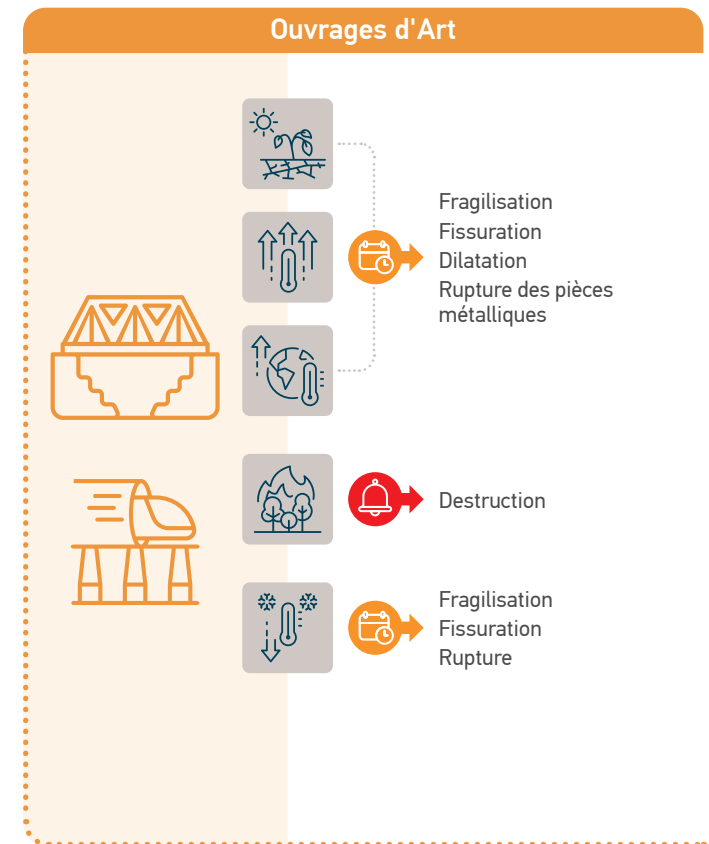
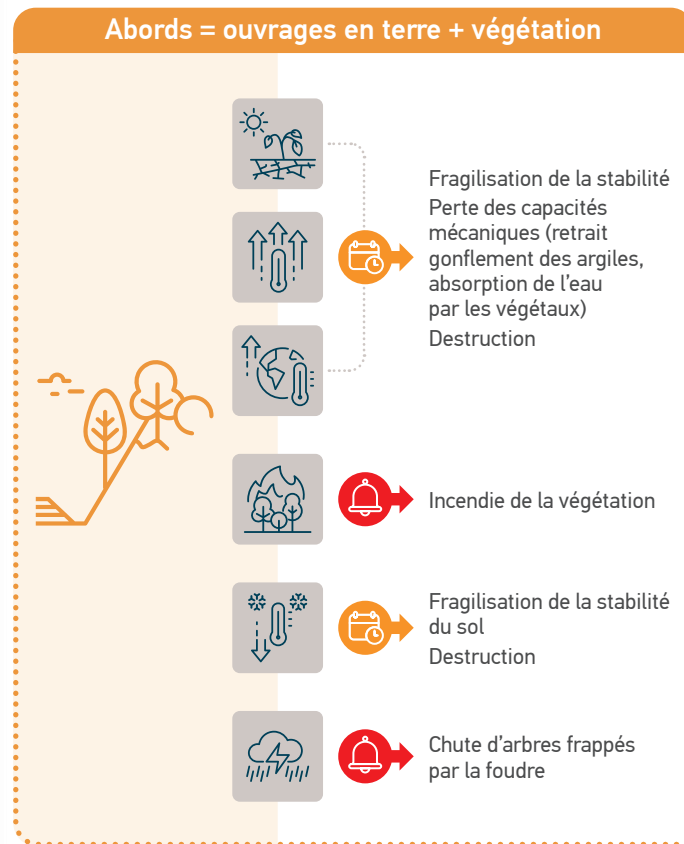
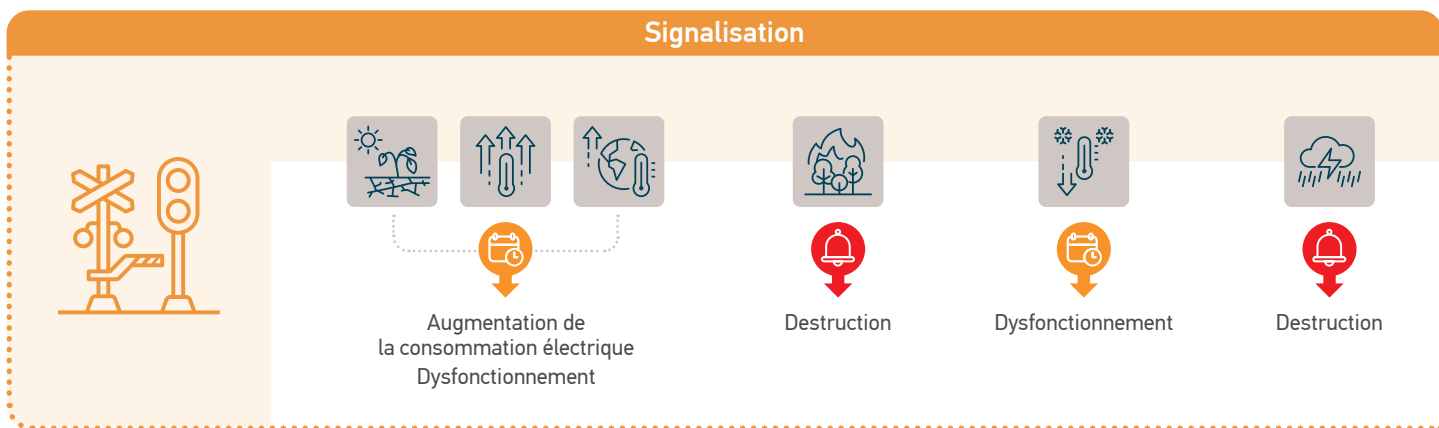
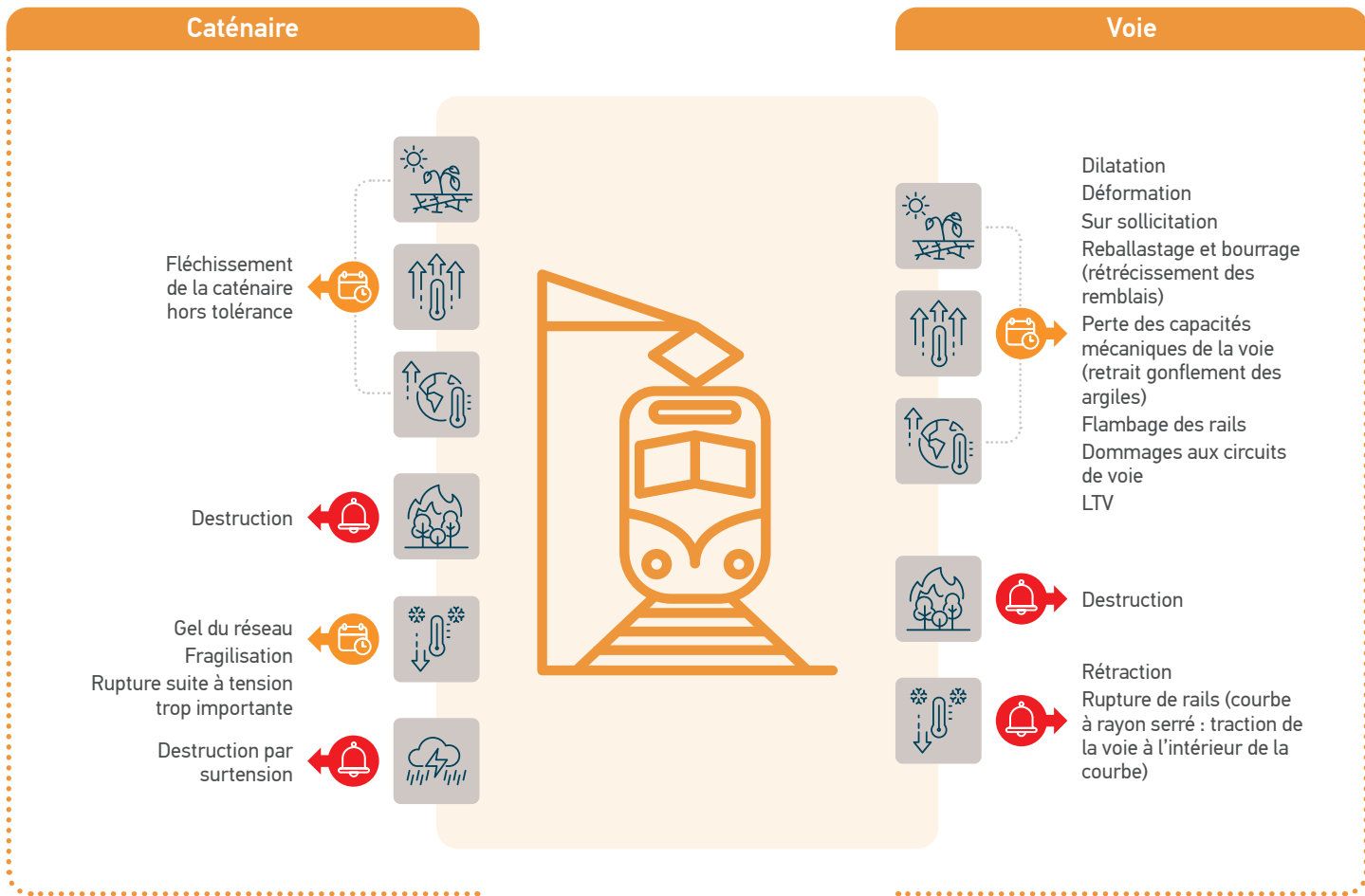
- 

Impact avec **CONSÉQUENCES À LONG TERME**
- 

Impact avec **CONSÉQUENCES À MOYEN TERME**
sur l'exploitation du réseau : mesures adaptatives nécessaires pour la circulation des trains (ex : LTV) et si rien n'est fait, l'arrêt des circulations sera inévitable
- 

Impact avec **CONSÉQUENCES IMMÉDIATES ET MAJEURES**
sur l'exploitation du réseau (ex : arrêt des circulations)

L'impact des aléas climatiques liés à la température sur l'infrastructure ferroviaire



Caténaire

- Dysfonctionnement dû à l'humidité
- Dommages structurels
- Dommages structurels Arrachement de câbles
- Formation de bloc de glace Gel de l'ensemble du système
- Destruction

Voie

- Saturation des sols
Perte des caractéristiques mécaniques
Perte de résistance du ballast
- Eau stagnante
Dommages
Défaillance des circuits de voie
Non-accès aux voies
- Projection d'obstacles pour les circulations
Collision
- Accumulation de glace sur les rails conducteurs et aiguillages
Voies bloquées ou rupture
Création d'obstacles pour les circulations
Instabilité
Fontis
Destruction

Signalisation

- Baisse des isolements
Réalimentation intempestive de circuits
Visibilité réduite
- Perte de capacité d'exploitation directe
- Dommages structurels
Brouillard : visibilité réduite
- Dysfonctionnement des équipements dû à la neige
Mauvaise visibilité
- Dysfonctionnement des équipements dû au sable
- Destruction

Abords = ouvrages en terre + végétation

- Manque de visibilité lié à la pousse de la végétation
Instabilité à long terme
Sol saturé (érosion, gonflement des sols, ruissellement, etc.)
- Destruction
Création d'obstacles pour les circulations
- Instabilité
Création d'obstacles pour les circulations
- Dégradation à long terme (gel - dégel, fonte des neiges)
- Fragilisation de la stabilité
Destruction

Ouvrages d'Art

- Inondation
Destruction de l'ouvrage
Affouillement
Dommages à l'équipement électrique (tunnel) + instabilité du sol
- Fragilisation de l'ouvrage (pont)
Dégagement de la signalisation (tunnel)
- Surcharge de l'ouvrage
Rupture (pont)
Equipement endommagé (glace dans le tunnel)
- Destruction
Obstruction des ouvertures (tunnel)

Centre de signalisation

- Baisse des isolements
Réalimentation intempestive de circuits
- Perte de capacité d'exploitation directe
- Dommages structurels
- Dysfonctionnement des équipements dû à la neige
- Dysfonctionnement des équipements dû au sable
- Destruction

Alimentation • Câbles

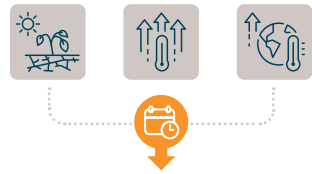
- Baisse des isolements
Réalimentation intempestive de circuits
- Perte de capacité d'exploitation directe
- Rupture par arrachement d'une ligne aérienne
- Dysfonctionnement des équipements dû à la neige
- Dysfonctionnement des équipements dû au sable
- Dysfonctionnement
Rupture
Erosion : exposition des câbles enterrés et résistance de mise à la terre



L'impact des aléas climatiques liés à la température sur le matériel roulant

[Télécharger le poster](#)

Train (locomotive + wagons)



LTV en cas de dépassement des plages de fonctionnement
Confort des passagers



Incendie dans le matériel roulant



LTV en cas de dépassement des plages de fonctionnement



Dysfonctionnement dû à la foudre

Système d'air conditionné

- Surexploitation de la climatisation
- Surchauffe des circuits
- Pollen et particules de poussière dans les systèmes
- Incendie pouvant se propager dans le système
- Explosion
- Surexploitation du chauffage
- Surchauffe des circuits
- Dysfonctionnement dû à la foudre

Matière Dangereuse

- Destruction du contenant
- Fuite de MD (PUIMD)
- Destruction du contenant
- Fuite de MD (PUIMD)

Conduite

- Aveuglement du conducteur

Connectique (pneumatique, piano)

- Dilatation
- Condensation
- Rupture d'attelage
- Destruction
- Gel des connexions
- Rupture d'attelage

Système de freinage

- Étincelles pouvant provoquer des incendies
- Surchauffe
- Destruction
- Gel de la timonerie (freins)

Système de traction

- Dysfonctionnement dû à la chaleur
- Surchauffe (incendie)
- Panne de moteur (diesel)
- Incendie pouvant se propager dans le système
- Destruction
- Dysfonctionnement dû au grand froid
- Humidité lors du redoux
- Dysfonctionnement dû à la foudre

Système électrique

- Dysfonctionnement dû à la chaleur
- Problème de captage du courant
- Incendie pouvant se propager dans le système
- Destruction
- Dysfonctionnement dû au grand froid
- Humidité lors du redoux
- Problème de captage du courant par les pantographes (givre)
- Dysfonctionnement dû à la foudre

Système électronique

- Dysfonctionnement dû à la chaleur
- Arrêt du matériel (réglage du capteur de température)
- Incendie pouvant se propager dans le système
- Destruction
- Dysfonctionnement dû au grand froid
- Humidité lors du redoux
- Dysfonctionnement dû à la foudre

Système hydraulique

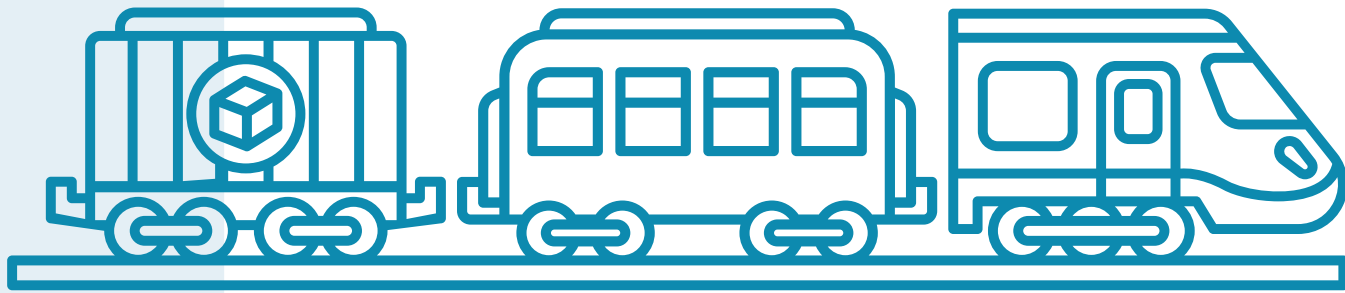
- Dysfonctionnement dû à la surchauffe des circuits
- Incendie pouvant se propager dans le système
- Destruction
- Gel des tuyaux



L'impact des aléas climatiques liés à l'eau, le vent et les masses solides sur le matériel roulant

Télécharger le poster

Train (locomotive + wagons)



- Dysfonctionnement dû à l'humidité
Perte d'adhérence
Accumulation d'eau dans les pantographes
- Rupture d'étanchéité
Déraillement
- Collision avec des obstacles
Dommages au matériel
Enrayage
Deshuntage (feuille)
Déraillement
- Incapacité de fonctionnement
Impossibilité de circuler
- Dysfonctionnement des équipements
- Collision avec des obstacles
Déraillement

Système d'air conditionné

- Dysfonctionnement dû à l'humidité
- Dysfonctionnement des équipements

Matière Dangereuse

- Destruction du contenant
Fuite de MD (PUIMD)
- Destruction du contenant
Fuite de MD (PUIMD)
- Destruction du contenant
Fuite de MD (PUIMD)
- Destruction du contenant
Fuite de MD (PUIMD)
- Destruction du contenant
Fuite de MD (PUIMD)

Conduite

- Mauvaise condition de visibilité

Connectique (pneumatique, piano)

- Dysfonctionnement dû à l'humidité
- Rupture d'attelage
- Dysfonctionnement des équipements

Système de freinage

- Enrayage
Manque d'adhérence
Déraillement
- Dysfonctionnement des équipements

Système de traction

- Dysfonctionnement dû à l'humidité ou au givre
Dégradation matérielle
- Dysfonctionnement des équipements
Rupture
- Patinage
Perte d'adhérence
- Dysfonctionnement des équipements

Système électrique

- Dysfonctionnement dû à l'humidité ou au givre
Dégradation matérielle
- Dysfonctionnement des équipements
Rupture d'alimentation
- Dysfonctionnement des équipements

Système électronique

- Dysfonctionnement dû à l'humidité
- Dysfonctionnement
Rupture
- Dysfonctionnement des équipements

Système hydraulique

- Dysfonctionnement des équipements

2• Les recommandations

► Ce qu'il faut retenir pour réaliser une analyse de risque

Avant de commencer l'étude :

- identifier et réunir les bonnes compétences : les analyses de risques s'appuient sur des compétences transversales (expert des différents métiers du ferroviaire, spécialiste des risques, spécialiste des outils climatiques, spécialiste en cartographie, spécialiste des coûts) ;
- piloter cette étude en nommant un responsable qui aura pour mission de mobiliser les compétences et constituer le groupe de travail ;
- ne pas hésiter à solliciter des appuis techniques internes ou externes.

Pendant l'étude :

- établir le périmètre de l'étude avec les moyens disponibles (géographique, temporel, patrimoine, financier) ;
- recenser l'ensemble des données utiles et disponibles ;
- identifier les aléas climatiques ;
- identifier les vulnérabilités physiques et fonctionnelles du réseau ;
- déterminer les enjeux de son activité ;
- réaliser l'analyse de risque en croisant les résultats et en définissant une échelle d'acceptabilité du risque.

Après l'étude :

- mettre les résultats sous une forme exploitable (cartographie par exemple) ;
- établir un plan d'actions hiérarchisées et pilotées qui correspondent aux risques identifiés.

Pour la dernière étape, une fois l'identification des risques effectuée, il est important d'établir les mesures conservatoires à mettre en place afin de diminuer le niveau de risque. Ces mesures de protection peuvent prendre diverses formes. Elles peuvent être définies à chacune des échelles d'analyse du système, au niveau des aléas climatiques identifiés ou encore au niveau des enjeux. Ces mesures peuvent être fonctionnelles ou organisationnelles et viser à réduire les effets d'un impact ou au contraire à l'augmenter selon les besoins et objectifs. Les mesures peuvent également se combiner. Il est important d'évaluer les coûts et les avantages de la mise en place d'une ou plusieurs mesures conservatoires.

De plus, les règles de conception et les modèles sur lesquels reposent les processus de fabrication, les processus de gestion et les processus de maintenance des différentes composantes du système ferroviaire n'ont pas été remis en question depuis cinquante ans. Il sera peut-être nécessaire de revoir ces modèles pour tenir compte des évolutions du climat. Par exemple, lors de la construction ou du remplacement des voies, il faudra définir une nouvelle température de référence.

Enfin, il ne faut pas négliger les avantages d'une coopération entre toutes les parties prenantes du système ferroviaire. C'est en partageant les résultats, les analyses, les retours d'expérience, les bonnes pratiques que l'ensemble du secteur pourra anticiper, s'adapter et progresser face aux problématiques de changement climatique.

► **Ce rapport a pour objectif premier de mener les acteurs du secteur ferroviaire à se questionner sur les impacts inhérents au changement climatique sur leurs activités ferroviaires. Initier une réflexion sur ce sujet de façon anticipée est un moyen de s'assurer le développement d'une stratégie d'atténuation et d'adaptation la plus efficace possible. Le changement climatique exerce déjà une influence sur les activités ferroviaires. Les aléas climatiques exceptionnels sont imprévisibles, il est préférable de s'y préparer au mieux dès à présent.**

Atténuer et s'adapter sont deux concepts qui concourent à l'élaboration d'une stratégie nationale pour augmenter la résilience et notamment celle des activités économiques. Le secteur ferroviaire est considéré comme une activité d'avenir, moins polluante et s'inscrivant dans une démarche de développement durable. Or, les conséquences des événements climatiques conduisent à des ruptures de réseau de moins en moins acceptables dans une volonté de report modal de la route vers le fer. La fiabilité, la disponibilité du réseau, le confort des passagers sont autant de conditions sine qua non à l'augmentation de l'activité de transport ferroviaire de fret et de voyageurs. Il est, pour cela, nécessaire de créer les conditions d'un travail efficace pour l'adaptation climatique, de prévenir les conséquences négatives de l'impact du climat en créant des installations robustes et de gérer les effets de l'influence du climat. La gestion des activités ferroviaires devient donc une véritable stratégie.

L'étude menée dans ce rapport n'est qu'un premier travail de l'ANS française. Les risques et conséquences identifiés ne sont pas exhaustifs et il convient à chacun de s'approprier la démarche de l'analyse de risque sur son propre secteur avec l'ensemble des connaissances nécessaires. Ce travail se veut également un premier recueil de données disponibles et accessibles à tous.

Par ce travail d'investigation, l'EPSF remarque que des travaux sont déjà en cours. Des réflexions, des discussions, des analyses, des études ont déjà été menées. Des actions sont déjà engagées dans de nombreuses entreprises au regard des exploitants ferroviaires interrogés. Il est donc important de poursuivre dans cette direction et de mobiliser l'ensemble du secteur pour contribuer de façon commune à la pérennité du réseau ferroviaire français et européen. La coopération et la mutualisation des informations sont un axe stratégique de l'adaptation. Les données et leur mise en commun sont au cœur de ce nouveau défi. Des outils de surveillance connectés permettent aujourd'hui par exemple une télésurveillance à distance de chaque instant. Ceci constitue une première base de données pour développer des systèmes d'alerte efficaces qui, combinés à l'intelligence artificielle par exemple, permettront l'exploitation optimale de l'ensemble de ces données. En croisant de manière efficace l'ensemble des données captées, en fusionnant ces informations, une vision complète du système ferroviaire émerge et permet d'anticiper les défaillances pour que les équipes interviennent plus rapidement.

L'EPSF reste un acteur de choix pour échanger sur ce sujet et se tient disponible pour toute demande complémentaire, précisions, initiatives. Les témoignages supplémentaires et partage de retour d'expérience sont les bienvenus et alimenteront les réflexions générales. Le partage et l'échange constituent un des piliers du succès du mode de transport ferroviaire face au changement climatique et aux autres modes de transport.

► Les définitions des concepts suivants sont issues de la base nationale de données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement et les transports⁽³⁵⁾.

Adaptation au changement climatique

Ajustement d'un système à des changements climatiques (y compris la variabilité climatique et les extrêmes) afin d'atténuer les dommages potentiels, de tirer parti des opportunités ou de faire face aux conséquences. L'Etat français définit ainsi trois différents types d'adaptation :

- Adaptation autonome ou spontanée : adaptation en réponse à un aléa climatique vécu ou à ses effets, sans aucune préméditation explicite ou consciente et axée sur la lutte contre le changement climatique.
- Adaptation incrémentale : mesures d'adaptation ayant pour objectif principal le maintien de la nature et de l'intégrité d'un système ou d'un processus à une échelle donnée.
- Adaptation transformationnelle : adaptation qui change les éléments fondamentaux d'un système en réponse au climat et à ses effets⁽³⁶⁾.

Aléa naturel

Manifestation d'un phénomène naturel (inondation, mouvement de terrain, séisme, avalanche, etc.) d'occurrence et d'intensité données.

Atténuation du changement climatique

Action contribuant à stabiliser ou à réduire les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère pour réduire les risques que génère le changement climatique.

Changement climatique

Variation du climat due à des facteurs naturels ou humains.

Effet de serre

Phénomène d'échauffement de la surface de la Terre et des couches basses de l'atmosphère, dû au fait que certains gaz de l'atmosphère absorbent et renvoient une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre, ce dernier compensant le rayonnement solaire qu'elle absorbe elle-même. Par effet de serre anthropique, on entend l'effet de serre additionnel induit par les activités humaines au travers de leurs émissions de gaz à effet de serre.

Empreinte carbone

L'empreinte carbone de la France représente la quantité de gaz à effet de serre (GES) induite par la demande finale intérieure d'un pays (consommation des ménages, des administrations publiques et des organismes à but non lucratif et les investissements), que les biens ou services consommés soient produits sur le territoire national ou importés.

Érosion côtière

Effondrement de falaises vives, envasement des baies et remaniement des plages lors des tempêtes hivernales impliquant des phénomènes d'origine marine (houle, marées et courants marins) et/ou d'origine continentale (pluie, gel et vent).

Exposition aux aléas naturels

Ensemble des populations, milieux et activités qui peuvent être affectés par les aléas naturels. Elle est caractérisée par une nature d'exposition et par un niveau d'exposition qui définissent l'enjeu de la politique d'adaptation et l'approche à suivre par la collectivité.

Gaz à effet de serre

Gaz d'origine naturelle (vapeur d'eau) ou anthropique (liée aux activités humaines) absorbant et réémettant une partie des rayons solaires (rayonnement infrarouge), phénomènes à l'origine de l'effet de serre.

Glissements de terrain

Les glissements de terrain surviennent lors du déplacement de sols ou de roches déstabilisés par des phénomènes naturels (climatiques, géomorphologiques, géologiques) ou par les activités humaines. Plutôt lents, les glissements peuvent être dévastateurs lorsqu'ils forment des coulées ou des laves torrentielles.

Normales climatologiques

Moyennes de variables météorologiques calculées sur une période uniforme relativement longue portant sur un minimum de trente années consécutives.

Résilience

Capacité d'un écosystème à résister et à survivre à des altérations ou à des perturbations affectant sa structure ou son fonctionnement, et à trouver, à terme, un nouvel équilibre.

Retrait-gonflement des argiles

Mouvements de terrain naturels lents à l'origine d'une déformation progressive du sol ou du sous-sol riches en argiles dites gonflantes. Ces argiles se rétractent lors des périodes de sécheresse et gonflent par réhydratation après de très fortes pluies. Ce phénomène d'alternance de retrait et de gonflement du sol peut provoquer des désordres dans les bâtiments, principalement dans les maisons individuelles aux structures légères particulièrement vulnérables en raison de fondations généralement superficielles.

Risques climatiques

Parmi les impacts du changement climatique, trois types à l'origine de risques naturels peuvent être retenus : l'augmentation des événements météorologiques extrêmes (vagues de chaleur, inondations côtières, submersions marines, sécheresse, etc.), la hausse du niveau marin, pouvant être à l'origine d'inondations de certaines zones côtières et l'aggravation et l'extension des zones exposées au risque des feux de forêts.

Taxon/ groupe taxonomique

Groupe d'êtres vivants constituant une unité systématique d'un niveau hiérarchique donné (variété, espèce, genre, famille, classe, embranchement, etc.).

Vulnérabilité au climat

Propension d'une population ou d'un écosystème à subir des dommages en cas de variations climatiques, qui dépend de leur capacité d'adaptation.

(35) Tous les concepts | données et études statistiques. (s. d.). <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tous-les-concepts>

(36) Adaptation de la France au changement climatique (2022, 13 avril). Ministère de la Transition Énergétique. Consulté le 17 avril 2023, à l'adresse <https://www.ecologie.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique>

[1] : L'adaptation au changement climatique dans la taxonomie européenne | Carbone 4.

https://www.carbone4.com/analyse-adaptation-climat-taxonomie-europeenne?mc_cid=87e49bd788&mc_eid=305c502099

[2] : Adaptation de la France au changement climatique (2022, 13 avril). Ministère de la Transition Energétique.

Consulté le 17 avril 2023, à l'adresse <https://www.ecologie.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique>

[3] : Ce qu'il faut retenir du 6e rapport d'évaluation du GIEC.

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20250_4pages-GIEC-2.pdf

[4] : Changement climatique Les réseaux de transport aussi sont vulnérables ! Dans la collection « Le P'tit Essentiel » (novembre, 2018). Cerema.

[5] : Climat : un nouveau rapport alarmant du GIEC sur un réchauffement global de la planète. (2023, 21 mars). Vie publique au coeur du débat public.

<https://www.vie-publique.fr/en-bref/288687-rechauffement-climatique-un-nouveau-rapport-alarmant-du-giec>

[6] : Comprendre le PNACC2. (2018).

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2018.12.20_Comprendre_le_PNACC2_0.pdf

[7] : Le climat futur en France | Météo-France.

<https://meteofrance.com/changement-climatique/quel-climat-futur/le-climat-futur-en-france>

[8] : Les Nouvelles Projections Climatiques de Référence DRIAS 2020 pour la métropole. (2020).

Dans <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

[9] : Les tendances à trois mois | Météo-France les dernières prévisions saisonnières.

<https://meteofrance.fr/actualite/publications/les-tendances-climatiques-trois-mois>

[10] : Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, **2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information**. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, doi:10.1017/9781009157896.006.

[11] : Notre-environnement. (2023b, avril 17). Les risques naturels majeurs en France.

<https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/risques/les-mouvements-de-terrain-et-les-erosions-cotieres-ressources/article/les-risques-naturels-majeurs-en-france>

[12] : Nouvelles simulations du climat : quel réchauffement en 2100 ? | Météo-France.

<https://meteofrance.com/changement-climatique/quel-climat-futur/nouvelles-simulations-du-climat-quel-rechauffement-en-2100>

[13] : Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, volet infrastructures et systèmes de transport | Analyse des risques liés aux événements climatiques extrêmes sur les infrastructures, systèmes et services de transport | Recueil de concepts. Rapport d'étape (2015). Cerema.

[14] : Rida, E. (2023). Généralités sur le risque inondation en France. Ministères Écologie Énergie Territoires.

<https://www.ecologie.gouv.fr/generalites-sur-risque-inondation-en-france>.

[15] : Tous les concepts | données et études statistiques.

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tous-les-concepts>

[16] : Troisième Rapport d'Adaptation. Network Rail (décembre 2021).

<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2022/01/Network-Rail-Third-Adaptation-Report-December-2021.pdf>

[17] : Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat. Dans la collection « Connaissances » (2019). Cerema.

[18] : Bedeutung des Klimawandels für die Infrastrukturen in der Schweiz. (2019). Dans Swiss Economics..

[19] : Szymczak, S., Backendorf, F., Bott, F., Fricke, K., Junghänel, T., & Walawender, E. (2022). Impacts of heavy and persistent precipitation on railroad infrastructure in July 2021 : a case study from the Ahr Valley, Rhineland-Palatinate, Germany. *Atmosphere*, 13(7), 1118

<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2022/01/Network-Rail-Third-Adaptation-Report-December-2021.pdf>

[20] : BMDV Expertennetzwerk - Publikationen - Einflüsse naturgefahrenbedingter Streckensperungen auf überregionale Verkehrsströme – verkehrsträgerübergreifende Stresstestszenarien für die Region « Mittelrhein » - Schlussbericht SP-109.

<https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/SPT109.html?nn=1371986>

[21] : Eisenbahn-Bundesamt (EBA). GeoPortal.EBA - verfügbare Kartendienste von GeoPortal.EBA.

https://geoportal.eisenbahn-bundesamt.de/?lang=de&topic=ulr_r4&bgLayer=sgx_geodatenzentrum_de_web_grau_EU_EPSG_25832_TOPPLUS&catalogNodes=15,11,12,10,13&E=579056.88&N=5687905.82&zoom=5

[22] : Résilience : Fabella, VM, Szymczak, S, 2021. Résilience du transport ferroviaire à quatre types de risques naturels : une analyse des volumes quotidiens de trains. *Infrastructures* 2021, 6(12), 174 ;

<https://doi.org/10.3390/infrastructures6120174>

Fabella, VM, Szymczak, S, (accepté) Estimation des courbes de résilience des chemins de fer : durée de récupération et réponse du trafic ferroviaire aux inondations et aux chutes d'arbres. à paraître dans *Transportation Research Procedia*

[23] : Fortes pluies/inondations soudaines : Szymczak, S, Backendorf, F, Bott, F, Fricke, K, Junghänel, T, Walawender, Impacts des précipitations fortes et persistantes sur l'infrastructure ferroviaire en juillet 2021 : une étude de cas dans la vallée de l'Ahr, en Rhénanie-Palatinat, Germany. *Atmosphère* 2022, 13(7), 1118.

<https://doi.org/10.3390/atmos13071118>

[24] : Inondations fluviales : Analyse de l'impact climatique du système de transport fédéral dans le contexte des inondations - rapport final SP 103

<https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/SPT103.html?nn=1371986>

[25] : Tempête/coup de vent : Szymczak, S., Bott, F., Babeck, P. et al. Estimation du risque de chute d'arbres le long des voies ferrées : un nouvel outil SIG. *Nat Hazards* 112, 2237–2258 (2022).

<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05263-5>

Dérivation de la population d'arbres le long du réseau ferroviaire allemand :

https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/Forschungsbericht_2021-10.html;jsessionid=A61E57856126D1FBB9D998343B69ED71.live21323?nn=2208196

Analyse de l'impact climatique du système de transport fédéral dans le contexte des tempêtes - rapport final SP 104

<https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/SPT104.html?nn=1371986>

[26] : Mouvements de masse : Analyse de l'impact climatique du système de transport fédéral dans le contexte des mouvements de masse gravitationnels - rapport final SP 105

<https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/SPT105.html?nn=1371986>

Création d'une carte d'avertissement des risques géologiques d'ingénierie pour les glissements de pente et de remblai le long du réseau ferroviaire allemand :

https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2018-13.html?nn=2208196

[27] : Vers une société résiliente au changement climatique à l'horizon 2050 Mesures fédérales d'adaptation 2023-2026. (2020). Dans *Adapt2climate.be*.

<https://climat.be/doc/mesures-federales-adaptation-2023-2026.pdf>

[28] : ARISCC GROUP. ARISCC.

<http://www.ariscc.org/>

[29] : Troisième Rapport d'Adaptation. Network Rail (décembre 2021).

<https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2022/01/Network-Rail-Third-Adaptation-Report-December-2021.pdf>

[30] : L'avenir du ferroviaire. Prorail.

<https://www.prorail.nl/>

REMERCIEMENTS

L'EPSF souhaite remercier l'ensemble des personnes ayant répondu favorablement à la sollicitation sur le sujet du changement climatique. Ces collaborations fructueuses, le partage de constats, le retour d'expérience, la qualité et la transparence des échanges nous ont permis l'élaboration de ce document. Les échanges ont été riches d'enseignements et ont permis d'alimenter les premières réflexions.

Un très grand merci à M. Patrick PRESSARD et M. Nicolas HELAS-OTHENIN pour leur temps et la qualité des échanges que nous avons eus.

Nous adressons des remerciements à M. Gilles RAKOCZY et M. Kevin UBA pour avoir partagé leurs travaux de qualité et leurs connaissances sur leur activité ferroviaire.

Nous tenons également à remercier M. Eric RICHARD pour s'être rendu disponible pour répondre à nos questions et pour les qualités des informations fournies.

Merci également à M. Ignacio HERNANDEZ VALLHONRAT dont les échanges ont été enrichissants apportant un nouveau point de vue sur la problématique.

Nous remercions chaleureusement M. Stéphane DRILHOLE et M. Armand CARANOBE pour avoir pris le temps de détailler l'ensemble des travaux en cours, les analyses réalisées et les actions mises en place.

Un très grand merci Mme Linda AY pour sa précieuse coopération.

Enfin un grand merci aux différents correspondants étrangers M. Philipp UNGER, M. Tamas DERI, Mme Mariska LIEVAART, M. Robert HELLSTRÖM, M. América RIVEROS et Mme Anna DYMOWSKA.

Fiona POTET,
Olivier OMNES, superviseur.



60 rue de la Vallée
CS 11758
80017 Amiens Cedex 1
Tél.33 (0)3 22 33 95 95
epsf@securite-ferroviaire.fr
www.securite-ferroviaire.fr

