

LES INFRASTRUCTURES



© iStock

L'ÉCONOMIE DE L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR LE RÉSEAU FERRÉ

JULIEN BRUNEL ET ALAIN QUINET* | * SNCF Réseau. Cet article économique est rédigé sous la seule responsabilité de ses auteurs et n'engage pas SNCF Réseau.

«L'intelligence n'est pas ce que l'on sait, mais ce que l'on fait quand on ne sait pas», Jean Piaget

Le réseau ferroviaire permet à chacun de se déplacer en minimisant les impacts sur la consommation d'énergie, l'utilisation de l'espace et les émissions de gaz à effet de serre (GES). Tout en contribuant à l'atténuation du changement climatique, le ferroviaire doit également, comme toutes les activités humaines, s'adapter. Depuis toujours, le réseau ferroviaire est exposé aux aléas naturels, aux variations saisonnières et aux intempéries. Pour assurer la desserte de l'ensemble du territoire, il a fallu développer une ingénierie et des savoir-faire permettant de s'accommoder des diverses conditions climatiques, comme la pluie, la neige, le vent, la chaleur ou encore le froid, et de prendre des marges de sécurité face aux événements extrêmes, comme les tempêtes ou les inondations.

Le dérèglement climatique intensifie la fréquence de ces phénomènes, même si l'ampleur exacte des conséquences opérationnelles sur le système ferroviaire, ses clients et ses équipes demeure incertaine. Il devient donc primordial, pour préserver durablement la mobilité ferroviaire, de renforcer progressivement la résilience du réseau ferroviaire.

Pour faire face à ces risques, plusieurs stratégies, non exclusives l'une de l'autre, sont possibles : surveiller, maintenir, protéger et, dans certains cas, reconstruire ou réinventer. Si le champ des possibles est large, les ressources financières demeurent limitées, et certaines solutions apparemment pertinentes peuvent s'avérer économiquement inadaptées.

C'est là qu'intervient le rôle crucial de l'analyse économique dans la sélection et le dimensionnement des actions d'adaptation du réseau ferré au changement climatique. Cet article met en évidence une caractéristique majeure du secteur ferroviaire, identifiée de longue date par l'économie des transports : l'importance des externalités, c'est-à-dire les bénéfices économiques et sociaux que le secteur ferroviaire génère sans qu'ils se reflètent dans les comptes du gestionnaire du réseau.

Cette caractéristique a au moins deux conséquences importantes pour l'adaptation du réseau au changement climatique : elle limite la rentabilité financière de certaines actions pourtant bénéfiques pour la collectivité ; elle souligne l'importance d'une évaluation socioéconomique rigoureuse pour orienter les stratégies d'adaptation, comme c'est déjà le cas pour les projets de développement.

L'article est organisé en trois parties. Dans la première partie, nous rappelons le principe fondamental de l'analyse coûts-bénéfices selon lequel il existe un niveau optimal d'effort d'adaptation, au-delà duquel les actions ne sont plus justifiées économiquement, les bénéfices devenant trop faibles par rapport aux dépenses engagées. Dans une deuxième partie, nous présentons les coûts liés au changement climatique, à la fois les coûts de prévention supportés par le gestionnaire du réseau et les coûts socioéconomiques subis par les usagers. Enfin, la dernière partie illustre ce raisonnement à travers une évaluation analysant l'opportunité d'un investissement visant à renforcer la résilience de l'alimentation électrique du réseau.

L'ADAPTATION OPTIMALE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'analyse économique de l'adaptation d'une infrastructure au changement climatique s'inscrit dans une longue tradition de recherche sur la prévention des risques naturels, illustrée notamment par l'article fondateur de David van Dantzig (1956). Les principes issus de ces travaux peuvent être appliqués à l'adaptation du réseau ferré au changement climatique grâce à un modèle simple.

L'optimum privé

Le coût total supporté par le gestionnaire d'infrastructure se compose de deux éléments, $C=D(A)+A$ où D désigne le coût des dommages que le réseau ferré subit à cause des aléas climatiques et A représente le coût des actions visant à réduire ces dommages.

Il existe un effort optimal du gestionnaire d'infrastructure permettant de minimiser ce coût. Ce niveau s'obtient en résolvant $dC(A)/dA=0$, ce qui revient à $dD(A)/dA=-1$. Ce résultat indique qu'à l'optimum, le coût marginal des actions de prévention doit être égal au coût marginal des dommages. En d'autres termes, pour chaque euro supplémentaire investi dans des actions de prévention (A), le montant des dommages (D) doit diminuer exactement d'un euro.

L'optimum social

La formulation du problème se complexifie lorsque l'on introduit des externalités. Les actions de prévention permettent en effet de réduire aussi le coût des dommages subis par les voyageurs ou les chargeurs (par exemple, en réduisant le temps perdu lors d'incidents), sans pour autant avoir d'effets directs sur les finances du gestionnaire du réseau.

Dans ces circonstances, l'enjeu collectif est de minimiser le coût total des dommages, qui comprend aussi le coût des incidents



Les aléas climatiques et leurs répercussions imposent de renforcer la résilience socioéconomique du réseau ferroviaire.

© iStock

subis par les utilisateurs du réseau. La fonction de dommage globale devient alors : $D(A)+E(A)+A$ où $E(A)$ représente le coût des dommages pour les autres acteurs de la société.

L'effort optimal d'investissement pour la société est alors donné par l'équation : $[dD(A)+dE(A)]/(dA=-1)$.

Ce résultat montre que si l'on ne considère que le point de vue du gestionnaire, l'effort d'adaptation est en réalité insuffisant pour la collectivité. Pour parvenir à un optimum collectif, il faut un effort supplémentaire, illustré par la quantité ΔA dans la figure ci-dessous.

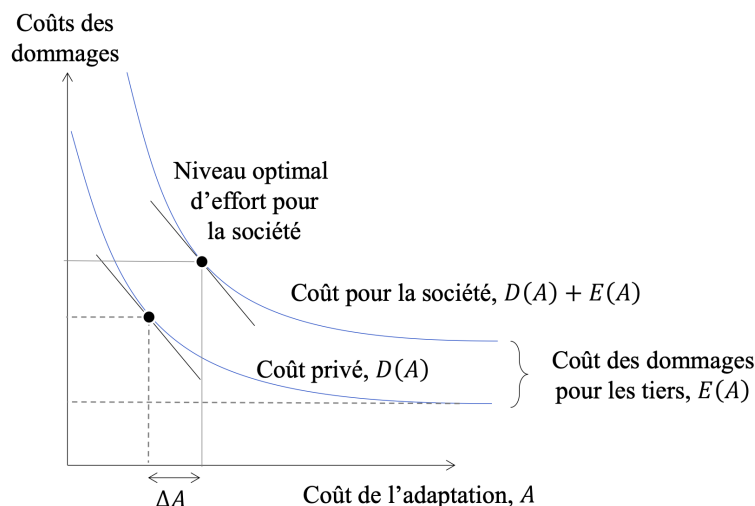


FIGURE 1 : L'effort optimal d'adaptation en présence de dommages pour les tiers

Comme le gestionnaire d'infrastructure ne bénéficie que marginalement des retombées positives des actions d'adaptation, l'intervention de la puissance publique est indispensable pour porter l'effort d'adaptation du réseau au niveau de l'optimum.

LE COÛT DES ALÉAS CLIMATIQUES SUR LE RÉSEAU FERRÉ

Le rappel des principes économiques de l'adaptation au changement climatique montre qu'il faut considérer à la fois les coûts de prévention et les coûts des dommages résiduels :

- Les coûts de prévention correspondent à l'ensemble des actions engagées par le gestionnaire du réseau pour éviter l'occurrence d'incidents (le terme noté A dans la partie précédente).
- Les coûts des dommages résiduels englobent (a) les coûts directs des aléas pour le gestionnaire du réseau, notés $D(A)$ précédemment, et (ii) les coûts subis par les utilisateurs du réseau sans traduction directe pour le gestionnaire du réseau, $E(A)$, comme les retards.

Nous présentons successivement ce que ces différentes catégories de coûts représentent pour le réseau ferré français. L'opposition simpliste entre le coût de l'inaction et celui de l'action s'avère peu opérationnelle, dans la mesure où le gestionnaire du réseau ferré n'est jamais dans l'inaction et intègre de manière native des éléments de prévention pour protéger l'infrastructure des aléas de la météo, l'ensemble de ces actions représentant déjà des dépenses significatives.

Le coût de la prévention

Dans un contexte où les connaissances sur le climat évoluent constamment, les actions menées par SNCF Réseau sont ajustées au fil des avancées scientifiques. Les conséquences du dérèglement climatique s'affinent en effet régulièrement avec la production d'indicateurs de plus en plus précis (températures, précipitations, événements climatiques extrêmes). Avec le progrès des connaissances, les actions de SNCF Réseau, qui s'inscrivaient initialement dans une logique de précaution - limiter les effets d'un risque incertain

ou mal connu en prenant des mesures conservatoires –, évoluent progressivement vers une logique de prévention : réduire ou éliminer un risque connu.

Les actions engagées par le gestionnaire d'infrastructure pour se protéger des aléas climatiques portent à la fois sur les opérations et sur les investissements :

- Adaptation de l'exploitation du réseau : ces mesures vont du ralentissement de la vitesse des trains à la suspension volontaire et temporaire des circulations en cas d'avis de tempête pour éviter que des trains ne soient bloqués en pleine voie.
- Adaptation de la maintenance : il s'agit de renforcer certaines opérations pour améliorer la résilience du réseau en anticipation d'un événement météorologique extrême, par exemple renforcer la surveillance de l'infrastructure en cas de canicule ou celle des talus en cas de fortes précipitations.
- Adaptation des actifs : cela peut inclure le remplacement ou le renforcement de certains composants pour mieux répondre aux futures conditions climatiques.

Pour SNCF Réseau, les actions d'adaptation de l'exploitation du réseau entraînent relativement peu de coûts. Le dispositif «stop circulation», qui interrompt préventivement les circulations en cas de tempêtes annoncées, est emblématique, mais limité. Bien qu'il implique une perte de recettes commerciales pour l'entreprise, ce mécanisme reste exceptionnel et de courte durée.

L'adaptation de la maintenance est plus significative. Il est possible d'isoler une assiette de dépenses d'interventions préventives dites «saisonnnières» (tournées de chaleurs, interventions sur les dispositifs de dilatation, etc.) et de maintenance corrective dues aux intempéries. Ces opérations représentent un coût d'environ 125 M€ par an pour le réseau ferré.

On peut également intégrer à cette assiette de coût le traitement de la végétation. Celle-ci est devenue à la fois plus abondante et plus invasive le long des voies, le changement climatique entraînant une pousse de printemps anticipée d'environ quinze jours et un retard similaire pour les chutes de feuilles. Traiter cette végétation est indispensable pour garantir la résilience du réseau vis-à-vis des aléas climatiques comme les incendies à proximité des voies ou les chutes d'arbres. Le traitement de la végétation est ainsi devenu le premier budget de maintenance de SNCF Réseau (11 % de l'ensemble des dépenses d'entretien), avec une augmentation de son coût de 119 M€ en 2020 à 235 M€ en 2025.



	2021	2022	2023	2024	2025
Opérations saisonnières	116	110	121	139	137
Traitement de la végétation	159	199	225	227	235
Total	275	309	346	366	372

Tableau 1 : Coût de la maintenance préventive liée aux aléas climatiques (millions d'euros courants). Source : SNCF Réseau

En 2025, les actions de préventions des incidents représenteraient ainsi un coût de l'ordre de 372 M€ par an.

Le coût des dommages

Au-delà du coût des actions de prévention, il faut prendre en compte le coût des dommages résiduels dans la mesure où la prévention ne peut raisonnablement ramener le risque

à zéro. Les événements climatiques se traduisent par des dommages aux actifs ou des pertes d'exploitation, ainsi que par une perte de qualité de service pour les clients finaux.

Le coût des dommages pour SNCF Réseau - Le coût des dommages liés à la météo pour SNCF Réseau inclut le coût de remise en état du réseau ou du remplacement des éléments du réseau endommagé et les pertes d'exploitation durant les perturbations ou interruptions de service. Ces coûts sont estimés en moyenne à 31 M€ par an entre 2021 et 2025.

	2021	2022	2023	2024	2025
Coût des dommages liés au climat	24	16	20	38	24
Perte des recettes dues aux annulations	5	4	8	9	6
Total	29	20	28	47	30

Tableau 2 : Coût des dommages pour le gestionnaire de réseau (millions d'euros courants). Source : SNCF Réseau

Le coût des dommages pour les clients - Les défaillances de l'infrastructure ont aussi un coût pour les utilisateurs du réseau (voyageurs et fret) en modifiant les conditions de circulation des trains, notamment par la perte de temps due aux retards et les suppressions de trains. En 2025, environ 1 million de minutes perdues et 11 000 trains supprimés ont été comptabilisés à la suite d'un aléa climatique.

	2021	2022	2023	2024	2025
Coût des retards	102	124	148	151	133
Coût des suppressions de trains	7	5	11	12	9
Total	111	132	157	162	142

Tableau 3 : Coût socioéconomique des dommages (millions d'euros courants). Source : SNCF Réseau

Ces effets peuvent être monétarisés en utilisant les outils de l'évaluation économique (E. Quinet, 2013). Il en ressort un coût socioéconomique de l'ordre de 140 M€ par an, dont 130 M€ pour les retards.

L'ÉVALUATION SOCIOÉCONOMIQUE

L'évaluation socioéconomique consiste à valoriser non seulement les effets financiers d'un projet, mais aussi par son incidence sur le bien-être. Dans un projet de transport, cela conduit à donner une valeur à l'évolution de la qualité de service d'un mode de transport (gains de temps par exemple) ou aux externalités que le projet induit sur son environnement naturel, humain ou économique (e.g. émissions de GES induites ou évitées).

Dans le cas de l'adaptation au changement climatique du réseau ferré, l'analyse socioéconomique permet de valoriser le coût des incidents pour les utilisateurs du réseau, à savoir des minutes perdues dans leur déplacement.

Les valeurs de références à retenir sont précisées dans une fiche outil du référentiel d'évaluation publié par la DGITM (2019). Le coût d'une heure de transport perdue varie selon le type de service : entre 14 €/h pour un voyageur dans un Transilien et 34 €/h pour un voyageur dans un TAGV.

Ces valeurs sont pondérées d'un facteur traduisant la plus grande pénibilité d'un allongement inopiné du temps de parcours par rapport au temps de transport nominal. Dans le cadre français, la valeur de ce facteur est de 2,1.

Le coût total du changement climatique - L'addition des coûts financiers supportés par le gestionnaire d'infrastructure et des pertes de bien-être des voyageurs permet de donner une image plus fidèle du coût total des dommages. Cette estimation globale ne tient toutefois pas compte des pertes financières - en l'absence d'information disponible - propres aux entreprises ferroviaires.

Au total, cette analyse montre qu'en 2025, le coût de bien-être pour la collectivité des aléas climatiques sur le réseau ferré serait, hors pertes financières des entreprises ferroviaires, de près de 550 M€ (cf. tableau 4).

	SNCF Réseau	Externalités	Total
Coût de prévention (maintenance)	372	0	372
Coût des dommages résiduels	30	142	172
Total	402	142	544

Tableau 4: Coût de l'adaptation en 2025 (millions d'euros courants). Source: SNCF Réseau

MISE EN ŒUVRE D'UNE DÉMARCHE D'ÉVALUATION SOCIOÉCONOMIQUE

Pour agir efficacement en matière d'adaptation au changement climatique, le gestionnaire du réseau doit engager des actions par ordre de mérite décroissant, en commençant par les actions les plus coûts-efficaces (Carleton *et al.*, 2024). L'évaluation coûts-bénéfices permet d'éclairer ces décisions en mettant en balance les avantages générés par une action d'un côté, les dépenses consenties pour sa mise en œuvre de l'autre. Cet article en propose une illustration en évaluant l'intérêt de déployer des caténaires plus résilientes, mais plus coûteuses.

L'évaluation socioéconomique d'un projet d'adaptation

L'analyse coûts-bénéfices consiste à identifier les coûts et les bénéfices potentiels associés à un projet d'adaptation et à juger de son utilité sur la base de sa valeur actuelle nette socioéconomique (VAN-SE).

En adoptant une forme continue, la valeur actuelle nette socioéconomique s'écrit :

$$VAN - SE = -A + \int_0^N (D_t - C_t) e^{-\alpha t} dt$$

avec A le coût d'investissement, D_t les dommages évités, C_t les coûts opérationnels, N la durée de l'action et α le taux d'actualisation. Si la VAN-SE est positive, le projet doit être engagé ; s'il est négatif, il doit être refusé.

L'évaluation d'un projet sur le très long terme implique de gérer l'incertitude liée à l'évolution du climat. La trajectoire d'évolution du climat est largement documentée. En France, le portail DRIAS de Météo France propose une série de simulations climatiques, fournissant des données sur l'évolution climatique à une échelle fine, de l'ordre d'une dizaine de kilomètres. Cependant, ces simulations présentent deux types d'incertitudes : des incertitudes sur l'évolution globale du climat futur – largement dépendant des politiques d'atténuation des différentes régions du monde – et des incertitudes quant à la quantification des impacts du réchauffement. Cela invite à mobiliser les outils de l'évaluation économique en présence d'incertitude.

La méthode classique pour tenir compte de l'incertitude repose sur le calcul en espérance, souvent associé à von Neumann et Morgenstern. L'évaluateur modélise alors l'incertitude en développant différents scénarios, chacun étant assorti d'une probabilité d'occurrence exogène. Concrètement, si deux scénarios ont des probabilités p_1 et p_2 , le bénéfice attendu est calculé par $E(U) = p_1 U_1 + p_2 U_2$ avec U_1 et U_2 les bénéfices socioéconomiques du projet dans les scénarios 1 et 2 respectivement.

Cependant, cette méthode est peu appropriée au changement climatique. La détermination précise des probabilités de chaque scénario est subjective, et cette méthode

tend à négliger les scénarios rares, mais à risques élevés (Weitzman, 2009) que les actions d'adaptation visent précisément à éviter.

D'autres méthodes doivent donc être mobilisées. Certains s'écartent de l'analyse coûts-bénéfices classique comme la *Robust Decision Making* développée par Lempert et Schlesinger (2000). D'autres s'appuient sur la construction de scénarios, sans les probabiliser (Heal et Millner, 2014).

La stratégie nationale d'adaptation au changement climatique s'inscrit dans cet esprit en prenant en compte une vision dégradée de l'avenir - une augmentation de 4 °C de la température d'ici 2100 - qui diverge de la trajectoire cible des accords de Paris. C'est cette méthode que nous mettons en œuvre ci-après puisque nous évaluons les bénéfices de l'action par référence à la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC). Il s'agit d'une méthode prudentielle, même si des trajectoires encore plus pessimistes, avec une dégradation accrue de l'environnement, pourraient être envisagées.

Un cas d'application : l'adaptation des caténaires

Sur le réseau ferré français, près de 4 000 km de lignes du réseau, aujourd'hui équipées de caténaires 1500 V, doivent être renouvelées d'ici 2045. Deux options technologiques sont disponibles. La première consiste à régénérer ces installations à l'identique. Cela conduit à renouveler les caténaires, c'est-à-dire l'ensemble des câbles et porteurs qui alimentent les trains en électricité, et à remplacer les poteaux sans en modifier le piquetage.

Cette approche représente un coût d'environ 1,3 M€ par kilomètre de ligne, mais elle n'est pas sans faille. En effet, les effets de la chaleur, amplifiés par le changement climatique, viennent fragiliser les actifs. En cas de forte chaleur, le cuivre cède à la dilatation, les caténaires se détendent, le léger contact entre le pantographe et le fil de contact s'en trouve menacé. Un risque d'incident, arrachement de pantographe ou rupture de caténaire, plane alors sur l'exploitation. Le gestionnaire du réseau est alors contraint de réduire préventivement la vitesse des trains lors de ces épisodes caniculaires (au-delà de 35 °C).

Face à cette vulnérabilité, une alternative plus résiliente consiste à remplacer les caténaires de 1 500 V par une caténaire dite «régularisée». Cette technologie apporte davantage de résilience en garantissant une performance identique pour des températures comprises entre -20 °C et 60 °C. Cette innovation a un prix : environ 2,3 M€ par kilomètre, soit un surcoût

de 1 million d'euros, car elle implique de repenser le piquetage des poteaux, contrairement au renouvellement à l'identique.

Dans un tel contexte, le calcul coûts-bénéfices permet d'évaluer si les avantages socioéconomiques offerts par cette technologie sont supérieurs à ce coût. Si c'est le cas, la valeur actuelle nette du projet est positive.

Pour évaluer ces bénéfices, nous partons de l'équation présentée dans l'encadré suivant qui permet de calculer le bénéfice socioéconomique du projet à partir d'un nombre limité de paramètres.

L'analyse coûts-bénéfices montre que la caténaire régularisée est, en règle générale,



LE CALCUL DES BÉNÉFICES DU PROJET D'ADAPTATION

Le coût des dommages évités par l'installation de la caténaire modernisée est donné par la somme actualisée des dommages évités que l'on peut écrire, en utilisant une forme continue, comme suit :

$$B = \int_0^T nC e^{(\beta + \gamma - \alpha)t} dt$$

avec T la durée de vie de l'actif, n le nombre de jours de forte chaleur conduisant à des ralentissements avec une caténaire standard, β le taux de croissance annuel des jours de forte chaleur, C le coût socioéconomique des retards, γ le taux annuel de croissance de ce coût, et α le taux d'actualisation.

Pour développer cette équation, nous procédons à l'intégration de $nC e^{(\beta + \gamma - \alpha)t}$. La fonction $e^{(\beta + \gamma - \alpha)t}$ a pour primitive $\frac{1}{\beta + \gamma - \alpha} e^{(\beta + \gamma - \alpha)t}$.

On utilise l'évaluation des intégrales définies par :

$$\left[\frac{nC}{\beta + \gamma - \alpha} e^{(\beta + \gamma - \alpha)t} \right]_0^T$$

Cela devient :

$$\frac{nC}{\beta + \gamma - \alpha} \left[e^{(\beta + \gamma - \alpha)T} - e^{(\beta + \gamma - \alpha)0} \right]$$

Comme $e^{(\beta + \gamma - \alpha)0}$, nous avons donc :

$$B = \frac{nC}{\beta + \gamma - \alpha} \left[e^{(\beta + \gamma - \alpha)T} - 1 \right]$$

Cette équation permet d'évaluer les bénéfices socioéconomiques de l'adaptation en paramétrant un nombre limité de coefficients.

Pour notre évaluation, une durée de soixante-dix ans ($T=70$) cohérente, avec la durée de vie des installations électriques, est retenue.

Le coût socioéconomique du temps perdu à cause des ralentissements en cas de forte chaleur est évalué à partir du nombre moyen de trains sur les lignes étudiées, en tenant compte du nombre moyen de voyageurs selon la nature des trains. La valeur du temps retenue est celle utilisée pour l'évaluation des infrastructures de transport, pondérée par un facteur de 2,1, reflétant le caractère inopiné de la perte de temps. Ce coût est supposé croître de 2 % par an ($\gamma=2$ %) avec la croissance de la demande (1,2 % par an) et celle de la valeur du temps de transport (0,8 %). Le tableau en annexe détaille ces hypothèses.

Enfin, pour chaque ligne, le nombre de jours de fortes chaleurs, d'une température maximale de plus de 35 °C (n), est en ligne avec la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC-2023) disponible sur le site DRIAS. La valeur médiane des modèles mis à disposition par le portail DRIAS est retenue pour cette évaluation.

trop coûteuse par rapport aux bénéfices socioéconomiques qu'elle génère (figure 2, voir page suivante) et présente une valeur actuelle nette négative ou un ratio bénéfice/coût inférieur à 1.

Sa zone de pertinence se concentre sur les lignes très fréquentées, principalement dans le Sud de la France. Ces lignes, comme Narbonne/Sète/Tarascon ou Lyon/Bollène/Marseille, cumulent en effet un trafic important (plus d'une centaine de trains par jour) et une forte exposition aux fortes chaleurs.

Les hypothèses retenues peuvent significativement influencer les résultats de l'évaluation. Nous avons donc mené une série de tests de sensibilité pour quantifier l'influence des

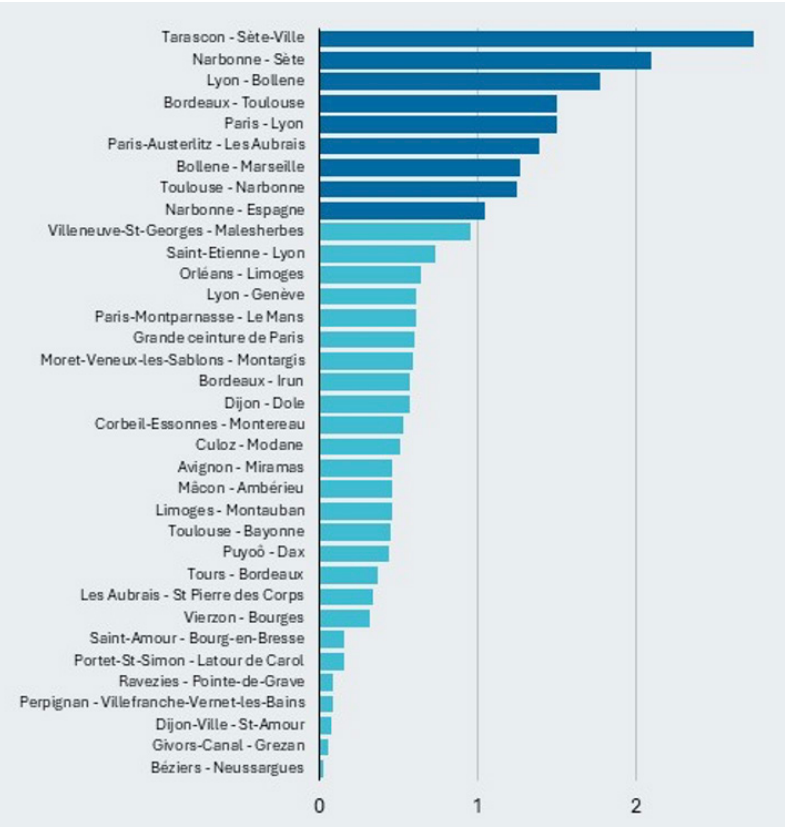


Figure 2: Bilan socioéconomique du déploiement de la caténaire 1 500 V régularisée (ratio bénéfice/coût)

incertitudes autour de quelques paramètres, mais aussi pour identifier les conditions les plus critiques pour la robustesse de notre modèle.

Les résultats de ces tests sont présentés dans le tableau qui suit. Ils montrent que des facteurs comme le différentiel de coûts entre les deux technologies et l'évolution du nombre de jours de fortes chaleurs influencent très fortement le résultat du bilan socioéconomique. Par exemple, si la croissance annuelle du nombre de jours de forte chaleur était inférieure de 20 % à celle retenue, le nombre de lignes à équiper en caténaire régularisée serait réduit de 25 %.

Au total, le nombre de lignes sur lesquelles la caténaire régularisée serait pertinente est donc restreint. Cela ne signifie pas qu'il ne faut rien faire lorsque le calcul économique conclut à l'absence de rentabilité, mais qu'il faut rechercher des solutions innovantes moins coûteuses et industrialisables.

Nature du test	Réseau à équiper (km)	Écart
Résultat du scénario central	1669	-
Test #1 : surcoût de la caténaire régularisée +20 %	1125	- 33 %
Test #2 : croissance du nombre de jours de forte chaleur -20 %	1245	- 25 %

Tableau 5: Tests de sensibilité sur l'éclairage socioéconomique. Source: SNCF Réseau

CONCLUSION

Dans un monde de ressources contraintes, l'analyse économique est essentielle pour concentrer les efforts d'adaptation du réseau ferré sur les actions les plus utiles à la collectivité: elle aide, à ce titre, à définir le périmètre des actions rentables et l'ordre de mérite des actions à entreprendre. L'incertitude scientifique n'est pas un obstacle à l'évaluation: les méthodologies modernes permettant d'assumer et de prendre en compte cette incertitude.

L'analyse coûts-bénéfices de l'adaptation, illustrée ici par l'exemple de la rénovation des caténaires, permet de quantifier quelques règles fondamentales de l'évaluation: une adaptation bien calibrée réduit le risque de dommages climatiques, mais ne l'élimine pas; les bénéfices socioéconomiques de l'adaptation vont au-delà des seuls gains que peut en retirer le gestionnaire d'infrastructures qui les met en œuvre.

Au total, l'évaluation socioéconomique trouve dans l'adaptation au changement climatique un nouveau domaine pertinent d'application. Il est désormais possible, et même indispensable, d'évaluer les enjeux climatiques d'un projet ferroviaire de rénovation ou de développement à l'aune de ses effets sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi de sa résilience au changement climatique. ♦

RÉFÉRENCES

- **ART** (2023). *Bilan annuel du marché ferroviaire voyageurs et fret, séries statistiques consolidées*.
- **Carleton, T., Duflo, E., Jack, B. K., & Zappalà, G.** (2024). Adaptation to climate change. In *Handbook of the Economics of Climate Change*.
- **DGITM** (2019). *Fiabilité des temps de déplacements des voyageurs*, 15 p.
- **France Stratégie** (2021). *Complément opérationnel : révision du taux d'actualisation*, 24 p.
- **Heal, G., & Millner, A.** (2014). Reflections: Uncertainty and decision making in climate change economics. *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(1), 120-137.
- **Lempert, R. J., & Schlesinger, M. E.** (2000). Robust strategies for abating climate change. *Climatic Change*, 45(3-4), 387-401.
- **Quinet, E.** (2013). *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*. Rapport pour le Commissariat général à la stratégie et à la prospective, France Stratégie.
- **SGPI** (2021). *Contre-expertise de l'évaluation socioéconomique du projet de CIGÉO*, 85 p.
- **Van Dantzig, D.** (1956). Economic decision problems for flood prevention. *Econometrica*, vol. 24, n° 3, 276-287.
- **Weitzman, M. L.** (2009). On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change. *The Review of Economics and Statistics*, 91(1), 1-19.

ANNEXE

Variable	Valeur retenue	Source
Taux d'actualisation socioéconomique, α	3,2 %	France Stratégie (2021)
Durée de l'évaluation, T	Soixante-dix ans	SNCF Réseau
Remplissage d'un TER	100 voyageurs/train	ART (2023)
Remplissage d'un TAGV	545 voyageurs/train	ART (2023)
Remplissage d'un TET	292 voyageurs/train	ART (2023)
Remplissage d'un Transilien	180 voyageurs/train	ART (2023)
Valeur du temps de transport	27 €/2015/h	Quinet (2013)
Pénibilité du temps de retard	2,1	DGITM (2019)