

LE RÔLE DES INFRASTRUCTURES DANS LA TRANSITION BAS-CARBONE ET L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DE LA FRANCE

Annexe
Résilience des infrastructures

En juillet 2021, l'Europe de l'Ouest a subi plusieurs épisodes de pluies diluviennes entraînant le débordement de cours d'eau de plusieurs bassins fluviaux. En Allemagne par exemple, la crue de la rivière Ahr a emporté des centaines de bâtiments, des ponts, des routes, et les canalisations d'eau et de gaz sont à reconstruire. Le retour à la normal se chiffre à près de 30 milliards d'euros.

Ces épisodes extrêmes sont rendus plus fréquents et plus intenses par le changement climatique en cours. Les précipitations extrêmes par exemple sont supposées s'intensifier de 7% par degré de réchauffement supplémentaire, alors même que l'évolution tendancielle de nos émissions de GES pourrait nous amener à +3°C de réchauffement par rapport à l'ère préindustrielle dès 2050.

La France métropolitaine, comme le reste du monde, va devoir faire face rapidement à cette nouvelle donne climatique : en plus d'investir dans la réduction des émissions territoriales, il est nécessaire de se préparer à ses impacts.

S'y préparer passe par l'adaptation des infrastructures existantes, de manière à conserver leur intégrité structurelle et maintenir leur fonctionnalité. Deux types d'investissements doivent être réalisés : des investissements dits curatifs qui correspondent au coût de la reconstruction des ouvrages endommagés par un aléa climatique, et des investissements dits préventifs qui visent à éviter tout ou partie des dommages probables prévisionnels. Pour le préventif un investissement cumulé proche de 13 milliards d'euros pourrait être nécessaire d'ici 2050, et proche de 25 milliards d'euros pour le curatif, ceci dans un scénario pessimiste (mais tendanciel) d'évolution de nos émissions de GES.

L'évolution notable de certains risques climatiques dans un scénario climatique pessimiste, comme l'élévation du niveau de la mer, la plus grande intensité d'épisodes de crues fluviales ou encore le stress hydrique, doivent également donner lieu à la construction ou au renforcement d'ouvrages de protection vis-à-vis de ces risques. Le rehaussement identifié comme nécessaire (mais non suffisant) des digues fluviales et côtières nécessiterait un investissement cumulé de plus de 3 milliards d'euros d'ici la fin de siècle pour protéger les zones côtières à plus forts enjeux (très exposées et avec une population et activité économique importante). Par ailleurs, pour préserver la ressource en eau, il apparaît nécessaire de privilégier le déploiement des technologies de gestion de nappes phréatiques, qui comparées à un développement massif des retenues collinaires ont l'avantage d'un moindre impact environnemental et d'un coût unitaire de construction compétitif.

Ce travail est exploratoire. Son approche méthodologique fondée, entre autres, sur l'utilisation du score climatique, permet de s'assurer que les enjeux clés ont bien été traités pour les infrastructures de France métropolitaine. Une première quantification des enjeux d'investissement a été réalisée au niveau d'un échantillon, puis extrapolée à la maille nationale. Ce chiffrage permet de pointer le niveau d'efforts d'investissements à fournir, et également d'encourager la création d'une politique nationale sur le sujet de l'adaptation au changement climatique.

Cette étude donne notre première vision d'ensemble de la problématique et doit être complétée par des analyses approfondies plus proches du terrain de la vulnérabilité

structurelle et fonctionnelle des ouvrages d'art ainsi que des solutions spécifiques d'adaptation à mettre en œuvre. Progresser sur ces questions nécessiterait de passer par une connaissance plus précise pour mobiliser l'action publique et accompagner la transition des territoires vers des systèmes davantage résilients.

Contexte de la nouvelle donne climatique

Si la réduction des émissions de gaz à effet de serre (i.e. l'atténuation) est indispensable pour limiter la hausse de l'intensité et de la fréquence des aléas climatiques, il est également nécessaire d'anticiper les impacts physiques du changement climatique. Le premier défi de l'adaptation au changement climatique est de passer d'une réponse réactive, sectorielle et au cas par cas, à une logique systémique, proactive et préventive. C'est pour progresser dans cette logique que le travail sur le volet « Résilience » a été réalisé. Dans la continuité du volet traitant de la réduction des émissions, ce travail a vocation à quantifier les investissements futurs nécessaires au maintien du fonctionnement de nos infrastructures, et à la mise en place de nouveaux ouvrages de protection, dans un contexte de multiplication et d'intensification des impacts du dérèglement climatique.

« L'évolution des menaces induites par le changement climatique dépend très directement de la réussite de l'atténuation. Mais alors que les impacts du changement climatique affectent déjà le territoire national, la mise en œuvre de l'adaptation doit être accélérée, planifiée et les politiques existantes doivent être mises en cohérence » - *Haut Conseil pour le Climat, Rapport annuel, 2021*

Ce volet « Résilience » se structure en deux exercices distincts :

1. L'évaluation du besoin d'adaptation du parc des infrastructures existantes à l'horizon 2050 et dans un scénario qui reflète les dynamiques actuelles d'évolution des émissions de gaz à effet de serre
2. L'évaluation du besoin d'adaptation via de nouvelles infrastructures publiques de protection vis-à-vis de 3 risques distincts : le risque d'élévation du niveau de la mer, celui d'inondation des cours d'eau, et le risque de stress hydrique.

Une contextualisation préalable du climat futur de la France métropolitaine a été réalisée. Elle prend la forme d'une représentation cartographique, qui se retrouve dans le fascicule Annexe Résilience. L'étude de l'évolution de quelques aléas climatiques, qu'ils soient relatifs à l'évolution de des températures, les précipitations ou la montée du niveau de la mer, suffit à comprendre que **la France métropolitaine va devoir faire face, y compris à court terme, à une nouvelle donne climatique : en plus d'investir dans la réduction des émissions, il est nécessaire de se préparer à ce nouveau climat.**

I. Contextualisation du climat futur

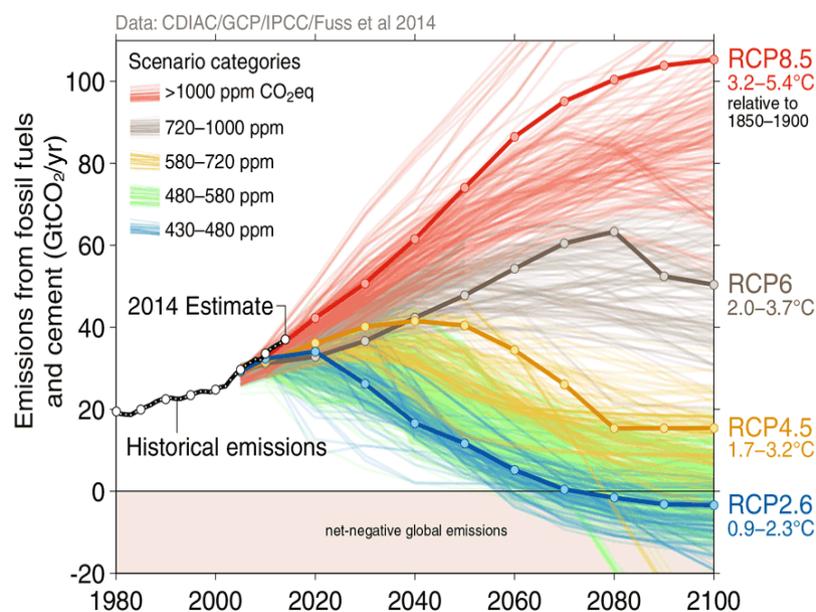
Une contextualisation cartographique de l'évolution de certains aléas climatiques pertinents à l'horizon du milieu et de la fin du XXI^{ème} siècle est réalisée. Elle a pour objectif d'aider à représenter la nouvelle donne climatique à laquelle il est nécessaire de se préparer.

Les 10 aléas climatiques retenus sont détaillés ci-dessous. Leurs évolutions ont été représentées dans deux scénarios issus des travaux du 5^{ème} rapport du GIEC publié en 2014 (RCP 4.5 et RCP 8.5).

Zoom – Les différents scénarios du GIEC

Les quatre profils d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre (Representative Concentration Pathways en anglais, ou RCP) retenus par les experts du GIEC pour son 5^{ème} Rapport publié en 2014 ont été traduits en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire de modification du bilan radiatif de la planète. Le bilan radiatif représente la différence entre l'énergie reçue (principalement du soleil) et celle perdue (réémission vers l'espace) par le système climatique de la Terre.

Les 4 profils RCP correspondent chacun à une évolution différente de ce forçage. Ils sont identifiés par un nombre, exprimé en W/m² (puissance par unité de surface), qui indique la valeur du forçage considéré. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère conserve de l'énergie et se réchauffe.



- Le scénario RCP 2.6 (2.6W/m²) est le plus ambitieux ; il fait l'hypothèse d'un pic des émissions de CO₂ en 2020 avec un déclin important par la suite. Il est le seul à respecter les accords de Paris.
- Le scénario RCP 4.5 est un scénario intermédiaire qui envisage une hausse des émissions de gaz à effet de serre jusqu'aux alentours de 2050, avant de baisser puis se stabiliser avant la fin du siècle. Il conduit à réchauffement global d'environ 3°C.
- Le scénario RCP 8.5 est le plus pessimiste. Il ne prévoit aucune régulation significative des émissions de gaz à effet de serre et aboutirait à un réchauffement global d'environ 5°C. Ce scénario reflète les dynamiques actuelles d'évolution des émissions de gaz à effet de serre.

Aléas climatique retenus pour l'étude

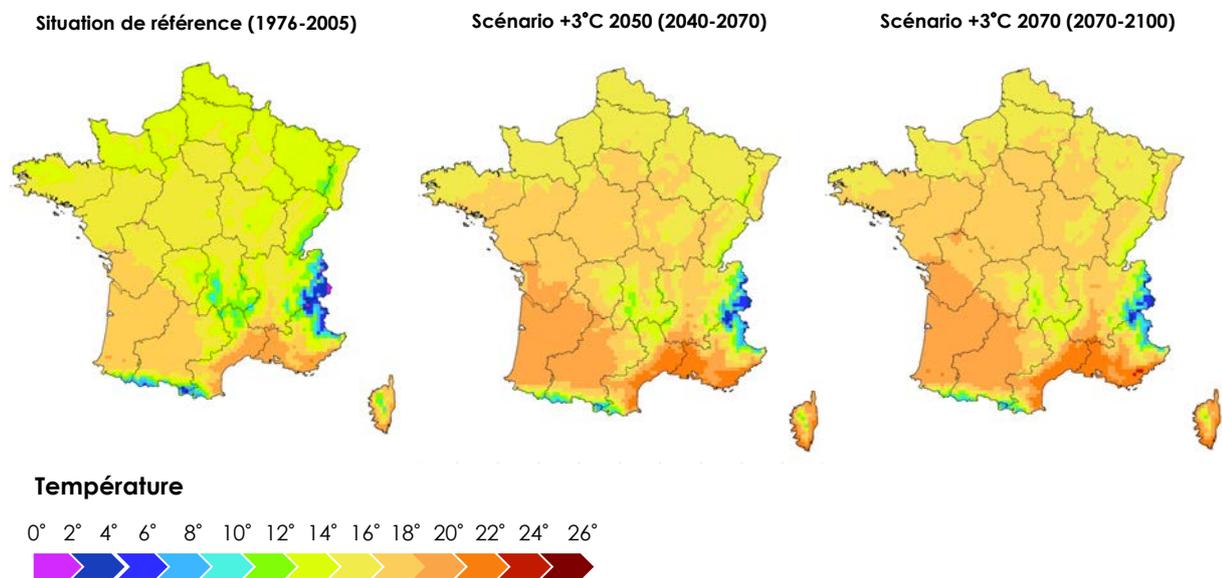
| Température | Précipitations |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Température maximale • Nombre de jours de vague de chaleur • Nombre de jours de forte chaleur | <ul style="list-style-type: none"> • Cumul des précipitations • Nombre de jours de précipitations extrêmes • Précipitations quotidiennes intenses • Précipitations quotidiennes extrêmes • Période de sécheresse |
| Mer | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Hausse du niveau de la mer | |
| Vent | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Nombre jours vent fort | |

Source des données : indicateurs 2020 issus de la base DRIAS, et données issues de l'Agence Européenne de l'Environnement pour la hausse du niveau de la mer

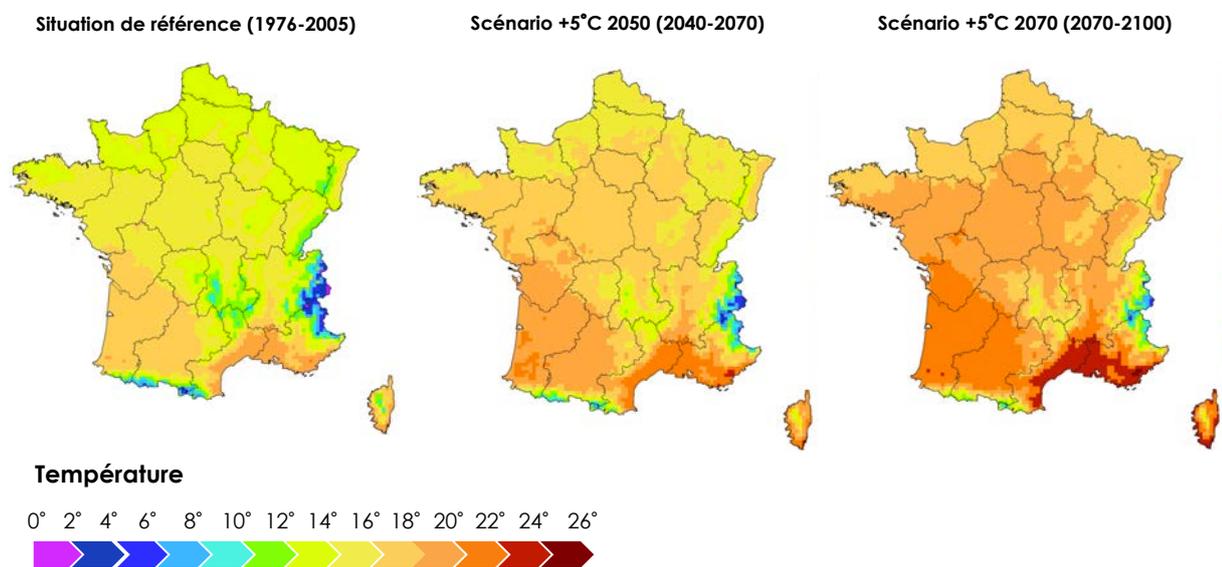
Plus d'une trentaine de cartes ont été réalisées par Carbone 4 pour représenter l'évolution de ces aléas climatiques. Toutefois, dans un objectif de concision, seule l'évolution de 4 aléas, particulièrement déterminants pour alimenter l'étude, a été développée dans cette annexe.

1. Évolution des températures moyennes annuelles maximales pour la France métropolitaine

RCP 4.5



RCP 8.5

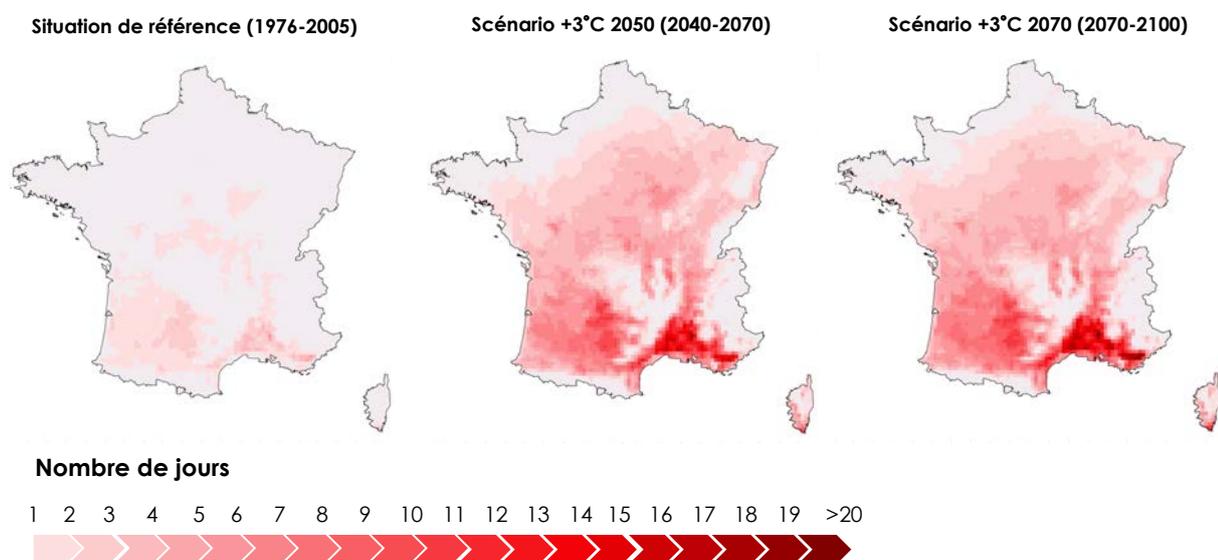


Dans le scénario RCP 8.5, et à horizon 2050, on observe une hausse des températures moyennes entre +0,8 et +1,8°C, et une hausse encore bien supérieure à horizon 2080, entre +2,6° à +5,3°C en été par rapport à la situation de référence. De façon schématique, en 2050, les températures dans le sud de la métropole seront proches de celles actuelles du sud de l'Espagne.

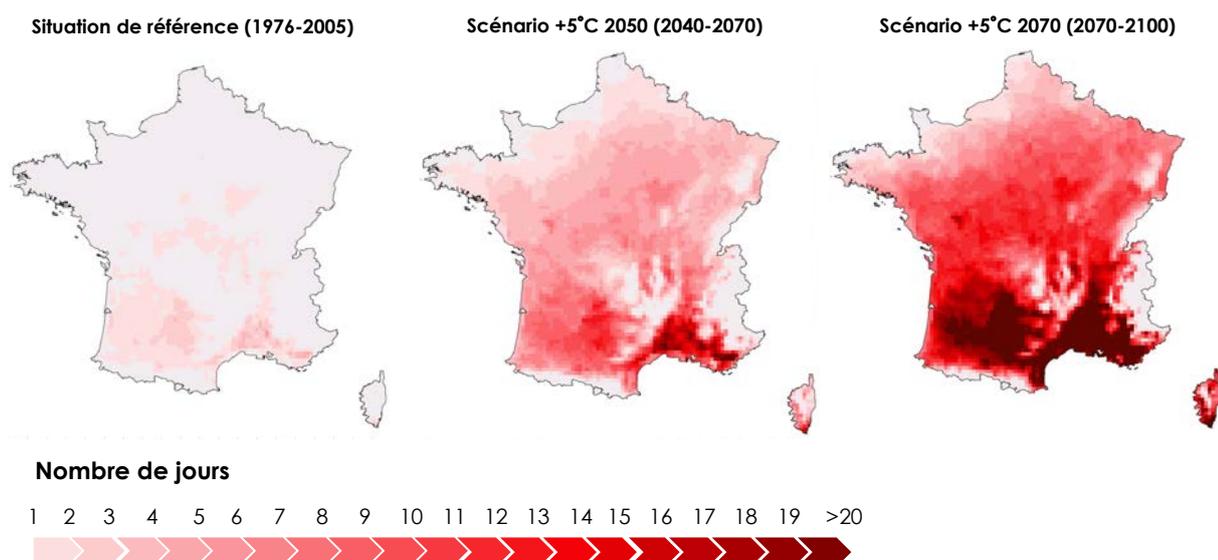
L'horizon fin de siècle du scénario RCP 4.5, quant à lui, correspond peu ou prou à celui de milieu de siècle du scénario RCP 8.5.

2. Évolution du nombre de jours de fortes chaleurs pour la France métropolitaine ($T^{\circ} > 35^{\circ}\text{C}$ à l'ombre sous abri)

RCP 4.5



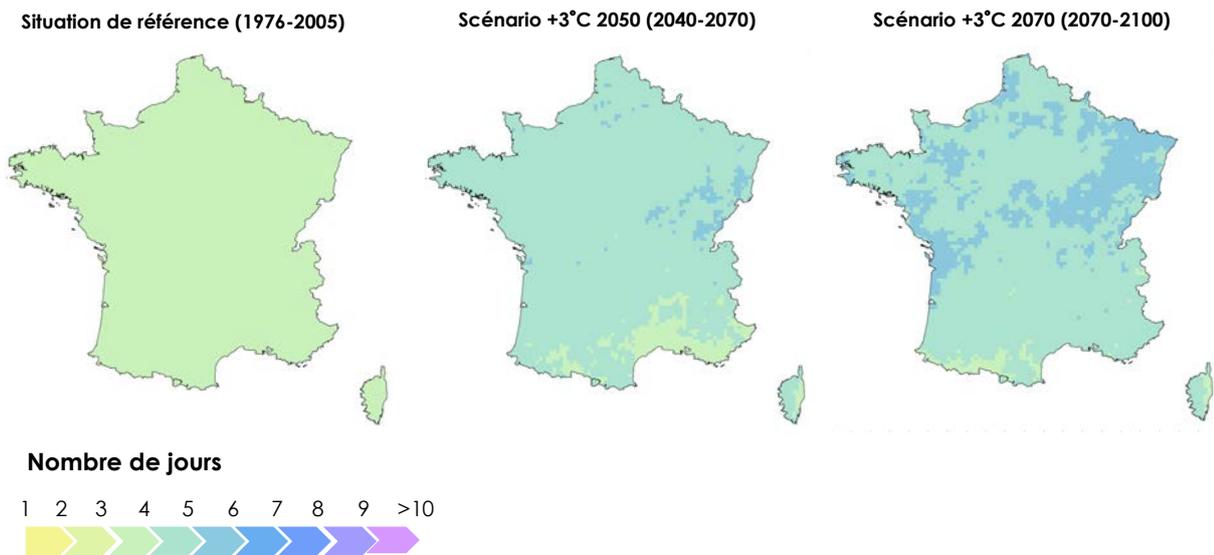
RCP 8.5



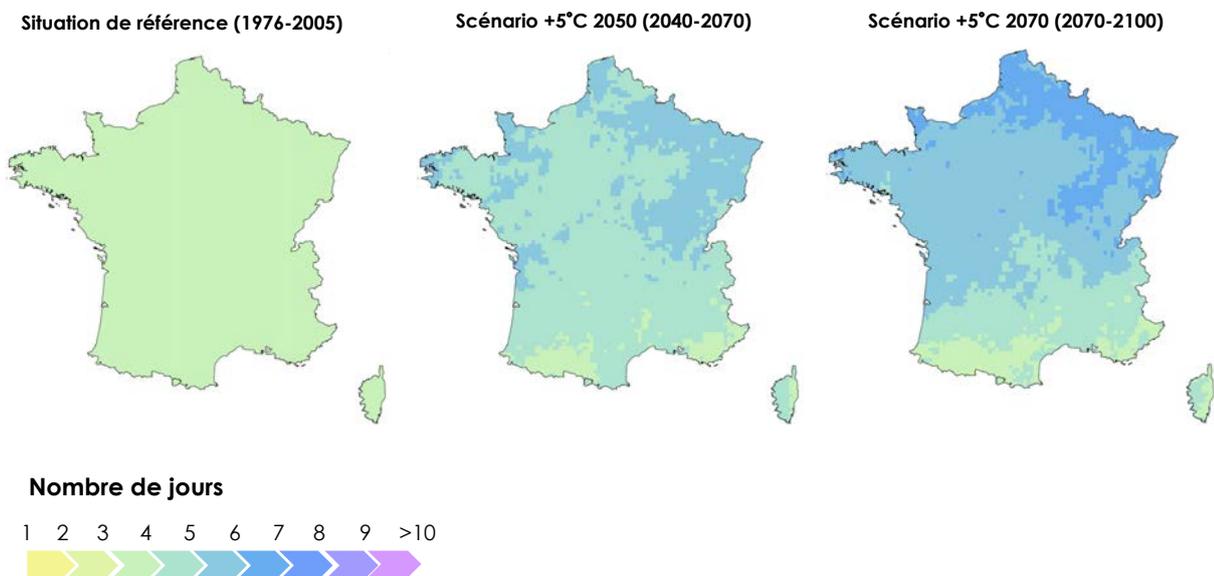
Dans un scénario RCP 8.5, à horizon fin de siècle, le nombre de jours de forte chaleur (35°C à l'ombre sous abri) pourrait dépasser les 10 jours dans la presque totalité du pays, et les 20 jours au Sud-Est du territoire métropolitain.

3. Évolution du nombre de jours de précipitations extrêmes pour la France métropolitaine (cumul de précipitations \geq 99^e centile¹, en nombre de jours)

RCP 4.5



RCP 8.5

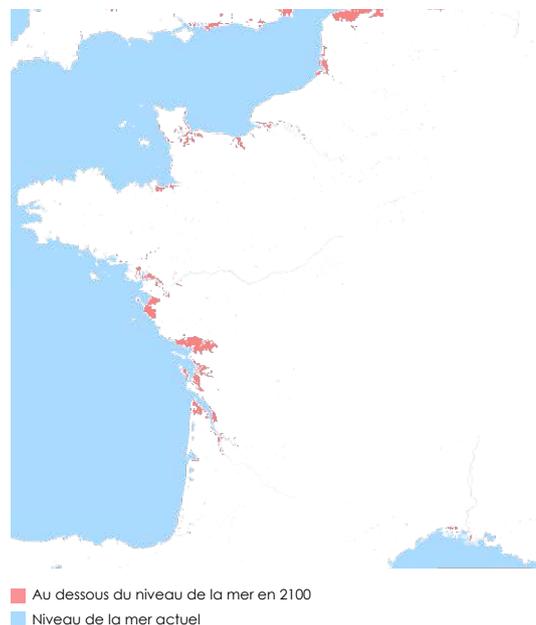


¹ Dans une série statistique, le rang centile d'une donnée indique le pourcentage des données ayant une valeur inférieure ou égale à cette donnée. Le 98^e centile permet ainsi de mettre de côté les 98% inférieurs du jeu de données : autrement dit, il s'agit ici d'étudier les 2% des jours où le vent souffle le plus fort.

Les précipitations sont une variable climatique moins précise dans leur modélisation que la température. Il est toutefois possible d'observer que le nombre de jours de précipitations extrêmes évolue nettement entre la période de référence et l'horizon long-terme dans le scénario RCP 8.5. Cet aléa est en hausse en particulier dans la moitié nord de l'hexagone, et plus spécifiquement dans la région Nord-Est.

4. Évolution de la hausse du niveau marin pour la France métropolitaine

Impact de l'élévation du niveau marin dans le scénario RCP 8.5 à l'horizon fin du siècle



Ces projections d'élévation du niveau marin proviennent de travaux publiés par Kopp et al. en 2017, prenant en compte des facteurs tels que l'expansion thermique de l'océan, la fonte des calottes glaciaires et le mouvement des terres.

En l'absence de tout ouvrage de protection existants ou futur, les zones en rouge sur la carte seraient submergées de façon permanente à la fin du siècle selon le scénario RCP 8.5 du GIEC. Des inondations côtières temporaires bien plus étendue pourraient également avoir lieu du fait des effets combinés de l'élévation du niveau moyen de la mer et de la plus grande intensité des tempêtes (vagues plus élevées et puissantes), surtout si ces épisodes tempétueux ont lieu en période de grandes marées.

L'étude de l'évolution de ces quelques aléas climatiques, qu'ils soient relatifs à l'évolution de la température, les précipitations ou la montée du niveau de la mer, suffit à comprendre que **la France métropolitaine va devoir faire face, y compris à court terme, à une nouvelle donne climatique : en plus d'investir dans la réduction des émissions, il est nécessaire de se préparer à ce nouveau climat.**

II. Besoin en adaptation des infrastructures existantes

La première phase du volet « Résilience » a pour objectif de quantifier, par rapport à la situation actuelle, le **besoin en investissement *additionnel*** nécessaire au maintien du niveau de service rendu par les infrastructures existantes, que ce soit via des **travaux préventifs** visant à éviter tout ou partie des dommages causés par les aléas climatiques futurs ou via des **travaux curatifs**, pour remettre en fonction ces infrastructures à la suite des impacts d'un aléa climatique.

Le présent travail sur ces questions est exploratoire. Son approche méthodologique fondée, entre autres, sur l'utilisation du score de risque climatique, permet cependant de s'assurer que les enjeux clés ont bien été traités pour les infrastructures de France métropolitaine. Une première quantification des enjeux d'investissement a été réalisée au niveau d'un échantillon, puis extrapolée à la maille nationale. Ce chiffrage permet de pointer le niveau d'efforts d'investissements à fournir, et également d'encourager la création d'une politique nationale sur le sujet de l'adaptation au changement climatique.

Le besoin en investissement est qualifié d'« additionnel » car il s'ajoute aux travaux usuels de rénovation et maintenance déjà identifiés comme nécessaires pour conserver l'intégrité des infrastructures et leur niveau de service actuel (qui sont traités dans la partie « réduction » de cette étude). Dit autrement, cette étude tente d'isoler et quantifier le coût de l'adaptation à une nouvelle donne climatique, se caractérisant par une multiplication et une intensification des aléas climatiques.

Ce besoin en investissement porte sur les types d'infrastructures suivants, illustrés avec des exemples d'impact du changement climatique :

| | | Exemple d'impact du dérèglement climatique |
|-----------|---|---|
| Mobilité | Routes | Chaussées fissurées |
| | Tunnels | Perturbation du trafic |
| | Ponts | Ouvrage détruit par une inondation |
| | Rail (surface) | Rail déformés |
| | Rail (souterrain) | |
| | Ports | Aménagements littoraux mis en danger par des submersion marines |
| | Aéroports | Ramollissement de l'asphalte |
| Eau | Réseau de distribution de l'eau | Corrosion des tuyaux |
| | Station de traitement de l'eau | |
| Energie | Infrastructures réseau électrique (surface) | Surchauffe des équipements |
| | Infrastructures réseau électrique (souterrain) | |
| Numérique | Infrastructures télécom (fibre optique, surface) | Surchauffe des équipements |
| | Infrastructures télécom (fibre optique, souterrain) | |

Les impacts du dérèglement sur les infrastructures sélectionnées ont été détaillés au sein des « profils de vulnérabilité » construit dans le cadre de cette étude et explicités par la suite.

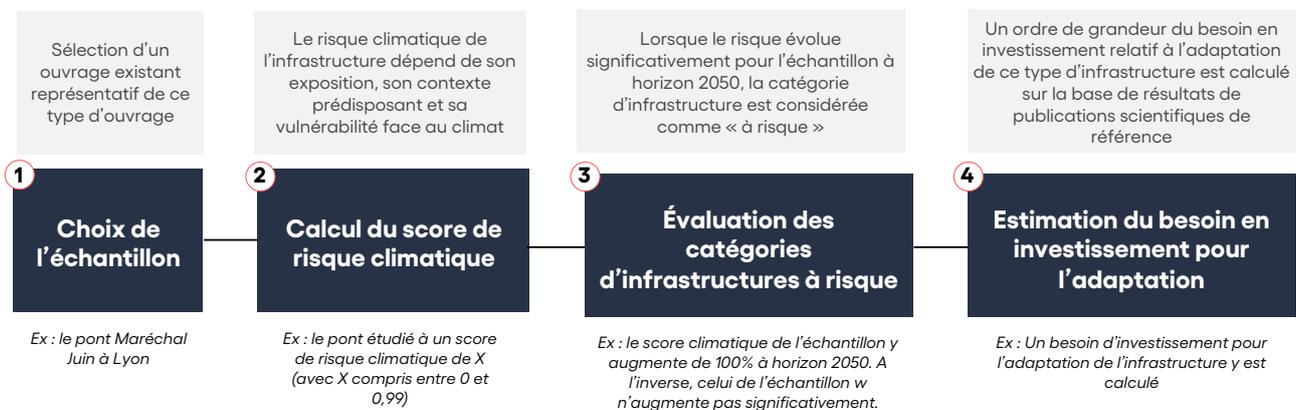
Principes méthodologiques

La démarche générale proposée se déroule en 4 phases successives et repose sur une réflexion par échantillonnage, par la suite extrapolée au reste du territoire métropolitain. Le choix de cette approche s'est trouvé renforcé par la nécessité de disposer de données géolocalisées, car l'évolution de l'aléa climatique varie en fonction de la localisation.

Cette approche permet de produire un premier **ordre de grandeur** pertinent du besoin d'investissements pour adapter les infrastructures existantes, malgré un nombre très important d'ouvrages à traiter, une accessibilité souvent non immédiate de certaines informations, ou encore une absence de données.

1. La première étape consiste à définir un échantillon pour chaque catégorie d'infrastructure de sorte à disposer de données géolocalisées à exploiter.
2. Sur la base de cet échantillon, un score de risque climatique a été calculé, c'est à dire un score de vulnérabilité de l'infrastructure en question face à différents aléas climatiques extrêmes et graduels. La méthodologie de calcul de ce score est détaillée par la suite et se base en partie sur la méthodologie CIARA² développée par Carbone 4. L'évolution de ce score de risque climatique dans le futur permet d'identifier les infrastructures à risque et les aléas climatiques induisant les dommages les plus importants.
3. L'évolution de ce score de risque climatique dans le futur permet d'identifier les infrastructures à risque et les aléas climatiques induisant les dommages les plus importants.
4. Lorsque ce score de risque évolue significativement, le besoin en investissement pour l'adaptation de cette catégorie d'infrastructure a été estimé sur la base de publications scientifiques et à l'échelle du territoire métropolitain.

Cette approche en entonnoir a permis de recentrer l'étude sur les sujets les plus importants. Ainsi, les ordres de grandeur d'investissements quantifiés couvrent la partie la plus significative de la question de l'adaptation au changement climatique pour les infrastructures existantes.



² <https://ciara.carbone4.com/>

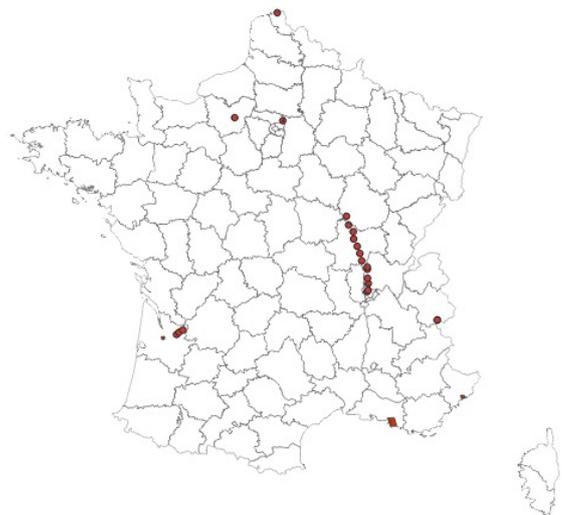
En d'autres termes, cette étude propose une première estimation du coût d'investissement additionnel pour 1. Réparer et 2. Se préparer à la multiplication et l'intensification des impacts induits par les aléas climatiques en France ; ceci à horizon 2050 et dans un scénario pessimiste de l'évolution des émissions de GES au niveau mondial.

1. Le choix des échantillons



-  Route : **D1089 de Libourne à Saint Médard de Guzières**
-  Tunnel : **Tunnel du Fréjus**
-  Pont : **Pont Maréchal Juin à Lyon**
-  Rail (surface) : **Tronçon de 100km du trajet Paris Gare de Lyon à Lyon Perrache**
-  Rail (souterrain) : **Tunnel ferroviaire de Fréjus**
-  Port : **Port de Dunkerque**
-  Aéroport : **Aéroport de Roissy**
-  Réseau de distribution de l'eau : **Ville de Bordeaux**
-  Station de traitement de l'eau : **Centre de traitement des eaux usées de Gragny**
-  Infrastructures réseau électrique (surface et souterrain) : **Ville de Marseille**
-  Infrastructures télécom (fibre optique surface et souterrain) : **Ville de Nice**

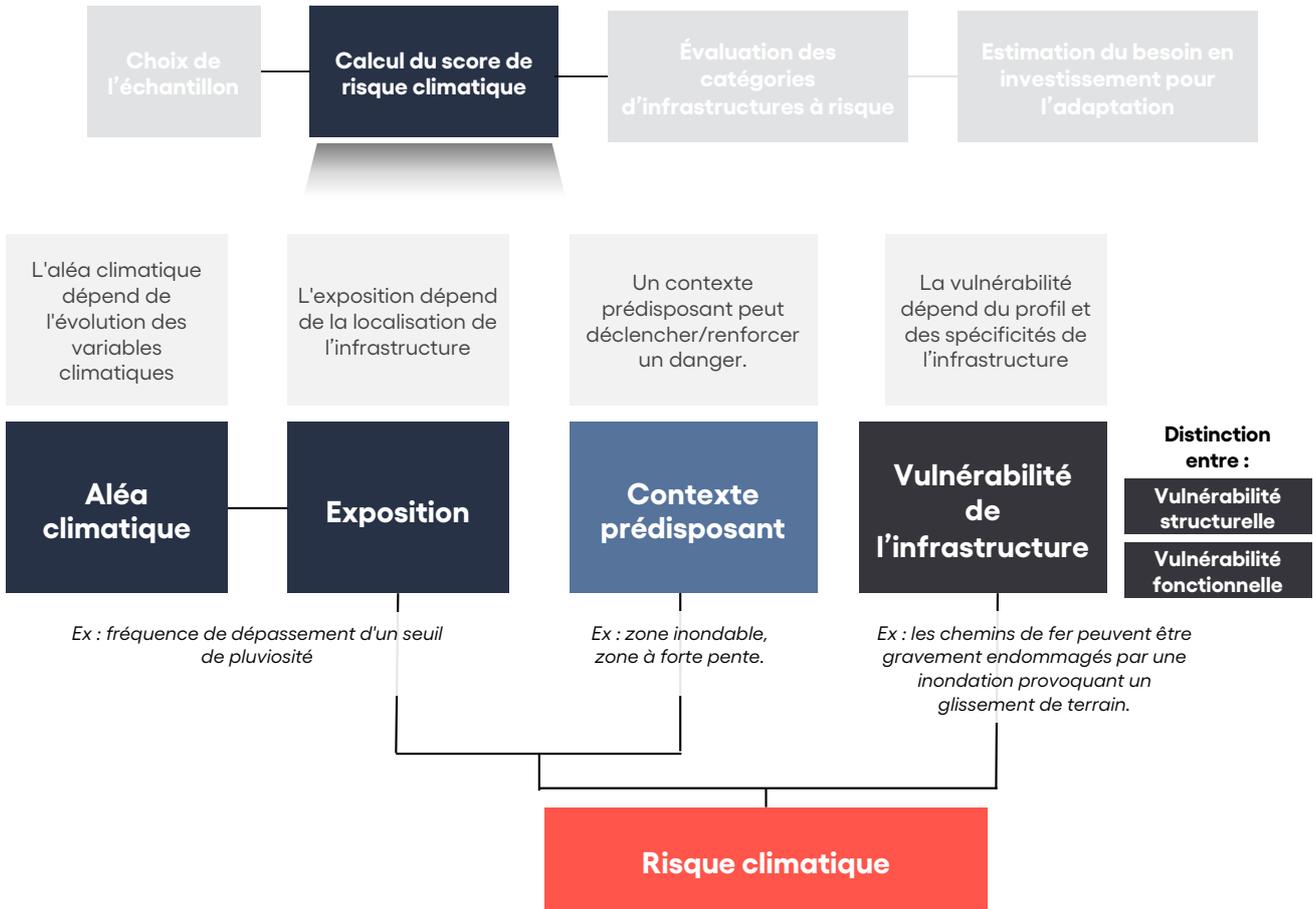
Vision géographique des échantillons retenus



Les échantillons choisis couvrent un périmètre géographique large, et des infrastructures connues par le grand public.

2. Calcul du score de risque climatique

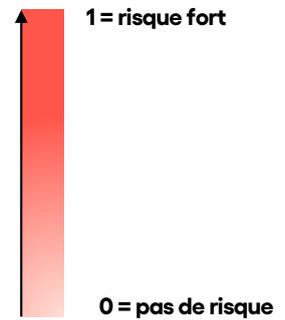
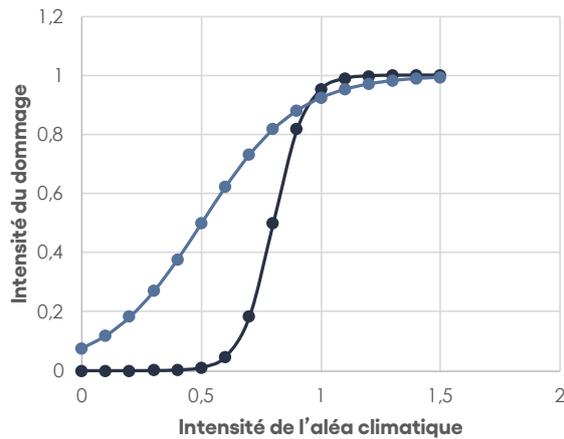
Pour chaque aléa climatique et chaque type d'infrastructure, le risque est une combinaison de projections climatiques, d'une exposition, d'un contexte prédisposant et d'une vulnérabilité structurelle.



A/ Exposition d'une infrastructure à un aléa climatique

Pour aboutir à un score de risque sur ces deux briques, il est nécessaire de faire le lien entre l'aléa climatique et les dommages potentiels infligés à une infrastructure : 11 fonctions de dommages ont été créées. Ces fonctions suivent soit un profil d'aléa extrême, soit un profil d'aléa chronique. Des scores sont produits pour chacun sur une échelle de 0 à 1.

Exemple de fonctions de dommage

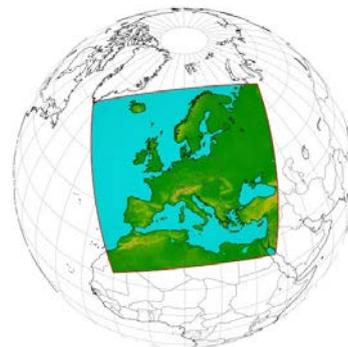


- Certaines fonctions de dommages sont spécifiques à un type d'infrastructure (par exemple, les rails sont très sensibles à une période de trois jours consécutifs pendant laquelle la température dépasse 30°C - vagues de chaleur).
- Certaines fonctions de dommages sont utilisées pour différents types d'infrastructures (par exemple les inondations).

Pour chaque dommage potentiel identifié, un indicateur climatique est défini. Puis pour chaque indicateur climatique, un seuil critique est déterminé. Les projections climatiques sont ensuite réalisées à horizon 2050 et dans un scénario pessimiste d'évolution des émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5). Le choix de ce scénario se justifie par la faible divergence en termes d'impact des aléas climatiques entre les différents scénarios de référence du 5^{ème} rapport du GIEC à horizon 2050.

Exemple d'aléas et leur indicateurs climatiques associés

| | | |
|--|----------------------------------|--|
| | Hausse de la température moyenne | ➤ Degrés-jours de refroidissement |
| | Vagues de chaleur | ➤ Nombre de jours où la T°C est supérieure à X°C |
| | Stress hydrique | ➤ Nombre de périodes consécutives de 10 jours sans pluie |



Pour chaque fonction de dommage, un seuil climatique critique est déterminé pour l'indicateur climatique.

B/ Vulnérabilité de l'infrastructure

- Pour chaque infrastructure retenue, des profils de vulnérabilité ont été construits sur la base de 9 aléas climatiques, à la fois aigus et chroniques.

9 aléas climatiques, à la fois aigus et chroniques

évaluée avec l'expérience multi-modèle CORDEX, pour 2050 et le scénario RCP 8.5

| | | |
|--|---|---|
| | Hausse de la température moyenne | C |
| | Hausse des précipitations | C |
| | Baisse des précipitations | C |
| | Vagues de chaleur | A |
| | Feux de forêt | A |
| | Stress hydrique | A |
| | Inondations et glissement de terrain | A |
| | Vents violents et tempêtes | A |
| | Montée du niveau de la mer, érosion côtière | C |

13 profils de vulnérabilité

créé par Carbone 4 sur la base de l'expertise de Carbone 4 et d'une analyse documentaire

| |
|---|
| Routes |
| Tunnels |
| Ponts |
| Rail (surface/souterrain) |
| Ports |
| Aéroports |
| Réseau de distribution de l'eau |
| Station de traitement de l'eau |
| Infrastructures réseau électrique (surface/souterrain) |
| Infrastructures télécom (fibre optique, surface/souterrain) |

Pour aboutir à un besoin en financement, la vulnérabilité physique a été rapproché d'un indicateur financier, le CAPEX, tandis que la vulnérabilité fonctionnelle a été rapprochée de l'EBITDA.

Vulnérabilité structurelle - CAPEX

Vulnérabilité fonctionnelle - EBITDA

A Aléa aigu

C Aléa chronique

- La vulnérabilité d'une infrastructure est construite comme le dommage théorique maximum provoqué par un ou plusieurs aléas climatiques sur cette infrastructure. La vulnérabilité a été évaluée en fonction de l'impact potentiel sur l'intégrité de l'infrastructure (vulnérabilité structurelle - dommages structurels sur l'infrastructure) et sa capacité à rester fonctionnelle (vulnérabilité fonctionnelle - incapacité à assurer un service optimal, ou perte de revenus pour l'exploitant). Là aussi, des scores sont produits pour chaque infrastructure et chaque aléa sur une échelle de 0 à 1.

Pour chaque aléa et chaque type d'infrastructure

Vulnérabilité structurelle (CAPEX)
dommages structurels

| |
|--------------|
| N/A = 0.0 |
| Faible = 0.3 |
| Moyen = 0.6 |
| Fort = 0.9 |

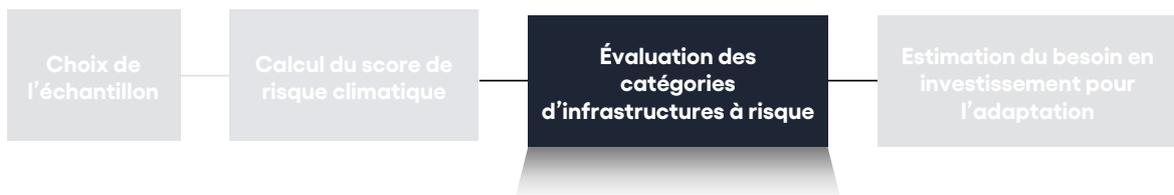
Vulnérabilité fonctionnelle (EBITDA)
incapacité à assurer un service optimal

| |
|--------------|
| N/A = 0.0 |
| Faible = 0.3 |
| Moyen = 0.6 |
| Fort = 0.9 |

C/ Calcul du score de risque climatique

La combinaison du score relatif aux projections climatiques et du score relatif à la vulnérabilité structurelle ou fonctionnelle des infrastructures permet d'obtenir un ultime score, dit « de risque climatique », qui reflète l'impact futur sur les infrastructures de l'ensemble des aléas climatiques étudiés.

Taux de croissance du score de risque par type d'infrastructure



Le détail des scores de risque climatique est disponible en annexe. Ils doivent être interprétés comme reflétant l'évolution dans le temps des dommages anticipés sur les infrastructures. La valeur « de référence » donne une indication sur l'impact d'un climat semblable à la période de référence utilisée (1976-2005) sur l'infrastructure. La valeur « future » donne une indication sur l'impact d'un climat semblable à celui de 2050 (pour être plus précis, au climat attendu entre les années 2041-2070) sur l'infrastructure.

Ces scores sont dits « climatiques » en ce qu'ils donnent une indication du risque encouru par les infrastructures face aux 9 aléas climatiques, aigus et chroniques, décrits précédemment. Pour cette raison, certains scores peuvent paraître faibles au global, comme c'est le cas pour la route. Pour autant, la sensibilité de l'infrastructure à un risque climatique en particulier, comme les fortes chaleurs pour la route, peut être élevée.

Un score de risque climatique en tant que tel est une donnée sans unité physique immédiate, mais son évolution dans le temps nous donne une indication sur l'évolution des impacts induits par le changement climatique et subi par les infrastructures.

Pour cette raison, ***l'évolution de ce score a été utilisé dans la suite de l'étude pour identifier les infrastructures « à risque », et par conséquent celles pour lesquelles un calcul du besoin en investissement pour leur adaptation a été réalisé.***

Taux de croissance du score de risque climatique

| | Vulnérabilité physique | Vulnérabilité fonctionnelle |
|------------|------------------------|-----------------------------|
| | 100% | 0% |
| | 38% | 124% |
| | 14% | 0% |
| | 74% | 42% |
| | 7% | 148% |
| | 234% | Non traité |
| | 0% | 103% |
| | 1334% | 35% |
| | 0% | 0% |
| | 34% | 14% |
| souterrain | 64% | 79% |
| | 18% | 0% |
| souterrain | 46% | 0% |

La quantification du besoin en investissements pour adapter les infrastructures existantes aux aléas les plus impactants a ensuite été réalisée sur la base des résultats d'une ou plusieurs publications scientifiques, selon une méthode détaillée ci-après pour chaque catégorie d'infrastructure. Les chiffrages réalisés ne peuvent toutefois pas être comparé entre infrastructures : le périmètre d'étude dépend directement de l'infrastructure étudié, sa vulnérabilité face au climat, et l'état de la connaissance sur les coûts induit par l'adaptation de ces ouvrages.

Détail des résultats

- Route

a. *Évolution du score de risque climatique (structurel et fonctionnel)*

Le score de risque structurel de l'échantillon augmente de près de 100% une fois projetée dans le climat attendu à horizon 2050 (scénario RCP 8.5), du fait de la sensibilité de la route retenue (D1089 en Gironde) aux vagues de chaleur. Le score de risque fonctionnel, quant à lui, ne connaît aucun changement notable.

Échantillon étudié :
Route départementale D1089

| Rappel des scores de risque climatique | | | |
|--|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1976-2005 | | 2041-2070 | |
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle | Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,07 |

Evolution du score de risque climatique structurel :
+100%

b. Impacts des aléas clés identifiés

Ce calcul du score climatique a permis de mettre en valeur la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur. Les impacts induits par cet aléa et ayant donné lieu à une quantification sont explicités ci-dessous.

| Aléas les plus impactant | |
|--|--|
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Augmentation de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur | Augmentation de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur |
| ➤ Aucune évolution notable du score de risque climatique fonctionnel | |

| Impacts qualifiés | |
|---|--|
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Ramolissement de l'asphalte entraînant des difficultés de circulation / une diminution du trafic. Hausse des dépenses de maintenance. | Ramolissement de l'asphalte, omiérage. |
| ➤ Aucune évolution notable du score de risque climatique fonctionnel | |

c. Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon

De sorte à quantifier un ordre de grandeur relatif de l'investissement curatif à fournir à horizon 2050 suite à l'impact du changement climatique sur l'intégrité structurelle des routes, la publication scientifique suivante « *Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs, Yaning Qiao et al., 2015* » a servi de référence.

Cette étude fait la démonstration qu'à horizon 2050 et dans un scénario climatique pessimiste, les travaux de réfection du revêtement des routes interviennent 8 à 16% plus tôt du fait du changement climatique. Une hypothèse conservatrice de 8% est retenue. Concrètement, cette hypothèse implique de réaliser des travaux préventifs sur une chaussée un an plus tôt, en considérant que les travaux de prévention sont réalisés tous les 15 ans³.

d. Extrapolation du besoin d'investissement au territoire national

Après évaluation des dommages potentiels à l'échelle du territoire métropolitain, **le coût additionnel induit par l'intensification et la multiplication des aléas climatiques extrêmes, dont les vagues de chaleur, est estimé à 22 Milliards d'euros sur la période 2020-2050**. Ce chiffre ne tient pas compte des réparations nécessaires actuellement sur le réseau ; il propose d'isoler l'impact futur des aléas climatiques extrêmes sur les routes. Ramené à une dépense annualisée, cet investissement additionnel s'élève à 730 millions d'euros, soit **~5% du budget total alloué à la rénovation des routes en France chaque année**, qui est de 8 milliards d'euros par an⁴.

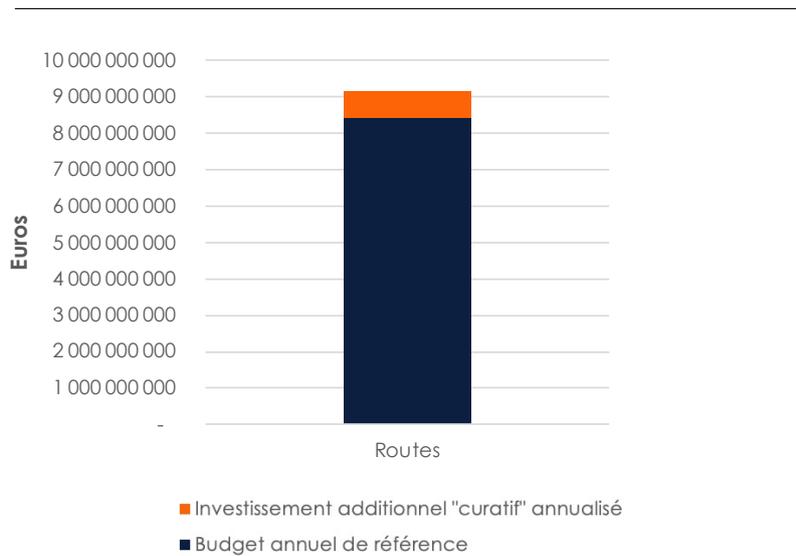
³ Source : Routes de France

⁴ Source : Routes de France : en 2016, 15 Milliards d'euros ont été investis dans le réseau routier, dont 2/3 pour son entretien.

Les hypothèses structurantes sont détaillées en annexe du rapport.

Pour rappel, ce travail est indépendant de l'étude réalisée dans le cadre du volet « Réduction » de ce rapport : bien que la mise à niveau des routes soit incluse dans les scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre, notre analyse met en lumière le fait que leur rénovation devra se faire plus régulièrement pour conserver le niveau de service actuel dans un monde qui se réchauffe. Il s'agit donc bien d'un coût additionnel aux différents investissements proposés dans le volet « Réduction ».

Coût additionnel d'investissement pour les infrastructures de type « Route » (euros)



- Tunnel routier

a. *Évolution du score de risque climatique (structurelle et fonctionnel)*

Une fois projeté dans le climat attendu à horizon 2050 (scénario RCP 8.5), le score de risque fonctionnel augmente d'environ 120%, et le score de risque structurel de 5%, considéré donc comme négligeable.

 **Échantillon étudié :**
Tunnel du Fréjus

Rappel des scores de risque climatique

| 1976-2005 | | 2041-2070 | |
|-----------------------------|------|----------------------------|------|
| Vulnérabilité fonctionnelle | 0,07 | Vulnérabilité structurelle | 0,15 |
| Vulnérabilité fonctionnelle | 0,14 | Vulnérabilité structurelle | 0,19 |

**Evolution du score de risque climatique fonctionnel :
+120%**

**Evolution du score de risque climatique structurel :
+5%**

b. Impacts des aléas clés identifiés

Ce calcul du score climatique a permis de mettre en valeur la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain. Les impacts induit par cet aléa et ayant donné lieu à une quantification sont explicités ci-dessous.

| Aléas les plus impactant | |
|--|--|
| Vulnérabilité structurelle Augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain | Vulnérabilité structurelle Augmentation de l'intensité et fréquence des sécheresses entraînant pénurie d'eau |
| > Aucune évolution notable du score de risque climatique physique | |
| Impacts qualifiés | |
| Vulnérabilité structurelle Frais de prise en charge des usagers, rupture du service. | Vulnérabilité structurelle Dégâts structurels liés au retrait gonflement des argiles. |
| > Aucune évolution notable du score de risque climatique physique | |

c. Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon

De sorte à quantifier un ordre de grandeur relatif à l'impact du changement climatique sur les tunnels (perturbation du trafic), la publication scientifique suivante « *Climate change in asset management of infrastructure: A risk- based methodology applied to disruption of traffic on road networks due to the flooding of tunnels* », Elja Huibregtse et al, 2016 » a servi de référence.

d. Extrapolation du besoin d'investissement au territoire national

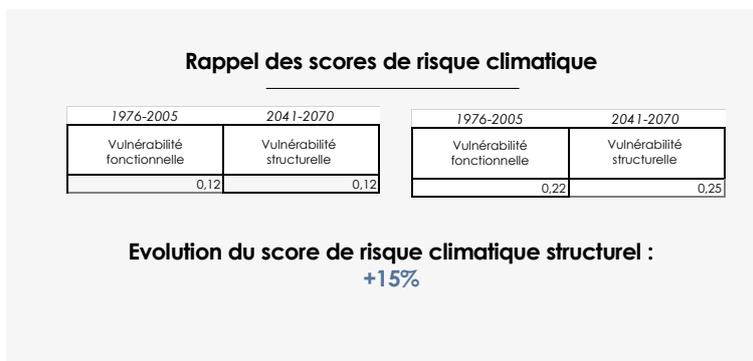
Un ordre de grandeur relatif à l'impact du changement climatique sur les tunnels à péage français a ainsi été estimé. Les **pertes liées à l'excédent brut d'exploitation pour les tunnels payant ont été évalué à 10 millions d'euros à horizon 2050.**

Les hypothèses structurantes sont détaillées en annexe du rapport.

- Pont routier

a. Évolution du score de risque climatique (structurel et fonctionnel)

Une fois projeté dans le climat attendu à horizon 2050 (scénario RCP 8.5), le score de risque structurel augmente d'environ 15%. Le score de risque fonctionnel, quant à lui, ne connaît aucun changement notable dans le futur.



b. Impacts des aléas clés identifiés

Ainsi, sur la base de l'échantillon sélectionné, l'analyse de risque climatique indique que les infrastructures de type « pont routier » ne sont pas, de façon intrinsèque, menacées par le changement climatique à horizon 2050. Toutefois, au regard de l'intensification et de la multiplication de certains aléas climatiques, comme l'augmentation des pluies intenses et entraînant des inondations ou glissements de terrain, les infrastructures en mauvais état structurel sont et seront de plus en plus à risque⁵.



c. Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon

Le rapport commandé par le Sénat en 2019 et intitulé « Sécurité des ponts : éviter un drame » permet d'évaluer le nombre de pont départementaux en mauvais état structurel⁶ à plus de 19 000. S'adapter et se prémunir des impacts futurs du changement climatique sur ces ponts implique de les rénover suffisamment tôt.

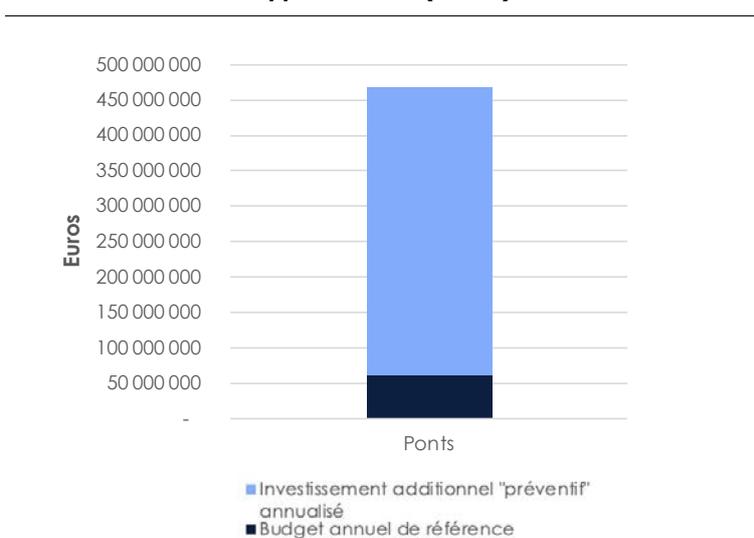
⁵ Ici, le besoin en investissement pour l'adaptation des ponts routiers aux impacts du dérèglement climatique n'est donc pas complémentaire au montant estimé dans le volet « Réduction » de ce rapport : il existe un recoupement entre les deux calculs.

⁶ Pont nécessitant des réparations des travaux de réparations (niveau 3) ou ponts gravement altérés (niveau 4) selon l'Observatoire National de la Route (ONR).

d. *Extrapolation du besoin d'investissement au territoire national*

Le **coût préventif associé a été évalué à 12 Milliards d'euros à horizon 2050**. A titre de comparaison, le budget annuel alloué à la rénovation des ponts était de 60 millions d'euros⁷. Ce différentiel très important s'explique d'abord par un sous-investissement avéré dans la rénovation des ponts départementaux en France⁵, et par le fait qu'un investissement parfaitement préventif, comme il l'a été calculé ici, consisterait à rénover l'ensemble des ponts en mauvais état avant tout dégât significatif⁸.

Coût additionnel d'investissement pour les infrastructures de type « Pont » (euros)

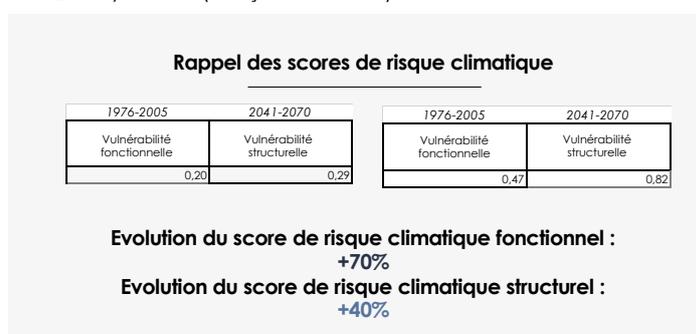


- [Voie ferroviaire](#)

a. *Évolution du score de risque climatique (structurel et fonctionnel)*

Une fois projeté dans le climat attendu à horizon 2050 (scénario RCP 8.5), le score de risque climatique structurel augmente de près de 40%. Le score de risque fonctionnel, quant à lui, augmente de 70% dans le futur.

Échantillon étudié :
Lyon-Paris (tronçon de 100km)



⁷ Rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable par la mission d'information sur la sécurité des ponts.

b. Impacts des aléas clés identifiés

Ce calcul du score climatique a permis de mettre en valeur la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur ainsi qu'à l'augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain.

| Aléas les plus impactant | |
|---|---|
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Augmentation de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur | Augmentation de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur |
| Augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain | Augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain |

| Impacts qualifiés | |
|---|---|
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Affaissement des caténaires, déformation des rails, entraînant un arrêt du trafic | Caténaires et rails déformés à remplacer. Dilatation en dehors des limites tolérables de certaines pièces |
| Perturbations du trafic, gêne à la circulation. | Erosion des talus, glissement de terrain endommageant les infrastructures. |

c. Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon

À la suite d'un échange avec des experts SNCF Réseau, le risque lié à la déformation des rails et des caténaires est apparu comme modéré car déjà largement surveillé. En revanche, les inondations et le risque de ruissellement semble être davantage problématiques pour assurer la fluidité du réseau. Ainsi, seule une première estimation relative à l'impact des inondations sur l'intégrité structurelle des rails à horizon 2050 a été calculé. La publication scientifique « Global warming to increase flood risk on European railways, 2019 » a servi de référence. Cette étude est la première évaluation à l'échelle européenne du risque d'inondation actuel et futur pour les infrastructures ferroviaires.

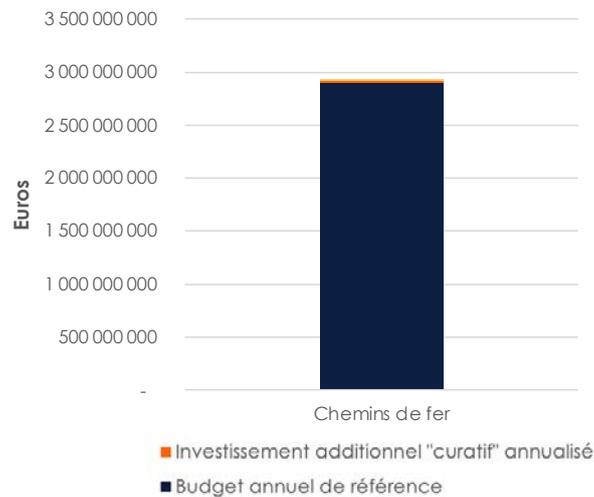
d. Extrapolation du besoin d'investissement au territoire national

A partir de 2050, le besoin en réparation du fait des épisodes d'inondation induirait un **coût d'investissement curatif de 200 millions d'euros sur 30 ans**. A titre de comparaison, les dommages actuels induits par cet aléa sont estimés entre 1 et 2 millions d'euros par an. Toutefois, le budget annuel moyen investi par SNCF Réseau pour l'entretien et le renouvellement du réseau est de 2900 millions d'euros par an⁹.

Les hypothèses structurantes sont détaillées en annexe du rapport.

⁹ Rapport annuel SNCF Réseau, 2020

Coût additionnel d'investissement pour les infrastructures de type « Chemins de fer » (euros)



- Tunnel ferroviaire

a. *Évolution du score de risque climatique (structurel et fonctionnel)*

Le score de risque climatique structurel augmente d'environ 150% une fois projeté dans le climat attendu à horizon 2050 (scénario RCP 8.5), et de 7% pour le score de risque climatique fonctionnel, considéré comme négligeable.



Échantillon étudié :
Tunnel ferroviaire du Fréjus

Rappel des scores de risque climatique

| 1976-2005 | | 2041-2070 | |
|-----------------------------|------|----------------------------|------|
| Vulnérabilité fonctionnelle | | Vulnérabilité structurelle | |
| | 0,06 | | 0,14 |

| 1976-2005 | | 2041-2070 | |
|-----------------------------|------|----------------------------|------|
| Vulnérabilité fonctionnelle | | Vulnérabilité structurelle | ? |
| | 0,15 | | 0,16 |

Evolution du score de risque climatique fonctionnel :
+150%

Evolution du score de risque climatique structurel :
+7%

b. *Impacts des aléas clés identifiés*

Ce calcul du score de risque climatique a permis de souligner la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation des pluies intenses pour la vulnérabilité fonctionnelle et structurelle, entraînant des inondations et glissements de terrain. Il permet également de mettre avant la sensibilité potentielle d'un tunnel au phénomène de retrait-gonflement des argiles.

| Aléas les plus impactant | |
|---|---|
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain | Augmentation de l'intensité et fréquence des sécheresses entraînant pénurie d'eau |
| | Augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain |
| ➤ Aucune évolution notable du score de risque climatique physique | |

| Impacts qualifiés | |
|--|--|
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Frais de prise en charge des usagers. Infra souterraine plus vulnérable aux inondations, rupture du service. | Dégâts structurels liés au retrait gonflement des argiles. |
| | Inondation du tunnel |
| ➤ Aucune évolution notable du score de risque climatique physique | |

c. *Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon*

De même que pour les tunnels routiers, la publication scientifique « *Climate change in asset management of infrastructure: A risk-based methodology applied to disruption of traffic on road networks due to the flooding of tunnels* », Elja Huibregtse et al, 2016 » a servi de référence.

d. *Extrapolation du besoin d'investissement au territoire national*

Un premier ordre de grandeur relatif à l'impact du changement climatique sur les tunnels ferroviaires français a ainsi été estimé sur la base d'une analyse historique. Les **pertes liées à l'excédent brut d'exploitation ont été évalué à 150 millions d'euros à horizon 2050**.

Les hypothèses structurantes sont détaillées en annexe du rapport.

- Port

a. *Évolution du score de risque climatique (structurel et fonctionnel)*

Le score de risque climatique structurel augmente de plus de 200%, ce qui n'a rien de surprenant étant donné que la montée du niveau de la mer impactera inexorablement cette catégorie d'infrastructures dans les années à venir, jusqu'à 2050 et même au delà.

 **Échantillon étudié :**
Port de Dunkerque

| Rappel des scores de risque climatique | | |
|--|-----------------------------|----------------------------|
| | 1976-2005 | 2041-2070 |
| Non traité | Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| | 0,10 | 0,32 |

Evolution du score de risque climatique structurel :
+200%

b. Impacts des aléas clés identifiés

Sans surprise, le calcul du score de risque climatique permet de souligner la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation des tempêtes et vents violents, ainsi qu'à l'élévation du niveau de la mer et ses risques associés (érosion côtière, submersion marine).

| Aléas les plus impactant | |
|--|--|
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Augmentation des tempêtes et vents violents | Elévation du niveau de la mer et risques associés (érosion côtière, submersion marine) |
| Elévation du niveau de la mer et risques associés (érosion côtière, submersion marine) | |
| ➤ Non traité | |

| Impacts qualifiés | |
|---|----------------------------|
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Accès difficile, remobilisation massive de sédiments réduisant le tirant d'eau, dommages sur les navires et grues | Mise hors d'usage. |
| Accès difficile, remobilisation massive de sédiments réduisant le tirant d'eau. | |
| ➤ Non traité | |

c. Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon

La solution d'adaptation la plus évidente - et sur laquelle cette étude propose un premier ordre de grandeur - consiste à rehausser les ouvrages de protection des ports français. La méthodologie utilisée dans la phase 3 du projet pour quantifier le besoin en adaptation des ouvrages de protection du littoral a été appliquée.

d. Extrapolation du besoin d'investissement au territoire national

Le besoin en adaptation estimé, qui correspond à un **investissement préventif**, s'élève à près de **200 millions d'euros à horizon 2050**.

Les hypothèses structurantes sont détaillées en annexe du rapport.

- **Aéroport**

a. Évolution du score de risque climatique (structurel et fonctionnel)

Le score de risque climatique fonctionnel augmente de plus de 100% une fois projeté dans le climat attendu à horizon 2050 (scénario RCP 8.5). Le score de risque climatique structurel quant à lui ne connaît aucune évolution notable.

Rappel des scores de risque climatique

| 1976-2005 | | 2041-2070 | | 1976-2005 | | 2041-2070 | |
|-----------------------------|------|----------------------------|------|-----------------------------|------|----------------------------|------|
| Vulnérabilité fonctionnelle | 0,09 | Vulnérabilité structurelle | 0,18 | Vulnérabilité fonctionnelle | 0,01 | Vulnérabilité structurelle | 0,01 |

**Evolution du score de risque climatique fonctionnel :
+100%**

b. Impacts des aléas clés identifiés

Le calcul du score de risque climatique permet de souligner la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur.

Aléas les plus impactant

| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
|---|---|
| Augmentation de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur | Augmentation de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur |
| <p style="color: red; font-size: small;">➤ Calculé pour les aéroports de Marseille et Nice uniquement</p> | |
| Impacts qualifiés | |
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Ramolissement de l'asphalte et air moins dense rendant les décollages difficiles. Ralentissement de l'activité. Allongement des distances de décollage, perte de capacité d'emport. | Ramolissement de l'asphalte et air moins dense rendant les décollages difficiles. |

c. Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon

Sur les infrastructures de type aéroport, un double calcul a été réalisé :

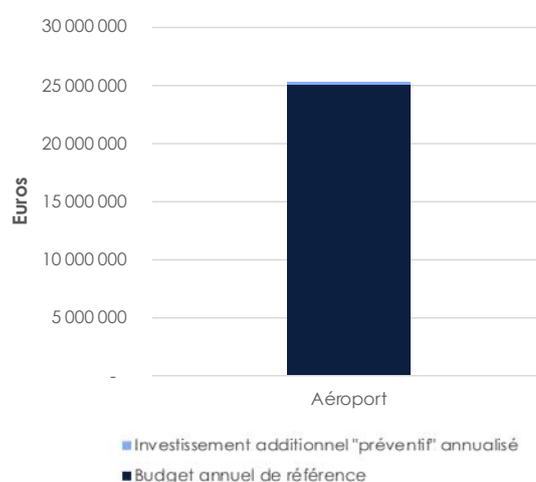
- Pour aboutir à un résultat sur les pertes liées à l'excédent brut d'exploitation, une hypothèse a été posée quant à l'évolution du nombre de journées ou demi-journées où les décollages sont rendus impossibles par des conditions climatiques extrêmes à horizon 2050.
- Pour aboutir à un chiffrage sur le besoin en investissement préventif, la solution d'adaptation retenue consiste à rehausser les ouvrages de protection des aéroports de Nice et Marseille, jugés comme étant à risque car directement en bord de mer. La méthodologie utilisée dans la phase 3 du projet pour quantifier le besoin en adaptation des ouvrages de protection du littoral a été appliquée.

d. *Extrapolation du besoin d'investissement au territoire national*

- Les **pertes liées à l'excédent brut d'exploitation ont été évalué à 100 millions d'euros à horizon 2050**. Ces pertes de revenus sont induites par l'impossibilité pour certains avions de décoller du fait d'une vague de chaleur.
- Quant aux aéroports de Nice et de Marseille, le **coût de l'investissement préventif induit par la montée du niveau de la mer est estimé à plus de 8 millions d'euros à horizon 2050¹⁰**. En comparaison, le montant moyen des investissements en 2012 pour ces deux aéroports était de 25 millions d'euros.

Les hypothèses structurantes sont détaillées en annexe du rapport.

Coût additionnel d'investissement moyen pour les aéroports de Nice et Marseille (euros)



• Réseau d'eau

a. *Évolution du score de risque climatique (structurel et fonctionnel)*

Impact de l'élévation du niveau marin dans le scénario RCP 8.5 à l'horizon fin du siècle

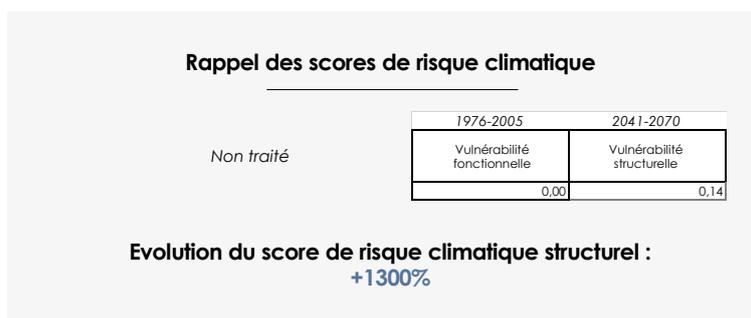


Le score de risque structurel augmente de plus de 1300% une fois projeté dans le climat attendu à horizon 2050 (scénario RCP 8.5). Cela s'explique notamment du fait du choix de la ville de Bordeaux comme échantillon, dont une partie du réseau d'eau se situe sous le niveau des crues annuelles.

¹⁰ Dans le scénario « Sobriété » développé au sein du volet « Réduction » de ce rapport, cet investissement n'est pas nécessaire.



Échantillon étudié :
Réseau d'eau de la ville de Bordeaux



b. Impacts des aléas clés identifiés

Le calcul du score de risque climatique permet de souligner la sensibilité de l'échantillon à l'élévation du niveau de la mer, qui peut altérer le réseau par corrosion et intrusion saline.

Aléas les plus impactant

| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
|---|---|
| <i>Augmentation de l'intensité et fréquence des sécheresses entraînant pénurie d'eau</i> | <i>Elévation du niveau de la mer et risques associés (érosion côtière, submersion marine)</i> |
| <i>Elévation du niveau de la mer et risques associés (érosion côtière, submersion marine)</i> | |
| > Non traité | |

Impacts qualifiés

| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
|---|--|
| <i>Risque de diminution de la ressource. Plus grands besoins en traitement pour assurer la reprise.</i> | <i>Altération du réseau par corrosion et intrusion saline.</i> |
| <i>Intrusion saline.</i> | |
| > Non traité | |

c. Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon

Le taux de fuite important des réseaux aujourd'hui est notamment le fait de la corrosion des tuyaux (rouille) par l'eau qui y transite ou par les terrains dans lesquels ils sont posés, et des déformations subis par les terrains (phénomène de retrait-gonflement des argiles). Par manque d'informations, il n'a pas été possible de quantifier de façon précise les dommages induits par ces impacts sur les canalisations d'eau potable et d'eaux usées. Pour autant, le calcul réalisé en phase 3 et qui concerne l'accélération de la rénovation des canalisations représente une solution d'adaptation directe à la plus grande vulnérabilité future des canalisations : accélérer leur rénovation réduira fatalement leur vulnérabilité face au risque de retrait gonflement des argiles et au risque de corrosion et d'intrusion saline.

- Station de traitement de l'eau

Le calcul du score de risque climatique n'évolue pas entre période historique et future, que cela concerne le score de risque fonctionnel et structurel de l'échantillon.

Sur la base de l'échantillon choisi, l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur et des sécheresses ne semblent entraîner aucun changement majeur sur les infrastructures de traitement de l'eau.

Pour autant, il existe de réels enjeux liés à l'adaptation des usines de traitement de l'eau que ne permet pas de capturer la méthodologie adoptée dans cet exercice. Le changement climatique va notamment impliquer des changements de débit des cours d'eau, majoritairement à la baisse¹¹. Ainsi, si les quantités de pollution rejetée dans les cours d'eau restent les mêmes, leur concentration sera plus importante et pourrait nécessiter des traitements plus poussés, ayant des répercussions sur les coûts d'exploitation des stations d'épurations.

- Réseau électrique aérien/souterrain

a. *Évolution du score de risque climatique (physique et fonctionnel)*

Le score de risque climatique structurel augmente d'environ 35% pour les réseaux aériens, et de 60% pour les réseaux enterrés, une fois projetées dans le climat attendu à horizon 2050 (scénario RCP 8.5). Les impacts du changement climatique sur les pertes d'exploitation liées au dérèglement climatique sur une infrastructure de ce type n'ont pas été quantifiés.



Échantillon étudié :

Réseau électrique (aérien et enterré) de la ville de Nice

Rappel des scores de risque climatique

| | 1976-2005 | | 2041-2070 | |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle | Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Réseau électrique aérien | 0,23 | 0,26 | 0,40 | 0,53 |
| Réseau électrique enterré | 0,12 | 0,21 | 0,31 | 0,50 |

Evolution du score de risque climatique structurel pour les réseaux électriques enterrés :

+35%

Evolution du score de risque climatique structurel pour les réseaux électriques aériens :

+60%

Parmi les différentes composantes du réseau électrique, seules les lignes de distribution de l'électricité ont été étudiées pour calculer le score de risque climatique.

¹¹ Voir projet de recherche « Explore 2070 ».

b. Impacts des aléas clés identifiés

Le calcul de ce score permet de souligner la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des sécheresses, des vagues de chaleur, des inondations, et pour les ouvrages souterrains à l'élévation du niveau de la mer.

| Aléas les plus impactant | |
|--|--|
| Réseau électrique aérien | |
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Augmentation de l'intensité et fréquence des sécheresses entraînant feux de forêt | Augmentation de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur |
| | Augmentation de l'intensité et fréquence des sécheresses entraînant feux de forêt |
| | Augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain |
| Réseau électrique enterré | |
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité structurelle |
| Elévation du niveau de la mer et risques associés (érosion côtière, submersion marine) | Augmentation de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur |
| | Elévation du niveau de la mer et risques associés (érosion côtière, submersion marine) |
| | Augmentation des pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain |
| ➤ Non traité | |
| Impacts qualifiés | |
| Réseau électrique aérien | |
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité physique |
| Hausse des coûts d'entretien et perte d'exploitation. | Surcoût de transit de climatisation pour aérer les transformateurs. |
| | Destruction d'une portion du réseau |
| | Risques d'inondations des postes, risques de dommages |
| Réseau électrique enterré | |
| Vulnérabilité fonctionnelle | Vulnérabilité physique |
| Mise hors d'usage. | Surcoût de transit de climatisation pour aérer les transformateurs. |
| | Surcoût de protection. |
| ➤ Non traité | |

c. Méthode de quantification du besoin d'investissement sur l'échantillon

Pour aboutir à un ordre de grandeur relatif à l'impact du changement climatique sur l'intégrité physique de l'ensemble des composantes du réseau, la publication scientifique suivante a servi de référence : « *Climate change impacts and costs to U.S. electricity transmission and distribution infrastructure – 2020* ». A travers cette publication sont évalués

- les impacts sur la durée de vie des transformateurs de sous-stations ;
- la durée de vie des transformateurs de distribution ;
- la capacité des lignes de distribution ;
- la capacité des lignes de transmission ;
- les dommages causés par les incendies aux lignes de transmission ;

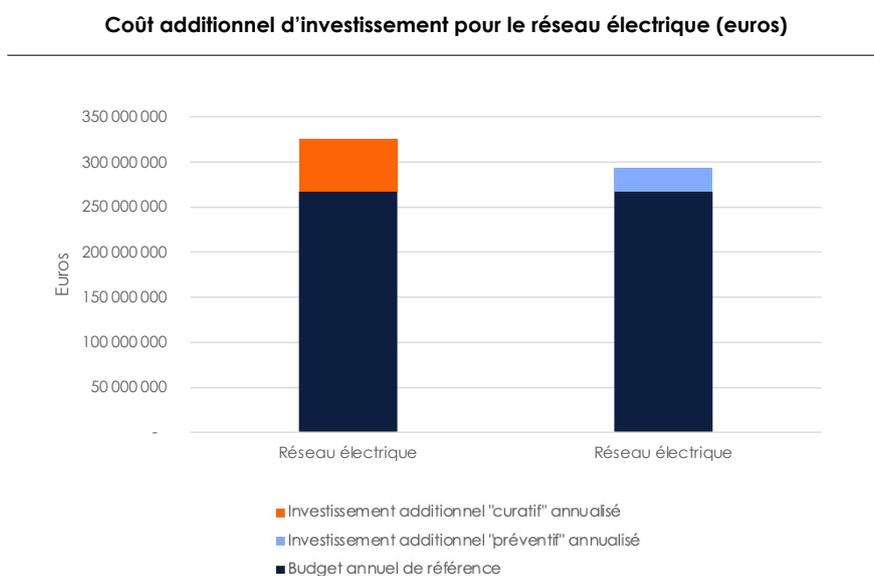
- le risque de submersion des sous-stations du fait de tempête ou de la montée du niveau de la mer ;
- la gestion de la végétation ;
- la pourriture des poteaux en bois.

Cette publication scientifique permet d'estimer, à horizon 2100 et pour le scénario RCP 8.5, le coût de l'inaction (investissement curatif) et à l'inverse le coût d'une solution proactive face aux impacts du dérèglement climatique sur les infrastructures (investissement préventif) aux États-Unis. Les conclusions de cette étude ont été traduites pour le territoire français métropolitain en les ramenant au km de ligne électrique. L'état des réseaux américains et français étant différent, le résultat n'a pas vocation à être un chiffrage exact. Il est un ordre de grandeur et vise à prendre la mesure de l'impact du changement climatique sur le réseau électrique national.

d. Extrapolation du besoin d'investissement au territoire national

- Sur la base de cette étude, **l'investissement curatif induit par l'intensification et la multiplication des aléas climatiques extrêmes est estimé à 1700 millions d'euros à horizon 2050**. En guise de comparaison, RTE demandait une enveloppe de 8000 millions à horizon 2035 pour le renouvellement des ouvrages les plus anciens dans le cadre de son dernier *Schéma décennal de développement du réseau*.
- A l'inverse, **l'investissement préventif induit est estimé à 800 millions d'euros**. Il traduit le besoin en investissement attendu dans le cas où les services publics et les décideurs prennent en compte de manière proactive les risques liés au changement climatique et sont prêts à payer les coûts initiaux de l'adaptation avant que les dommages ne se produisent.

Les hypothèses structurantes sont détaillées en annexe du rapport.



- Réseau numérique aérien/souterrain

Le score de risque n'augmente significativement que pour la vulnérabilité structurelle des réseaux enterrés.

Le calcul du score de risque climatique permet toutefois de souligner la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des sécheresses entraînant des feux de forêts, des vagues de chaleur, des inondations et glissement de terrain.

Par manque de données et d'informations financières concernant les impacts du changement climatique sur les infrastructures de ce type, les calculs de coût n'ont pas pu être réalisés.

3. Besoin en ouvrages de protection

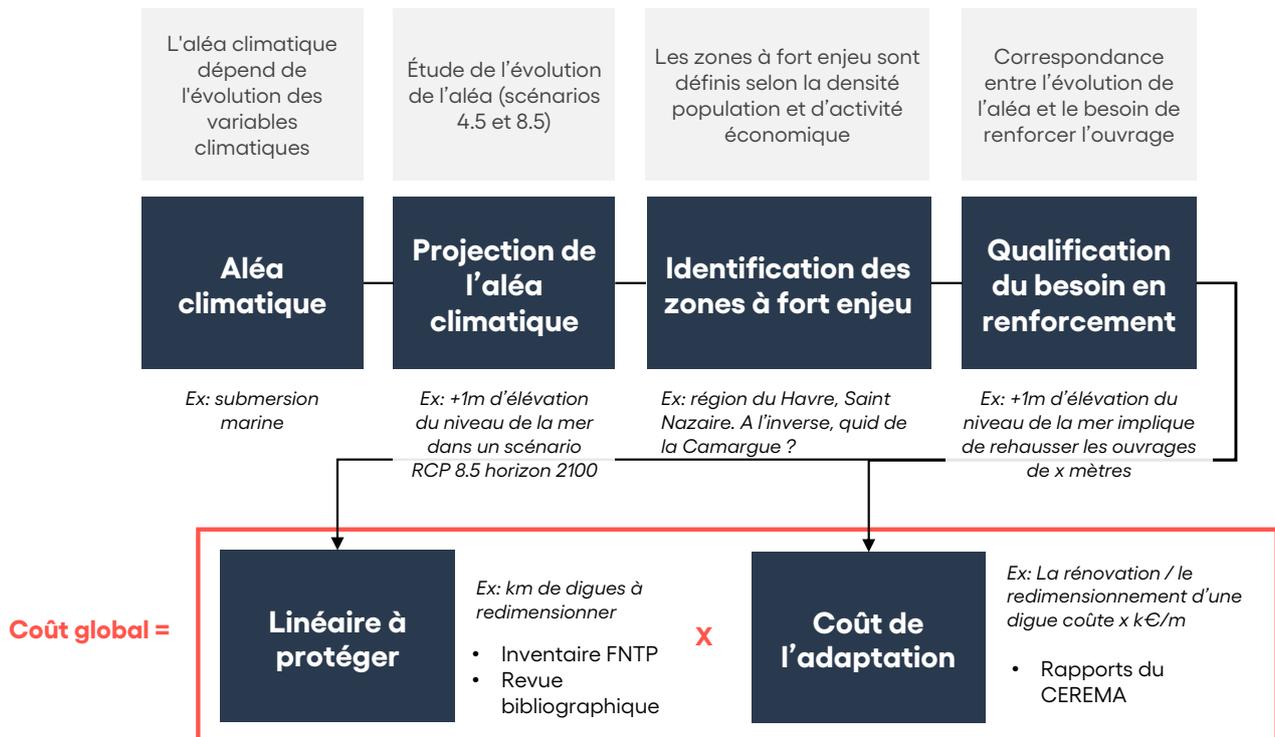
La seconde phase de ce volet « Résilience » a pour objectif de d'évaluer une première estimation des investissements qu'il serait nécessaire d'engager pour développer des infrastructures de *protection* vis à vis de 3 risques induits par le changement climatique, à l'échelle de la métropole.

Périmètre d'étude

| | |
|---|--|
| Érosion et submersion du littoral | Digues, brise-lames |
| | Perrés |
| | Murs et ouvrages de soutènement |
| Inondations fluviales | Digues, brise-lames |
| | Perrés |
| | Murs et ouvrages de soutènement |
| Stress hydrique Accès à l'eau Traitement eaux usées | Canalisations et distribution de l'eau |
| | Systèmes de recharge de nappes phréatiques |
| | Dispositifs de retenues d'eau |

Sur les deux premiers risques, pour chaque type d'ouvrage, la méthodologie adoptée a consisté à traduire les projections climatiques sur les aléas retenus en besoin d'adaptation. Une fois ce travail réalisé, il a été nécessaire de construire une table de

correspondance entre ce besoin et le coût de l'adaptation. La méthodologie se résume comme suit :



L'évaluation du besoin d'adaptation des ouvrages de protection concernant le risque de stress hydrique ont quant à eux donner lieu à des méthodologies spécifiques à chaque type d'ouvrage et expliquées dans chacune des sous-parties.

Érosion et submersion du littoral

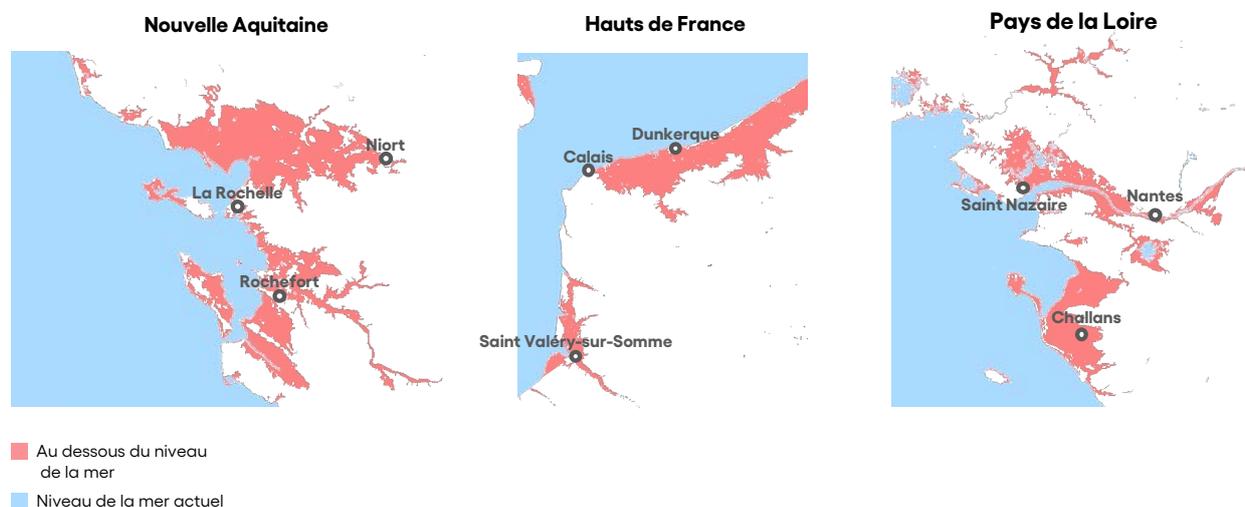
Cette première sous-partie vise à évaluer le montant nécessaire à l'adaptation des digues, perrés, murs et brise-lames de la France métropolitaine à horizon fin de siècle pour se défendre face au risque d'érosion et de submersion du littoral.

Pour commencer, des zones à fort enjeu ont été définies selon la densité de population et d'activité économique à protéger. Au total, 6 zones ont été retenues :

- Le **pourtour méditerranéen ouest**
- La **région bordelaise** en Nouvelle-Aquitaine
- La **région autour de la Rochelle, Rochefort et Niort** en Nouvelle-Aquitaine
- La **région de Saint Nazaire, du delta de la Loire et autour de Challans** en Pays de la Loire
- La **région autour du Havre et de Caen** en Normandie
- La **région côtière entre Saint Valéry-sur-Somme, Calais et Dunkerque** dans les Hauts de France

Extrait des zones identifiées comme « à fort enjeu »

Extrait de l'évolution du niveau marin à horizon fin de siècle pour les régions étudiées



Au global, l'étude porte 800km d'ouvrages de protection, qui se décomposent comme suit :

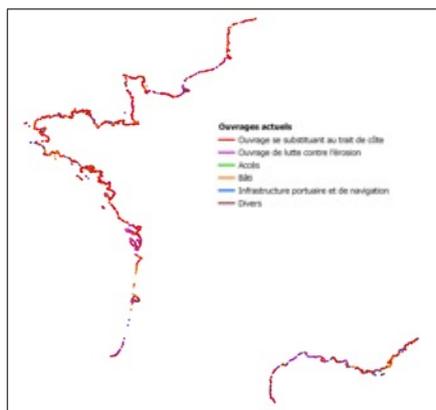
| | Linéaire d'ouvrages de protection couvert (km) |
|--------------------------------|--|
| Brise-lames | 17 |
| Digue côtière | 380 |
| Epi | 88 |
| Mur, mur de soutènement | 126 |
| Perré | 187 |

Précision sur la méthodologie adoptée

Le linéaire de chacun des ouvrages de protection (digues, perrés, brise-lames...) a été quantifié via un travail de cartographie sur la base des données Géolittoral développée par le CEREMA, tandis que la quantification du besoin en renforcement et le coût estimé des travaux de renforcement ont été construits sur la base d'une revue bibliographique et d'entretiens avec des experts du secteur¹².

¹² Bibliographie en Annexes. Entretien réalisé avec Yann Deniaud, Responsable du secteur d'activité Risques Naturels au Cerema.

Calcul du linéaire de chacun des types d'ouvrage



Source : Geolitorral, CEREMA, 2019

Quantification du besoin en renforcement



Source : Étude bibliographique
Document de recherche
de Guirec Prévost

Coût estimé des travaux de renforcement



Source : Étude bibliographique

Ce travail a abouti à la conclusion qu'une élévation du niveau de la mer d'1 mètre impliquerait un besoin en rehaussement des ouvrages de protection d'1m50 à 2m50. Une hypothèse de 2m a été retenue. Au moins deux arguments peuvent expliquer la non-linéarité de ce besoin en rehausse. Premièrement, la hauteur des vagues est fonction de la profondeur d'eau. Ensuite, les effets combinés de l'élévation du niveau moyen de la mer, de l'augmentation de la hauteur des vagues et de la plus grande intensité des tempêtes peuvent aboutir à des inondations plus étendues.

Les coûts moyens retenus pour chaque type d'ouvrage sont exposés ci-dessous :

| | Rehaussement (€/m) |
|--------------------------------|--------------------|
| Brise-lames | 2800 |
| Digue côtière | 1445 |
| Epi | non traité |
| Mur, mur de soutènement | 500 |
| Perré | 1900 |

Résultats du besoin en investissement

Le besoin en rehausse des ouvrages de protection a été réalisé pour deux scénarios de nos évolutions de GES distincts : le premier correspond au scénario de référence RCP 8.5 et le second au scénario de référence RCP 4.5 du 6^{ème} rapport du GIEC. Le premier scénario est dit « à très hautes émissions de GES », tandis que le second est un scénario intermédiaire.

Besoin d'investissement pour le scénario RCP 8.5 : 1,7 Milliard d'euros entre 2020 et 2100.

|  +0,82m | Linéaire couvert (km) | Besoin en investissement par type d'ouvrage (en Millions d'€) | | | | | | Total par type d'ouvrage |
|--|-----------------------|---|--|--|------------------|------------|-----------------|-----------------------------|
| | | Pourtour méditerranéen | Nouvelle Aquitaine - Région bordelaise | Nouvelle Aquitaine - Région de la Rochelle | Pays de la Loire | Normandie | Hauts de France | |
| Brise-lames | 17 | 55 | 13 | 2 | 2 | - | 8 | 80 |
| Digue côtière | 380 | 100 | 80 | 380 | 220 | 30 | 110 | 920 |
| Epi | 88 | Non traité | Non traité | Non traité | Non traité | Non traité | Non traité | |
| Mur, mur de soutènement | 126 | 2 | 12 | 10 | 60 | 15 | 5 | 105 |
| Perré | 187 | 18 | 65 | 180 | 160 | 77 | 100 | 600 |
| Total | | | | | | | | 1,7 Milliard d'euros |

Limites de l'étude

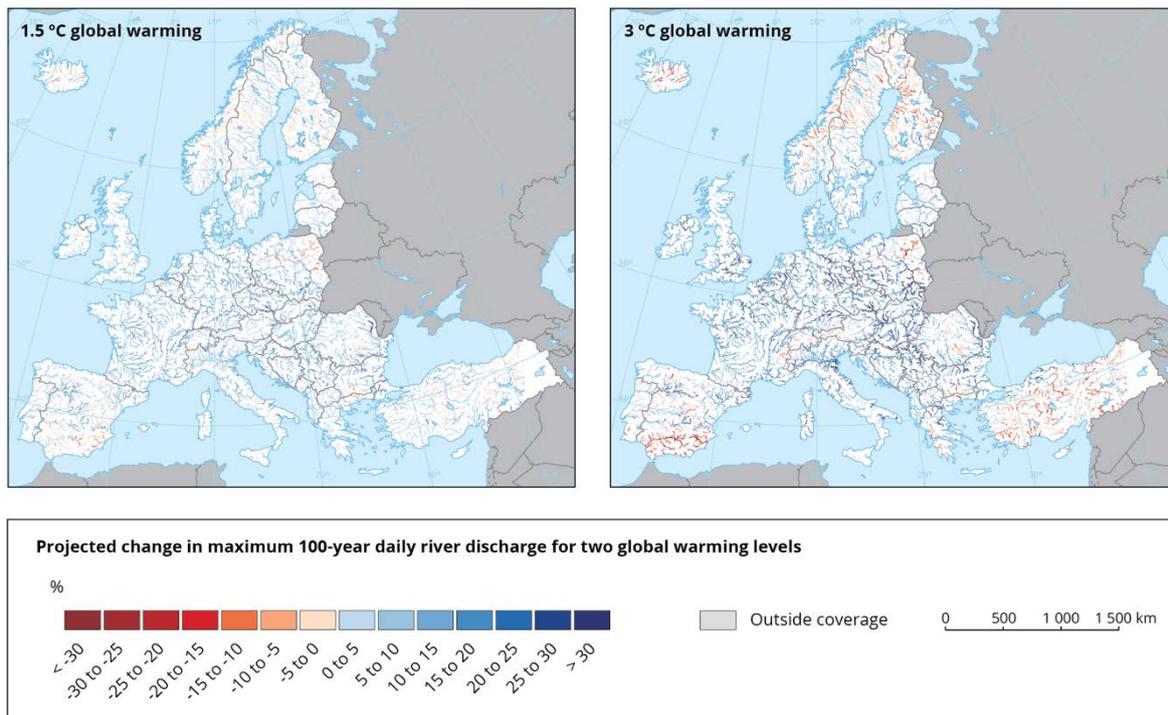
- Les aménagements des futurs espaces côtiers récréatifs (rechargement des plages par exemple) n'ont pas été pris en compte, ni la construction d'ouvrages de protection supplémentaires. Seul le rehaussement des ouvrages actuels a été considéré.
- Le coût de maintenance/entretien des digues n'a pas été pris en compte ; seul l'effort financier destiné au rehaussement des ouvrages a été évalué.
- La solution d'adaptation via les digues est toutefois insuffisante pour espérer gérer le risque de submersion marine efficacement. Pour ce faire, il est nécessaire de penser l'aménagement des littoraux dans leur globalité (retrait de certaines activités / habitations du trait de côte, solutions d'adaptation fondées sur la nature comme des barrières naturelles de protection côtières).

Inondations fluviales

Cette seconde sous-partie vise à évaluer l'investissement nécessaire à l'adaptation de nos digues fluviales à horizon fin de siècle pour se défendre face au risque d'inondations des fluviales.

Les travaux et les données de l'Agence Européenne de l'Environnement ont été exploités pour évaluer l'évolution de l'intensité des crues centennales en France métropolitaine.

Changement projeté du débit journalier maximal d'une rivière sur 100 ans pour deux niveaux de réchauffement climatique (AEE, 2019)



Source: EEA, *Projected change in maximum 100-year daily river discharge for two global warming levels*

Le changement d'intensité des crues centennales a été extrait pour la France métropolitaine. En moyenne, dans un monde à +3°C de réchauffement comparé à la période préindustrielle (correspondant à un intermédiaire entre le scénario RCP 4.5 et le scénario RCP 8.5), il est attendu que ces crues soient entre 10 et 15% plus importantes.

Précision sur la méthodologie adoptée

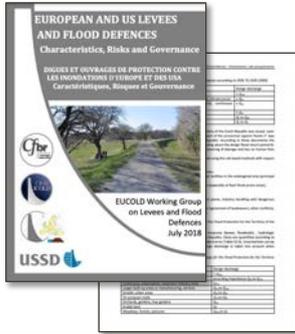
L'estimation du linéaire de digue fluviale est un exercice complexe car le recensement des ouvrages et système d'endiguement s'est longtemps heurté à des difficultés d'identification des propriétaires et gestionnaires. Une première estimation de ce linéaire a ainsi été obtenue via une publication diffusée sous l'égide du CFBR¹³ et du Club européen de la CIGB¹⁴, « *European and US Levees and Flood Defences Characteristics, Risks and Governance* ». Le besoin en renforcement et le coût estimé des travaux de renforcement ont été construits sur la base d'une revue bibliographique et d'entretiens avec des experts du secteur¹⁵.

¹³ Comité Français des Barrages et Réservoirs.

¹⁴ Commission Internationale des Grands Barrages.

¹⁵ Bibliographie en Annexes. Entretien réalisé avec Yann Deniaud, Responsable du secteur d'activité Risques Naturels au Cerema.

Calcul du linéaire de chacun des types d'ouvrage



Source : *European and US levees and Flood defences, Characteristics, Risks and Governance*

Qualification du besoin en renforcement

Une hypothèse linéaire a été prise entre l'évolution du risque de crue et le besoin en rehaussement des ouvrages de protection.

Coût estimé des travaux de renforcement



Source : *Coût des protections contre les inondations fluviales, CEREMA, 2014*

Besoin d'investissement pour le scénario 3°C (intermédiaire entre le RCP 4.5 et le RCP 8.5) : 1,7 Milliard d'euros entre 2020 et 2100.

Résultats du besoin en investissement par région

 **Scénario +3°C (intermédiaire entre le scénario RCP 4.5 et le RCP 8.5)**

| Région | Coût relatif à la rehausse des digues (millions d'euros) |
|----------------------------|--|
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 165 |
| Pays de la Loire | 145 |
| Occitanie | 215 |
| Nouvelle-Aquitaine | 230 |
| Normandie | 120 |
| Ile-de-France | 70 |
| Hauts-de-France | 100 |
| Grand Est | 145 |
| Centre-Val de Loire | 135 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 120 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 120 |

Total

1,7 Milliard d'euros

Limites de l'étude

- Pour aboutir à un impact sur le besoin en rehaussement des digues fluviales, l'hypothèse d'une relation linéaire entre le changement d'intensité des crues centennales et le besoin en rehaussement des digues a été posée. Cette relation est un raccourci, au sens où il n'est pas possible d'établir une relation directe, notamment linéaire, entre l'accroissement de l'intensité des crues et le rehaussement des digues. En effet, les conditions d'écoulement lors de crues plus intenses dépendront des évolutions du lit de la rivière et notamment de son lit majeur. La gestion de ces épisodes nécessite de penser l'aménagement du bassin versant dans sa globalité et pas seulement par une rehausse des ouvrages de protection. A titre d'exemple, la création de zones d'expansion de crue judicieusement choisies peut permettre d'abaisser la ligne d'eau au droit des enjeux majeurs et limiter ainsi les besoins de rehausse des ouvrages de protection.
- Les précipitations sont une variable dont la modélisation des évolutions est moyennement fiable. De plus, l'évolution des intensités des crues fluviales en contexte de changement climatique reste encore un sujet de recherche.
- Le corps de digue, dont la fonction principale est d'assurer la stabilité propre de la digue, est très souvent constitué de matériaux prélevés à proximité immédiate du site, comme l'argile. A dire d'expert, une partie des ouvrages sont soumis à des cycles de dessiccation-réhydratation liés à la sécheresse pouvant impacter leur résistance et performance. Cet impact n'a pas pu être quantifié par manque de données.

Stress hydrique

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés au rôle qu'allaient jouer certaines infrastructures publiques dans cette lutte pour préserver la ressource en eau douce. La première partie de l'étude s'intéresse au besoin de rénovation du réseau de distribution d'eau, dont le taux de fuite est encore de 20% à l'heure actuelle. La seconde propose une comparaison entre deux catégories d'infrastructures de stockage/gestion de la ressource en eau, que sont les retenues d'eau artificielles d'une part et les technologies de gestion des nappes phréatiques d'autre part. Ces deux solutions d'adaptation sont largement débattues à l'heure actuelle¹⁶ ; l'objectif de ce travail est d'éclairer la prise de décision sur le développement de l'une ou de l'autre de ces solutions.

La première étude s'intéresse au besoin de rénovation du réseau de distribution d'eau. La seconde propose une comparaison entre deux catégories d'infrastructures de stockage/gestion de la ressource en eau, que sont les retenues d'eau artificielles d'une part et les technologies de gestion des nappes phréatiques d'autre part.

¹⁶ Voir le rapport intermédiaire issu des « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique », 2021

1. *L'accélération de la rénovation des canalisations de distribution d'eau potable et d'eaux usées*

Le besoin en investissement a été évalué pour deux types de scénarios :

-  **Le respect de la Loi Grenelle de 2012**

Le taux de fuite du réseau de distribution est évalué à 20% en France, avec un taux de renouvellement des canalisations estimé à 0,5% depuis 2009, alors même que l'objectif national de 15% de fuite maximum a été fixé par décret en janvier 2012. Respecter ce décret signifierait :

- Rénover 1100km de linéaire supplémentaire par an pour les canalisations d'eau potable
- Un besoin d'investissement supplémentaire de 250 millions d'euros par an
- Rénover 500 km de linéaire supplémentaire par an pour les canalisations d'eaux usées
- Un besoin d'investissement supplémentaire de 110 millions d'euros par an

Au total, le **besoin d'investissement supplémentaire est estimé à 360 millions d'euros par an.**

-  **Le renouvellement des canalisations une fois vétustes**

Une canalisation est changée en moyenne tous les 160 ans. Or le taux de fuite est notamment le fait de la corrosion des tuyaux par l'eau qui y transite, ou le vieillissement des joints entre les canalisations. Renouveler les canalisations une fois vétustes signifierait passer à une moyenne de 80 ans entre la pose et le renouvellement d'une canalisation.

- Le taux de renouvellement du réseau d'eau potable et d'eaux usées devrait passer à 1,25%/an
- Soit 6800km de linéaire supplémentaire à rénover par an pour les canalisations d'eau potable
- Un besoin d'investissement supplémentaire de 1,5 milliard d'euros par an
- Et 3000km de linéaire supplémentaire à rénover par an pour les canalisations d'eaux usées
- Un besoin d'investissement supplémentaire de 650 millions d'euros par an

Au total, le **besoin d'investissement supplémentaire est estimé à 2,2 Milliards d'euros par an.**

2. Les infrastructures de retenue d'eau artificielles et les technologies de gestion de nappes phréatiques

Par manque de ressources, données, et surtout d'une politique nationale¹⁷ sur la question, cette dernière partie propose une comparaison - technique et termes de coûts d'investissement unitaire – entre deux catégories d'infrastructures visant à pallier le risque de stress hydrique : les retenues d'eau artificielles, et les technologies de gestion de nappe.

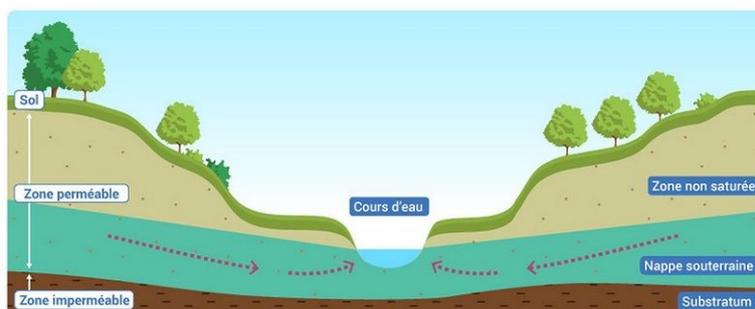
Les retenues d'eau – une solution généralement identifiée comme relevant de la mal-adaptation¹⁸ par la communauté scientifique

Les retenues d'eau artificielles ont pour idée de se protéger des conséquences du dérèglement climatique en stockant en surface les pluies d'hiver en prévision des besoins l'été. Une retenue d'eau est constituée par l'accumulation d'eau produite par une construction sur le lit d'une rivière ou d'un ruisseau. Elles sont alimentées par pompage dans les cours d'eau et les nappes souterraines, les pluies et les ruisseaux étant loin de suffire à remplir ces installations de grande taille.

Cette technologie comporte toutefois quatre limites principales, qui en font pour la communauté scientifique une solution de mal-adaptation face au risque de croissant de stress hydrique.

a - Une concurrence à la recharge naturelle des nappes phréatiques

La recharge des nappes pose un problème si l'eau est de plus en plus stockée en surface. Les nappes souterraines, qui permettent notamment aux rivières de couler l'été, ont besoin de se recharger durant les saisons arrosées grâce aux pluies qui s'infiltrent par les sols des espaces naturels, des zones humides en particulier. L'été, c'est près de 80 à 100% du débit s'écoulant dans ces rivières qui peuvent provenir des nappes.



Réalimentation du cours d'eau par la nappe en période de basses eaux

¹⁷ Une stratégie nationale sur la question du stress hydrique est en cours de discussion à l'occasion du « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique ».

¹⁸ Désigne un changement opéré dans les systèmes naturels ou humains qui font face au changement climatique et qui conduit à augmenter la vulnérabilité au lieu de la réduire.

b - Des pertes conséquentes par évaporation

Lorsque l'eau est retenue en surface, une part importante s'évapore en été du fait des fortes chaleurs. Des études ont été réalisées sur les lacs de l'Ouest américain, où les pertes par évaporation varient de 20 à 60 % des flux entrants¹⁹.



Évaporation du lac de Castillon, dans les Alpes-de-Haute-Provence

c - Un risque de contamination de l'eau

A dire d'expert²⁰, les retenues d'eau implique une surveillance importante de la qualité de l'eau, du fait d'un risque de contamination significatif.

d - Des dégradations sur les écosystèmes en aval

Les retenues d'eau artificielles participent à la dégradation des milieux naturels, en particulier les retenues collinaires, du fait de la création d'un barrage en travers du cours d'eau qui entraîne une rupture de continuité écologique, la disparition d'habitats naturels, la dégradation de la qualité physico-chimique de l'eau, et une modification du régime hydrologique²¹.



Retenue d'eau artificielles supprimée à Maussac pour restaurer une zone humide. Un projet financé par l'Agence de l'eau.

¹⁹ Reservoir Evaporation in the Western United States: Current Science, Challenges, and Future Needs, 2018

²⁰ Entretien d'expert avec Marie Pettenati (BRGM)

²¹ Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspective : BRGM, ONEMA

Les technologies de gestion de nappes

Il existe 3 technologies de gestion de nappes :

- Les bassins d'infiltration
- Les méthodes d'injection directe d'eau de pluie
- Les méthodes d'injection indirecte : elles consistent à augmenter le transfert d'eau entre un cours d'eau et une nappe alluviale en mettant en place des sites de pompage souterrains à proximité des berges



Bassin d'infiltration en Israël



Injection directe d'eau de pluie
(Aquifer storage and recovery)



Injection indirecte

Comparaison et coût d'investissement unitaire de ces deux solutions

Une analyse bibliographique a permis de mettre en lumière le coût bien supérieur des retenues d'eau face aux technologies de gestion des nappes, en particulier car les retenues nécessitent un foncier important. Le tableau ci-dessous propose une comparaison globale entre les deux technologies :

Comparaison stockage artificiel en aquifère et retenue collinaire :

| Propriétés | Retenue collinaire | Stockage en aquifère |
|--|--------------------|----------------------|
| Superficie de terrain requise | Élevée | Très petite |
| Proximité des zones urbaines | Loin | A l'intérieur |
| Coûts d'investissements | Elevés | Faibles |
| Coûts d'études | Elevés | Faibles |
| Débit de prise et d'approvisionnement en eau | Élevé | Faible |
| Perte par évaporation | Modérées | Aucune |
| Problèmes d'algues toxiques | Modérées | Faibles |
| Moustiques | Modérées | Faibles |
| Pertes dans l'aquifère | Aucune | Aucune à élevées |
| Élimination des pathogènes | Faible | Significative |
| Potentiel de re-contamination | Modéré | Aucun à modéré |
| Énergie de construction | Elevée | Faible |
| Énergie de fonctionnement | Faible à modérée | Modérée |
| Milieu naturel nécessaire pour la viabilité | Vallée favorable | Aquifère favorable |

Selon l'Agence de l'eau²², le coût d'une retenue d'eau se situerait entre 2 et 2,5€/m³. En comparaison, la faible emprise au sol nécessaire dans le cadre d'un dispositif de gestion de nappe (hors bassin d'infiltration) justifie un coût unitaire complet variant de 0,5 à 0,75€/m³, soit 4 à 5 fois moins qu'une retenue collinaire²³.

Ainsi, **les solutions de recharge de nappes semblent très pertinentes à déployer plus largement sur le territoire pour faire face au stress hydrique** (moins impact environnemental et coût compétitif) par rapport à un développement massif de retenues collinaires, identifiées comme généralement des solutions de mal-adaptation par la communauté scientifique.

²² Agence de l'eau – Références de coûts pour la construction des retenues collinaires

²³ Infoterre, BRGM, Évaluation du coût de mobilisation de nouvelles ressources en eau souterraine dans l'Ouest de l'Hérault, 2013

Glossaire

- **Aléa** : événement brutal (choc) ou stress chronique, qui, lorsqu'il se produit, est susceptible d'entraîner des pertes et des dommages pour les éléments exposés.
- **Exposition** : localisation d'une infrastructure dans un espace soumis directement ou indirectement à un aléa.
- **Vulnérabilité** : sensibilité à l'aléa, propension « à subir des dommages », à la fois liée à la fragilité physique de l'infrastructure et/ou à l'incapacité à faire face.
- **Risque** : situation de danger découlant de l'exposition directe ou indirecte d'une infrastructure vulnérable à un aléa. Le risque est fonction de la nature, de l'intensité et de la probabilité d'occurrence de l'aléa, du degré d'exposition de l'infrastructure et de sa vulnérabilité.
- **Impacts** : conséquences avérées d'un aléa sur une infrastructure exposée et vulnérable.

Bibliographie

Facteurs aggravants :

- **External World soil database**, Global terrain slope download
- **NASA**, Global Fire WEather Database (GFWED)
- **European Environmental Agency - JRC**, European Soil Data Centre (ESDAC)
- **European Environmental Agency**, Erosion trends in Europe

Phase 2 :

- **Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs**, Yaning Qiao et al, 2015
- **Routes de France**, « Routes et rues, l'urgence : rénover, entretenir », 2018
- **Ministère de la transition écologique**, Mémento de statistiques des transports, 2017
- **Climate change in asset management of infrastructure: A risk- based methodology applied to disruption of traffic on road networks due to the flooding of tunnels**, Elja Huibregtse et al, 2016
- **Climate change impacts and costs to U.S. electricity transmission and distribution infrastructure**, Charles Fant et al, 2020
- **Estimated effects of climate change on flood vulnerability of U.S. bridges**, L. Wright et al, 2012

- **Sénat**, Rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable par la mission d'information sur la sécurité des ponts, 2019
- **AFRA** - Association française du rail
- **Scientific american** - U.S. Electrical Grid Undergoes Massive Transition to Connect to Renewables
- **Haut Conseil pour le Climat**, « Renforcer l'atténuation, Engager l'adaptation », 2021
- **GIEC**, Rapport AR5, 2015

Phase 3 :

- **FP2E, Services publics d'eau et d'assainissement en France** - Données économiques, sociales et environnementales, 2019
- **Ministère de l'Écologie**, Rapport « Eau et assainissement »
- **Agence de l'eau**, Renouvellement et Réduction des fuites des canalisations d'eau potable, Étude des coûts, 2017
- **CEREMA**, Coût des protections contre les aléas littoraux, 2018
- **Influence de la remontée du niveau de la mer sur les franchissements des ouvrages maritimes selon trois approches**, Guirec Prevot, 2012
- **Stratégies d'Adaptation des Ouvrages de Protection marine ou des modes d'Occupation du Littoral vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des Océans**, Guirec Prévot, 2013
- **Géolittoral**, Cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux, 2019
- **CEREMA**, Coût des protections contre les inondations fluviales
- **GIEC**, Rapport AR5, 2015
- **European Environmental Agency**, Data on projected change in maximum 100-year daily river discharge for two global warming levels, 2019
- **EUCOLD Working Group**, Dignes et ouvrages de protection contre les inondations d'Europe et des USA, 2018