



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



RÉSILIENCE DES RÉSEAUX FERROVIAIRES

Enjeux et démarches pour faire face au changement climatique

Mars 2023

UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DE LA RÉSILIENCE

“ Capacité d'un système social, économique ou écologique à faire face à une **perturbation**, une **tendance** ou un **évènement** dangereux, en réagissant ou en se réorganisant de manière à conserver sa fonction essentielle, son identité et sa structure tout en gardant ses facultés d'adaptation, d'apprentissage et/ou de transformation.

Approche « ingénieur »

- Résister, revenir à l'état d'équilibre initial
- Centrée sur le maintien et la récupération de la fonctionnalité
- Plus adaptée aux systèmes techniques (??)

Approche « écologique »

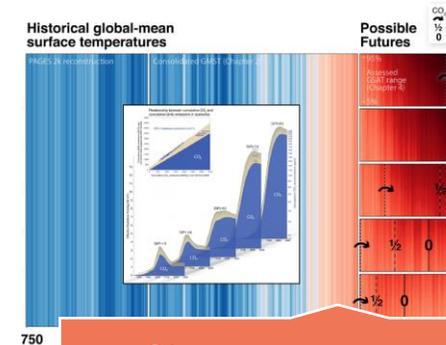
- S'adapter continuellement, aller vers un nouvel équilibre
- Centrée sur l'apprentissage, la transformation
- Plus adaptée aux systèmes à forte composante sociale (??)



Crise, catastrophe



Viellissement, dégradation chronique

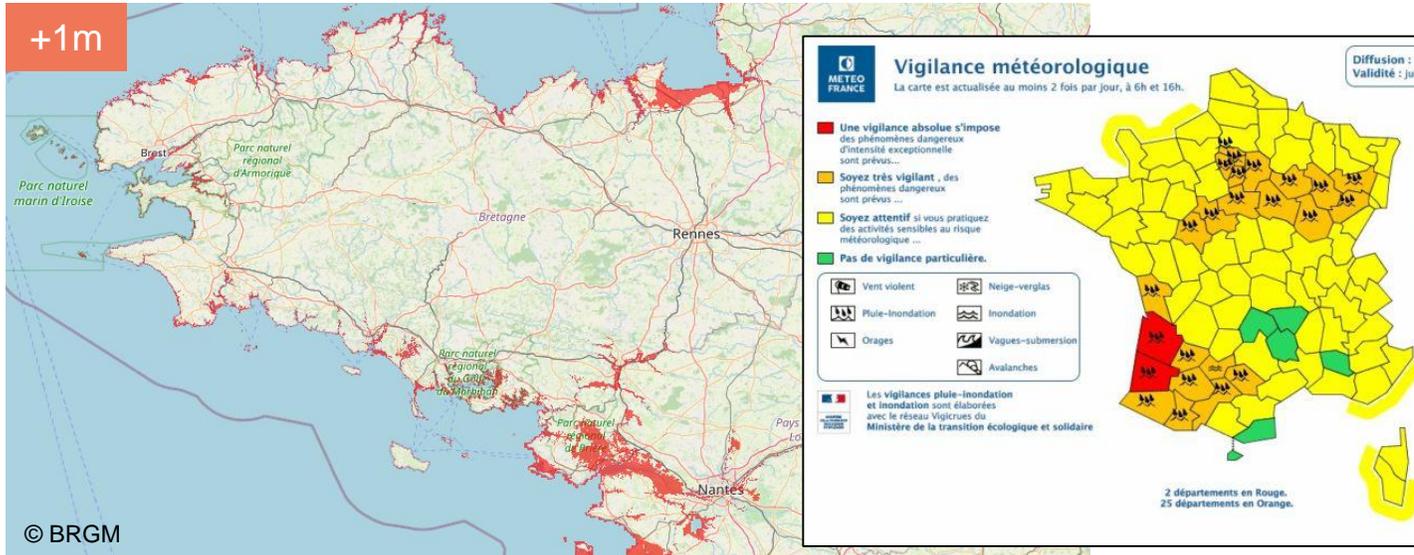


Changements climatiques



Evolutions techniques, sociétales, d'usage...

LES ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES



Évènements extrêmes

Augmentation prévue de l'occurrence des aléas climatiques extrêmes entre 2010 et 2100...
Conséquences :

- Période de retour des événements extrêmes divisée par 200 pour le scénario RCP2.6 (optimiste)

Évènement centennal « 2010 » 2 fois/an

- Fréquence des événements à un niveau donné multipliée par 500 pour le scénario RCP8.5 (pessimiste)

Évènement centennal « 2010 » 5 fois/an



ENJEUX DE LA RÉSILIENCE FERROVIAIRE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Infrastructures prématurément vieilles, dégradées ou détruites



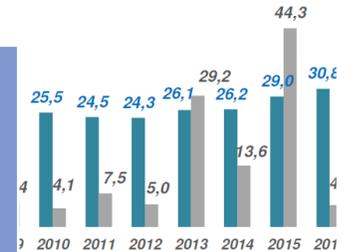
Organisation de l'exploitation perturbée



Politiques d'entretien impactées



Hausse des coûts de réparation, d'entretien, etc.



Impacts sur circulations et usagers



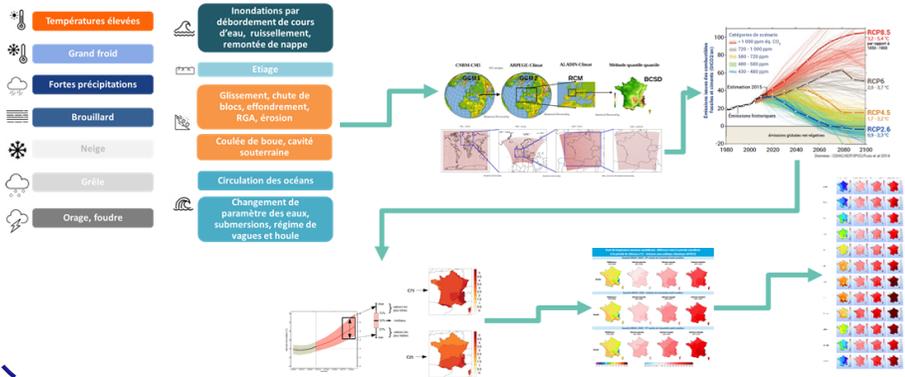
Impacts sur les territoires : desserte, économie, vie, etc.



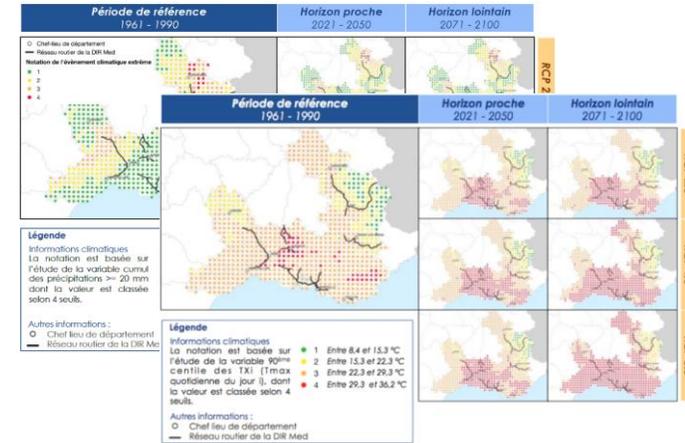
Etc.

DÉFINIR UNE STRATÉGIE DE RÉSILIENCE... DES SOLUTIONS SUR-MESURE

Identification des caractéristiques actuelles et futures des aléas



Analyse de l'évolution des vulnérabilités notamment dans un contexte de changement climatique

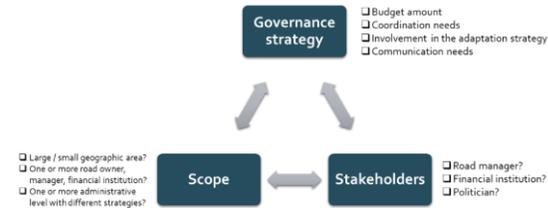


Identification de solutions d'adaptation les plus pertinentes

Représentation	Impact	Adaptation	Adaptation	Adaptation	Adaptation
...

Type / Product	Duration of Use	Notes	Picture
Sand Bags	Temporary	Used only during storm conditions. Not for long term inundation; possibility of failure; labor intensive; may require access to water or stockpile if existing soil at site not suitable. Height of structure up to 36 inches. The width of a sandbag wall is 3 times its height for stability. The sandbag is not a FEMA recommended solution (labor, material disposal, installation, etc.).	
Self-expanding sandbags (e.g. FloodBox or SUS Flood Bags)	Temporary	Made of a light weight polymer material that expands when exposed to water; not for long term inundation; possibility of failure; labor intensive; does not require extensive storage area. Height of structure up to 36 inches. The width of a sandbag wall is 3 times its height.	
Water-Curtain Self-sealing Barrier	Seasonal use, re-usable over multiple years	Deploys flat, rises by water pressure forces and creates a barrier, constructed from a high strength PVC fabric and incorporates integrated ballasting system on the front barrier flap. Height of structure is designed to retain water and is sold in sizes ranging from 6 to 60 inches.	
AquaFence	Seasonal use, re-usable over multiple years	Deployable flood protection structure; designed for rapid deployment, constructed of soft and hard materials. Height of structure ranges from 48 to 96 inches.	
Portable Cylinder Flood Barriers	Seasonal use, re-usable over multiple years	Plastic sheets that form interlocking barrels are filled with water. Height of structure is ranges from 48 to 144 inches.	

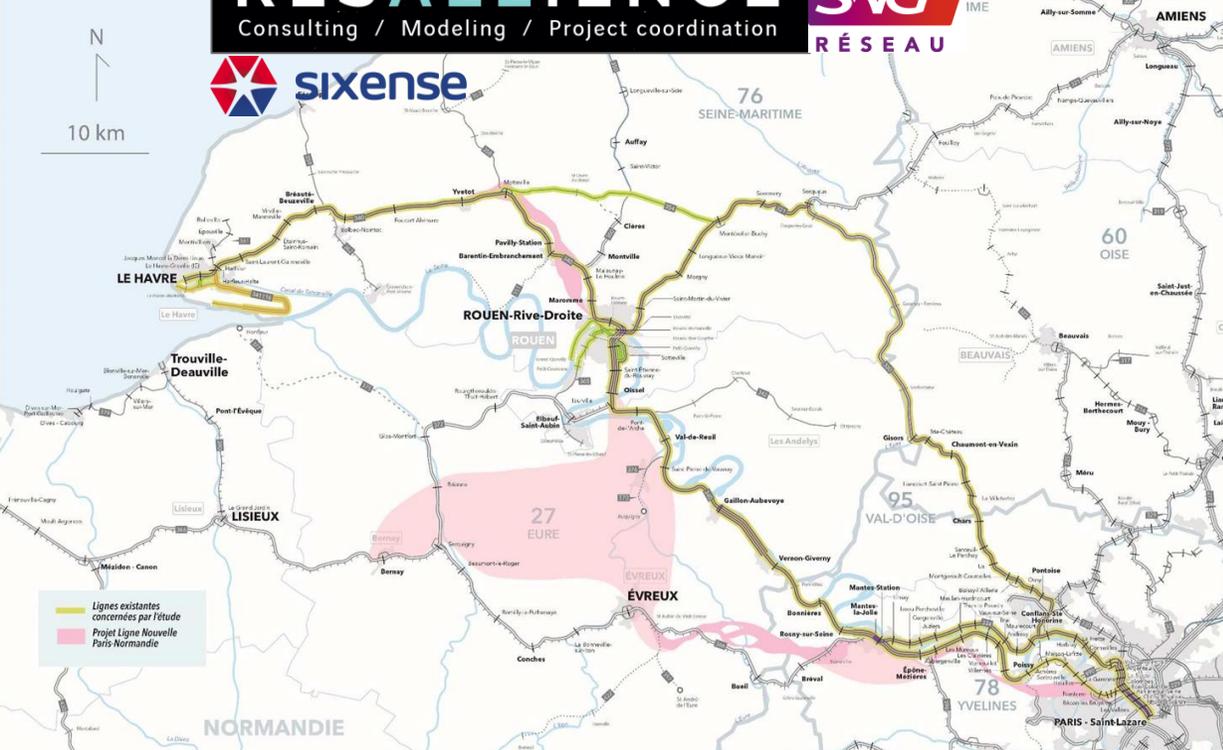
Définition d'une stratégie de résilience avec priorisation des solutions d'adaptation



Scenario	Asset	Impact	Adaptation	Priority	Resilience
Sea	2	...
	3	...
	1	...
Ice	1	...
	3	...
	2	...
Sea	1	...
	2	...
	3	...



RESALLIANCE
Consulting / Modeling / Project coordination



AXE SEINE - DIAGNOSTIC DE VULNÉRABILITÉ

15/03/2023

SOMMAIRE

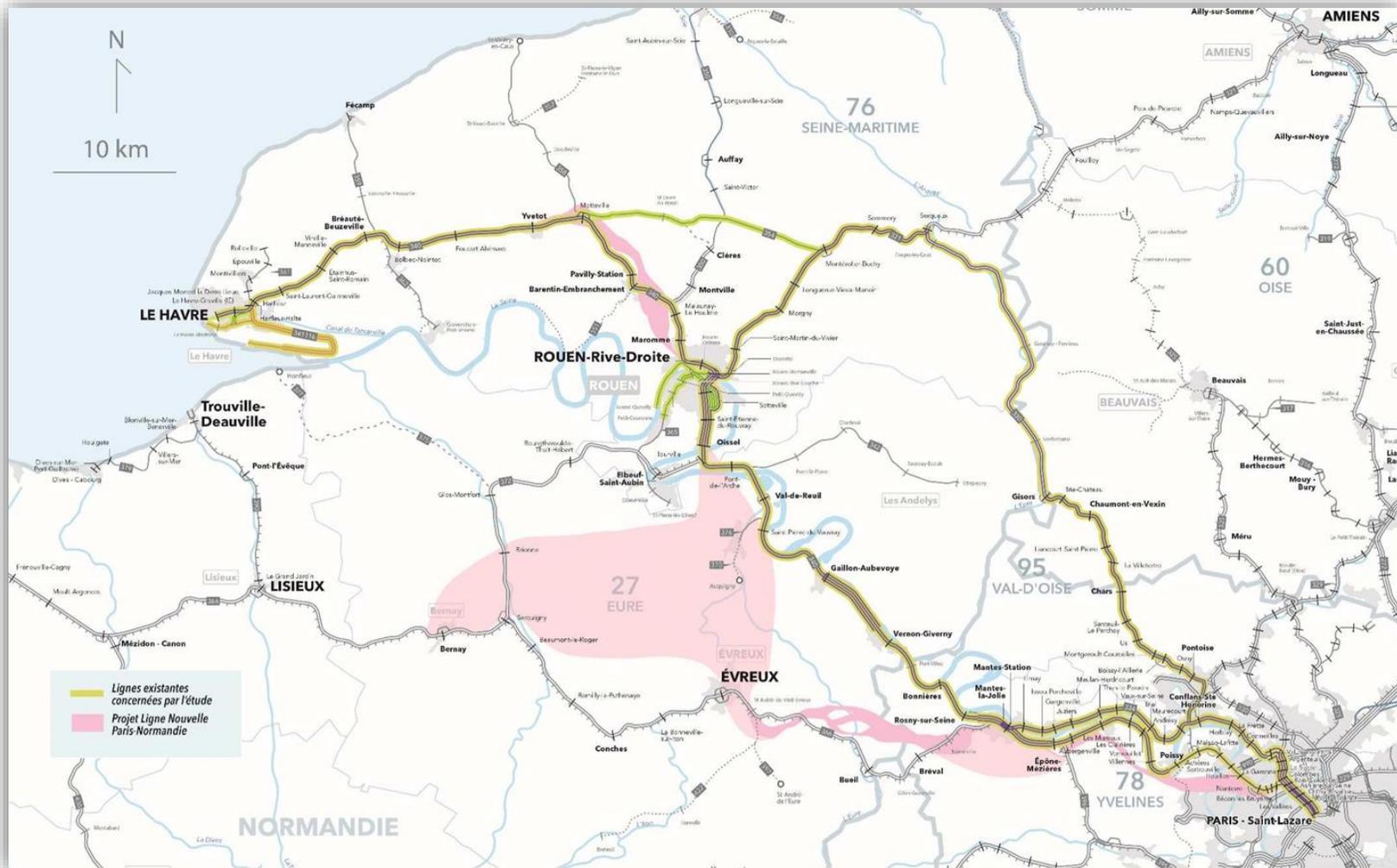
- **Rappel de l'étude et de la méthodologie générale**
- **Projections climatiques : évolutions attendues en Normandie et Ile-de-France**
- **Vulnérabilités physiques de l'axe Seine : les résultats de l'étude**
- **Suites de l'étude : identifier les solutions d'adaptation**
- **Conclusion**



RAPPEL DE L'ÉTUDE

PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE (1/2)

Le réseau

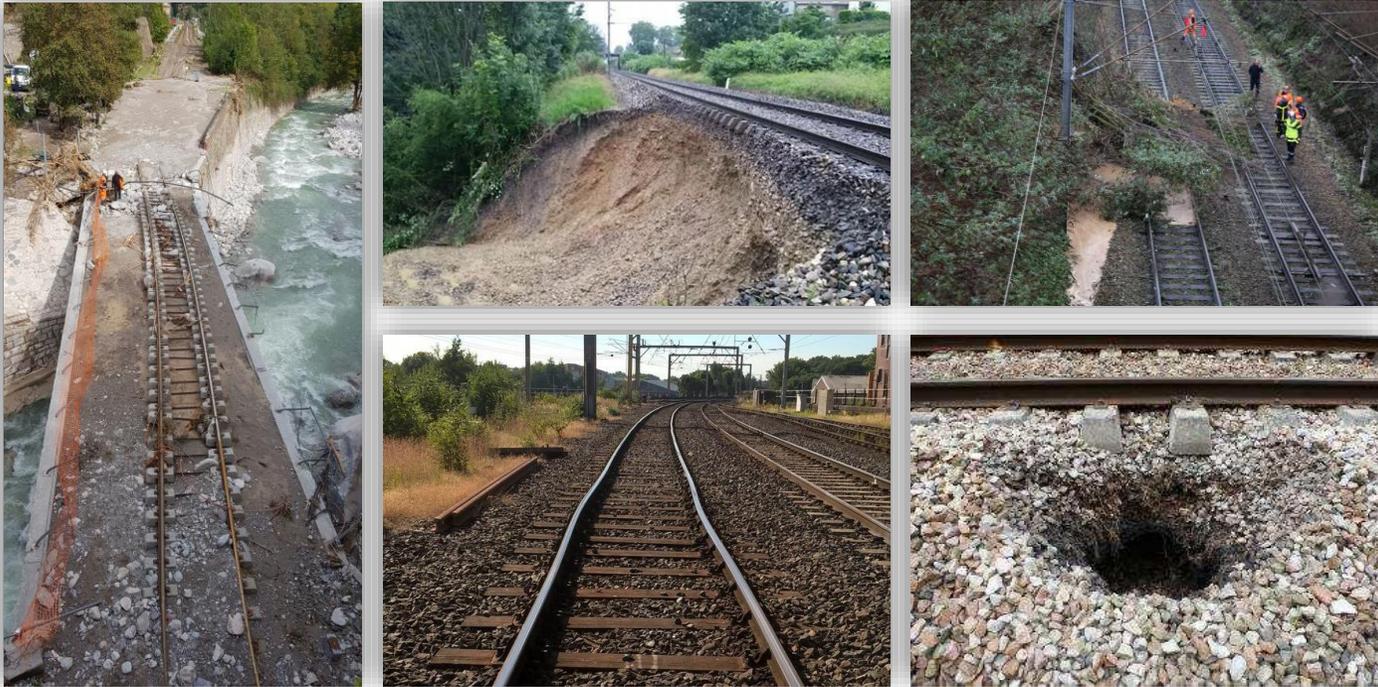


- Paris Saint-Lazare – Le Havre
- Faisceau ferroviaire au niveau du Grand Port Maritime du Havre (GPMH)
- Impacts physiques sur les **infrastructures** : voies, ouvrages en terre, etc.
- Impacts physiques sur les **composants** : rail, ballast, etc.

PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE (2/2)

➤ Le contexte météorologique et climatique

Évènements climatiques et naturels

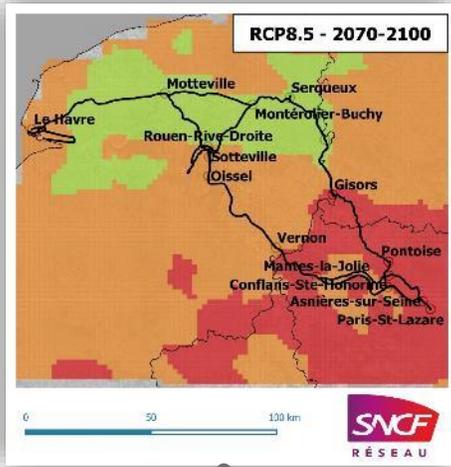


- Analyse de **tous** les évènements climatiques et naturels
 - 15 aléas
 - 2 scénarios climatiques
 - 2 horizons d'études (proche et lointain)
- Pas d'évènements nouveaux mais des **changements de caractéristiques** : fréquence, durée, intensité, localisation



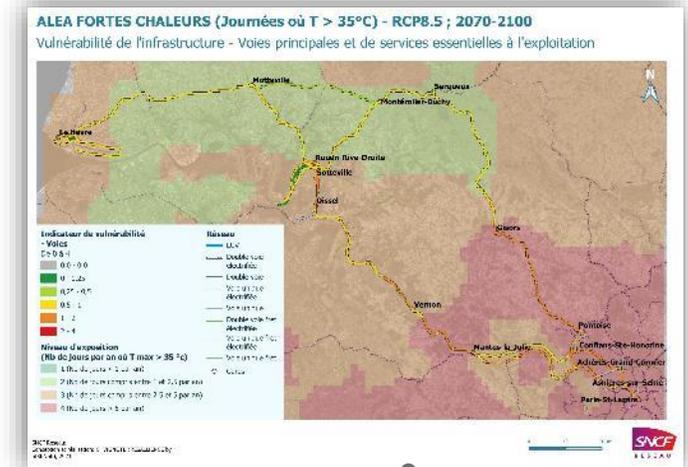
MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET OBJECTIFS



➤ **Objectif** : comprendre les désordres matériels susceptibles de survenir lors de l'occurrence de des aléas étudiés c'est-à-dire analyser les **sensibilités physiques afin de concevoir des scenarii d'adaptation sur** :

- 12 infrastructures
- 73 composants



Structuration d'une base de données & SIG

Variables climatiques et projections

Analyse des sensibilités physiques

Notation de la sensibilité physique

Notation de la vulnérabilité physique

Entretiens

		Familles d'aléas					
		Fortes chaleurs					
		Dégradation			Impact		
Type d'impact	Mécanisme d'impact	Niveau/amplitude de la dégradation	Seuil (aléa) de dégradation	Solution(s)	Direct	Indirect	
Installations de traction électrique (ITE)	Fil de contact et porteur	La chaleur provoque la dilatation du fil. Les contreoids descendant voire se retrouvent au sol et n'assurent donc plus la tension adéquate dans le fil. Lors du passage d'un train, le pantographe peut potentiellement arracher le fil caténaire.	La plage "constructeur" de température pour le réglage de la tension dans le fil de contact est de [-20°C;-50°C]. Ces plages varient selon les régions de France : par exemple, dans le Sud de la France, la plage est plutôt de [-10°C;-60°C].	D'expérience, s'il fait 40°C (température de l'air), le fil de contact peut atteindre 50°C (température de surface)	Des discussions entre infraplées sont en cours pour adapter les réglages. Depuis quelques années, les été sont plus chauds ce qui amène à adapter les plages de température de réglage, changer la hauteur des contreoids.		
	Risque d'arrachement du fil.	La chaleur provoque la dilatation du fil. Les contreoids descendant voire se retrouvent au sol et n'assurent donc plus la tension adéquate dans le fil. Lors du passage d'un train, le pantographe peut potentiellement arracher le fil caténaire.		Entre Mantes-la-Jolie et le Havre, sur 2020-2021, des travaux de mise à niveau de la traction caténaire sont programmés.			

Composant	Commentaire	Poids
1	Passage à niveau avec barrières automatiques	8,89%
2	Passage à niveau sans barrière	3,12%
3	Passage à niveau gardé	3,98%
4	Guérite de signalisation	13,43%
5	Signaux	1,97%
6	Poste d'aiguillage mécanique sur voies principales	8,30%
7	Poste d'aiguillage électrique sur voies principales	9,80%
8	Poste d'aiguillage informatique sur voies principales	13,24%
9	Poste d'aiguillage mécanique sur voies de service	2,79%
10	Poste d'aiguillage électrique sur voies de service	3,85%
11	Poste d'aiguillage informatique sur voies de service	3,85%
12	Appareil de voie (mécanisme, contrôleurs, réchauffage)	9,82%
13	Circuit de voie (matériel à la voie, retour courant de traction)	9,03%
14	Détecteur de boîtes chaudes	2,7%
15	Sous-station d'alimentation de la signalisation	5,2%

Mise en application du Guide du CEREMA intitulé : « Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat » ([lien](#))

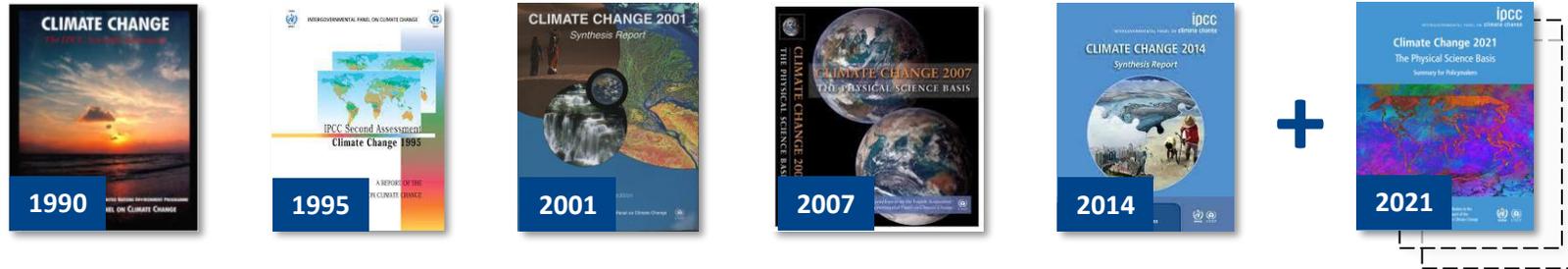


PROJECTIONS CLIMATIQUES

COMMENT LE CLIMAT ÉVOLUE À L'ÉCHELLE DE LA PLANÈTE ?

➤ Un organisme depuis 1988 : le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

- 5 « rapports d'évaluation » et des « rapports spéciaux » suite aux Accords de Paris



- Des confirmations sur :

—Le réchauffement



Si l'on considère les 10 dernières années, la température moyenne a augmenté de **1,1°C**

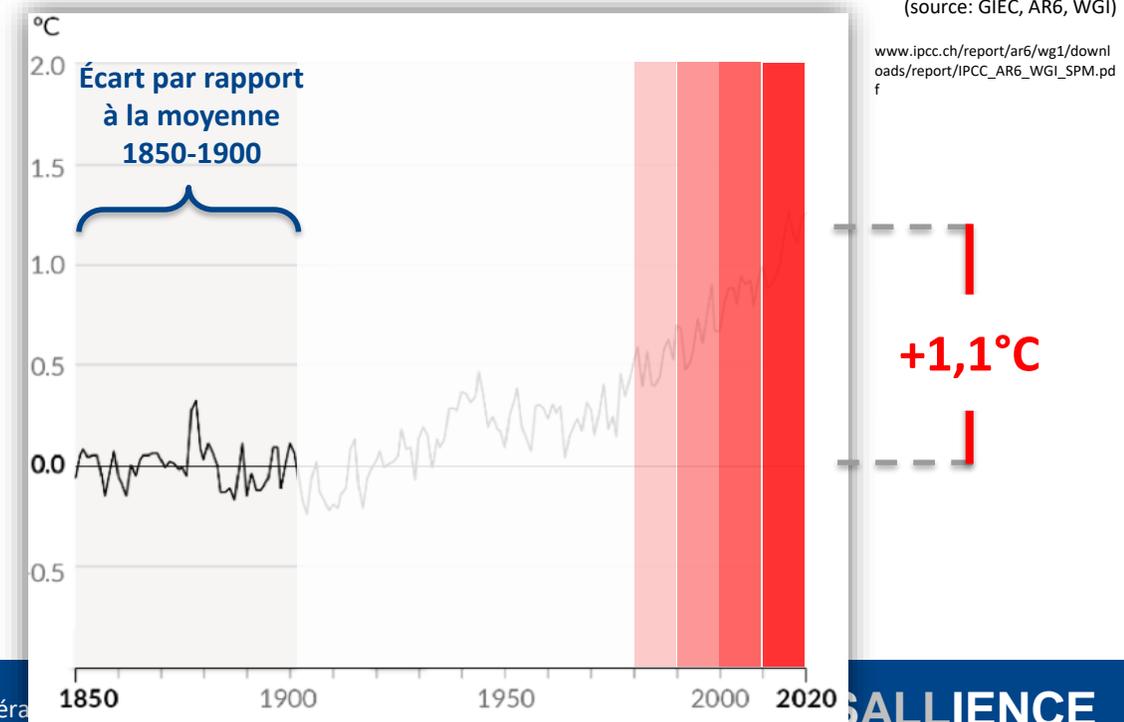


Chacune des quatre dernières décennies a été **successivement la plus chaude** depuis la fin des années 1800



Réchauffement à un **rythme sans précédent** depuis au moins 2000 ans

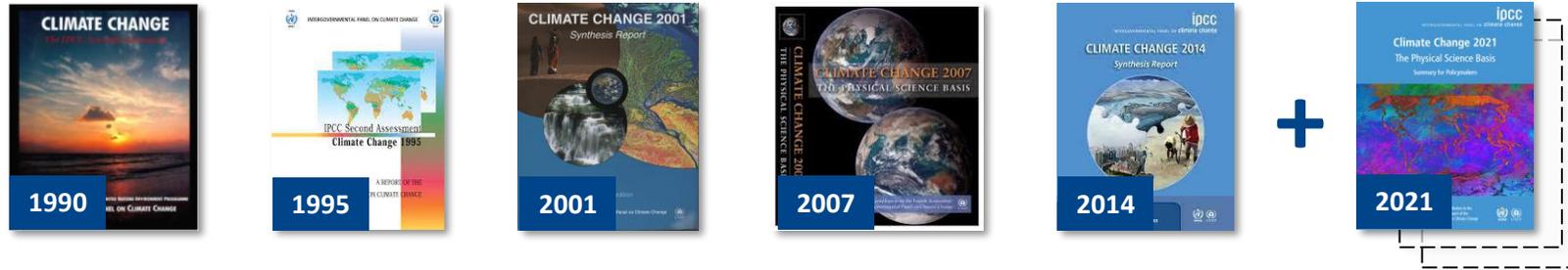
Changements de température de surface globale par rapport à la moyenne de la période 1850-1900 (source: GIEC, AR6, WGI)



COMMENT LE CLIMAT ÉVOLUE À L'ÉCHELLE DE LA PLANÈTE ?

➤ Un organisme depuis 1988 : le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

- 5 « rapports d'évaluation » et des « rapports spéciaux » suite aux Accords de Paris



- Des confirmations sur :

—Le **réchauffement**

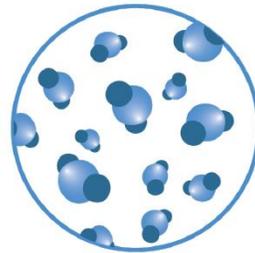
—Le **CO₂**

—Le **niveau des mers**

—La **banquise**

—Les **glaciers**

concentration
CO₂



la plus élevée

depuis au moins

2 millions d'années

montée du
niveau des mers

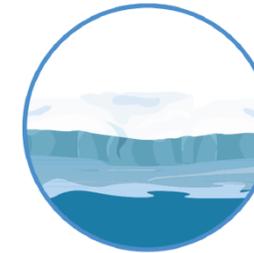


la plus rapide

depuis au moins

3000 ans

surface de la
banquise arctique



la plus réduite

depuis au moins

1000 ans

recul des
glaciers



sans précédent

depuis au moins

2000 ans

COMMENT LE CLIMAT ÉVOLUE SUR L'AXE SEINE ?

Région Île-de-France



Départements : Hauts-de-Seine, Yvelines, Val d'Oise

  Une **augmentation potentielle** des **températures extrêmes chaudes** pendant les mois d'été, plus marquée qu'en Normandie

  Une **diminution potentielle** du **risque de gel et d'enneigement**, plus marquée qu'en Normandie

  Une **augmentation potentielle** des **précipitations annuelles et extrêmes**

  Une **augmentation potentielle** des **périodes de sécheresse**

  Une **augmentation potentielle** du **risque de retrait-gonflement des argiles**

  Une **possible augmentation** des **effondrements karstiques** (cavités souterraines de type marnière) et **glissements de terrains**

  Une **augmentation potentielle** du **risque de feux de forêts et de végétation**, plus marquée qu'en Normandie

Région Normandie



Départements : Eure, Seine-Maritime

  Une **augmentation potentielle** des **températures extrêmes chaudes** pendant les mois d'été

  Une **diminution potentielle** du **risque de gel et d'enneigement**

  Une **augmentation potentielle** des **précipitations annuelles et extrêmes**

  Une **augmentation potentielle** des **périodes de sécheresse**, plus marquée qu'en Île-de-France

  Une **augmentation potentielle** du **risque de retrait-gonflement des argiles**, plus marquée qu'en Île-de-France

  Une **augmentation potentielle** des **risques d'inondations** (débordement de cours d'eau, ruissellement pluvial et remontée de nappes), plus marquée qu'en Île-de-France

  Une **possible augmentation** des **effondrements** (cavités souterraines) et **glissements de terrains**, plus marquée qu'en Île-de-France due à l'exploitation passée des souterrains normands

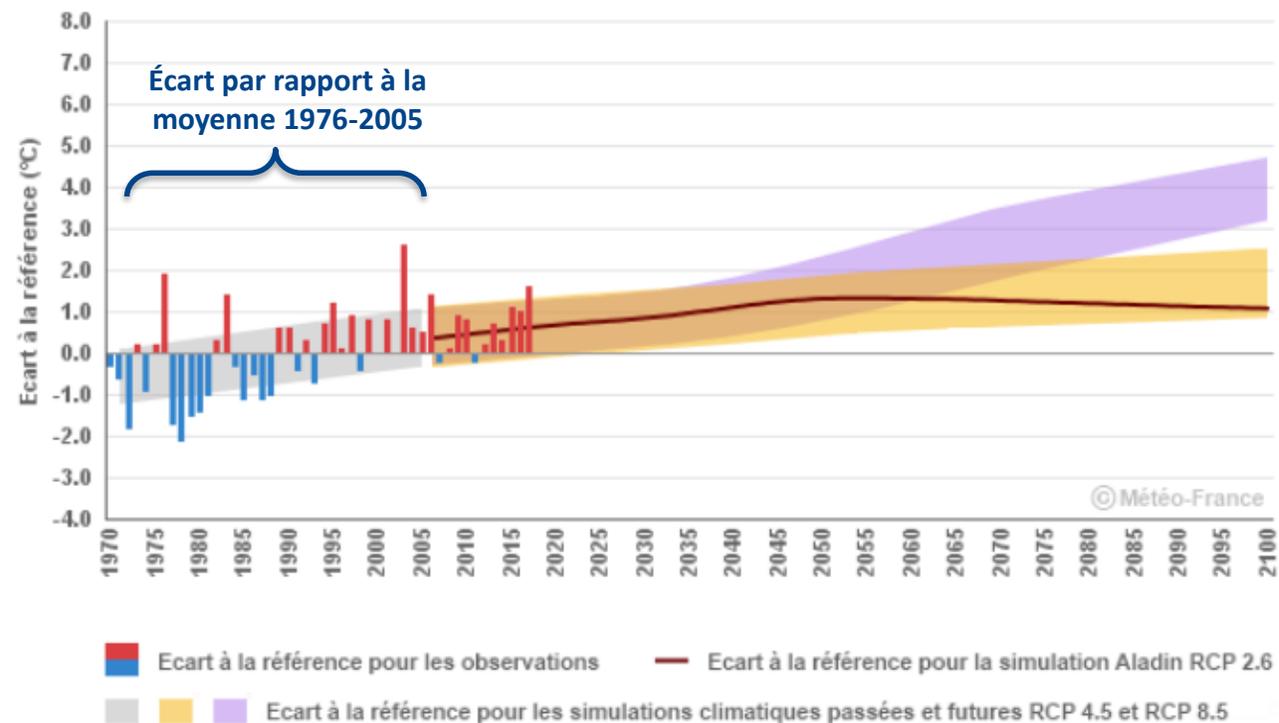
  Une **augmentation potentielle** du **risque de feux de forêts et de végétation**

  Une **augmentation potentielle** du **risque de submersion marine**

COMMENT LE CLIMAT ÉVOLUE SUR L'AXE SEINE ?

Des températures moyennes estivales en hausse en Normandie

Température moyenne estivale en Haute-Normandie : écart à la référence 1976-2005
Observations et simulations climatiques pour trois scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5 et 8.5



Région Normandie



Départements : Eure, Seine-Maritime

- Une **augmentation potentielle** des **températures extrêmes chaudes** pendant les mois d'été
- Une **diminution potentielle** du **risque de gel** et d'**enneigement**
- Une **augmentation potentielle** des **précipitations annuelles et extrêmes**
- Une **augmentation potentielle** des **périodes de sécheresse**, plus marquée qu'en Île-de-France
- Une **augmentation potentielle** du **risque de retrait-gonflement des argiles**, plus marquée qu'en Île-de-France
- Une **augmentation potentielle** des **risques d'inondations** (débordement de cours d'eau, ruissellement pluvial et remontée de nappes), plus marquée qu'en Île-de-France
- Une **possible augmentation** des **effondrements** (cavités souterraines) et **glissements de terrains**, plus marquée qu'en Île-de-France due à l'exploitation passée des souterrains normands
- Une **augmentation potentielle** du **risque de feux de forêts et végétation**
- Une **augmentation potentielle** du **risque de submersion marine**



VULNÉRABILITÉS PHYSIQUES

LES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

LES VULNÉRABILITÉS PHYSIQUES PRINCIPALES

Par infrastructure



- Équipements de télécommunication
- Ouvrage en terre
- Installations de Traction Électrique
- Voies
- Ouvrages d'art souterrains

Par aléa



- Inondation de type crue torrentielle
- Inondation par débordement de cours d'eau
- Neige
- Fortes chaleurs
- Retrait-gonflement des argiles

- Niveaux de vulnérabilité majeurs à court terme
- Niveaux de vulnérabilité majeurs à long terme
- Niveaux de vulnérabilité à forte évolution
- Vue multi-infrastructures

Par secteur



- Paris - Rouen
- Rouen - Le Havre
- Secteur Le Havre
- Secteur Rouen

LIVRABLES / DEVELOPPEMENT D UN SIG DÉDIE A LA CONCEPTION ET A LA MAINTENANCE DU RÉSEAU FERROVIAIRE EN CONTEXTE DE CC

➤ Développement d'un SIG

Une infrastructure

Un aléa / Multi-alea

Un secteur

- ✓ Vulnérabilités physiques
 - ✓ 1 - Voies
 - ✓ Inondation de type crue torrentielle
 - Scénario de référence
 - RCP 4.5 horizon 2015-2045
 - RCP 4.5 horizon 2070-2100
 - RCP 8.5 horizon 2015-2045
 - ✓ RCP 8.5 horizon 2070-2100
 - ✓ 0 - 0,345
 - ✓ 0,345 - 0,422
 - ✓ 0,422 - 0,584
 - ✓ 0,584 - 0,884
 - Inondation par débordement de cours d'eau
 - Fortes chaleurs (Nombre de jours où Tmax > 30 °C)
 - Fortes chaleurs (Nombre de jours où Tmax > 35 °C)
 - Mouvement de terrain lié aux cavités souterraines
 - Neige
 - Inondation par remontée de nappe
 - Inondation par submersion marine
 - Retrait-gonflement des argiles
 - Vague de froid

- ✓ Aléas
 - Feux de forêt
 - Inondation de type crue torrentielle
 - Inondation par débordement de cours d'eau
 - Gel (nombre de jours de gel)
 - Dégel (nombre de jours sans dégel)
 - Fortes chaleurs (Nombre de jours où Tmax > 30 °C)
 - ✓ Fortes chaleurs (Nombre de jours où Tmax > 35 °C)
 - Scénario de référence
 - ✓ RCP 4.5 horizon 2015-2045
 - ✓ 1
 - ✓ 2
 - ✓ 3
 - ✓ 4
 - RCP 4.5 horizon 2070-2100
 - RCP 8.5 horizon 2015-2045
 - RCP 8.5 horizon 2070-2100
 - Mouvement de terrain lié aux cavités souterraines
 - Neige
 - Inondation par remontée de nappe
 - Inondation par submersion marine
 - Retrait-gonflement des argiles
 - Extrême froid de la température minimale
 - Vague de froid
 - Tempête (vent > 70 km/h)
 - Tempête (vent > 90 km/h)

- ✓ Synthèse multi-infrastructures
 - Inondation de type crue torrentielle
 - Feux de forêt
 - ✓ Inondation par débordement de cours d'eau
 - ✓ 1 infrastructure
 - ✓ 0
 - ✓ 1 - 5
 - ✓ 6 - 10
 - ✓ 11 - 15
 - ✓ 16 - 20
 - ✓ 2-3 infrastructures
 - ✓ 0
 - ✓ 1 - 5
 - ✓ 6 - 10
 - ✓ 11 - 15
 - ✓ 16 - 20
 - ✓ 4-5 infrastructures
 - ✓ 0
 - ✓ 1 - 5
 - ✓ 6 - 10
 - ✓ 11 - 15
 - ✓ 16 - 20
 - ✓ + de 6 infrastructures
 - ✓ 0
 - ✓ 1 - 6
 - ✓ 7 - 10
 - ✓ 11 - 15
 - ✓ 16 - 20
 - Gel (nombre de jours de gel)
 - Dégel (nombre de jours sans dégel)

LIVRABLES : CARTOGRAPHIES DES SCENARII DE VULNERABILITE ET DE SENSIBILITÉS

➤ Développement d'un atlas cartographique

- Vulnérabilités majeures à court terme
- Vulnérabilités majeures à long terme
- Vulnérabilités à forte évolution à long terme
- Secteurs concentrant des enjeux sensibles issus de plusieurs infrastructures



MERCI DE VOTRE ATTENTION

Contact

Karim Selouane : Karim.selouane@resallience.fr

SUITE DE L'ÉTUDE -> CEREMA



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



RÉSILIENCE DES RÉSEAUX FERROVIAIRES (SUITE)

Enjeux et démarches pour faire face au changement climatique (suite)

Mars 2023





Merci de votre attention



Marie Colin

Référente technique résilience des infrastructures et adaptation au changement climatique – Cerema ITM



Contact :
Marie.colin@cerema.fr
resilience-infrastructures@cerema.fr