



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Journée scientifique et technique du CFMS

**Résilience et adaptation au changement climatique :  
une démarche adaptable aux ouvrages en terre**



**Marie Colin**

09 DÉCEMBRE 2021

# Enjeux de la résilience et de l'adaptation au changement climatique

## Résilience

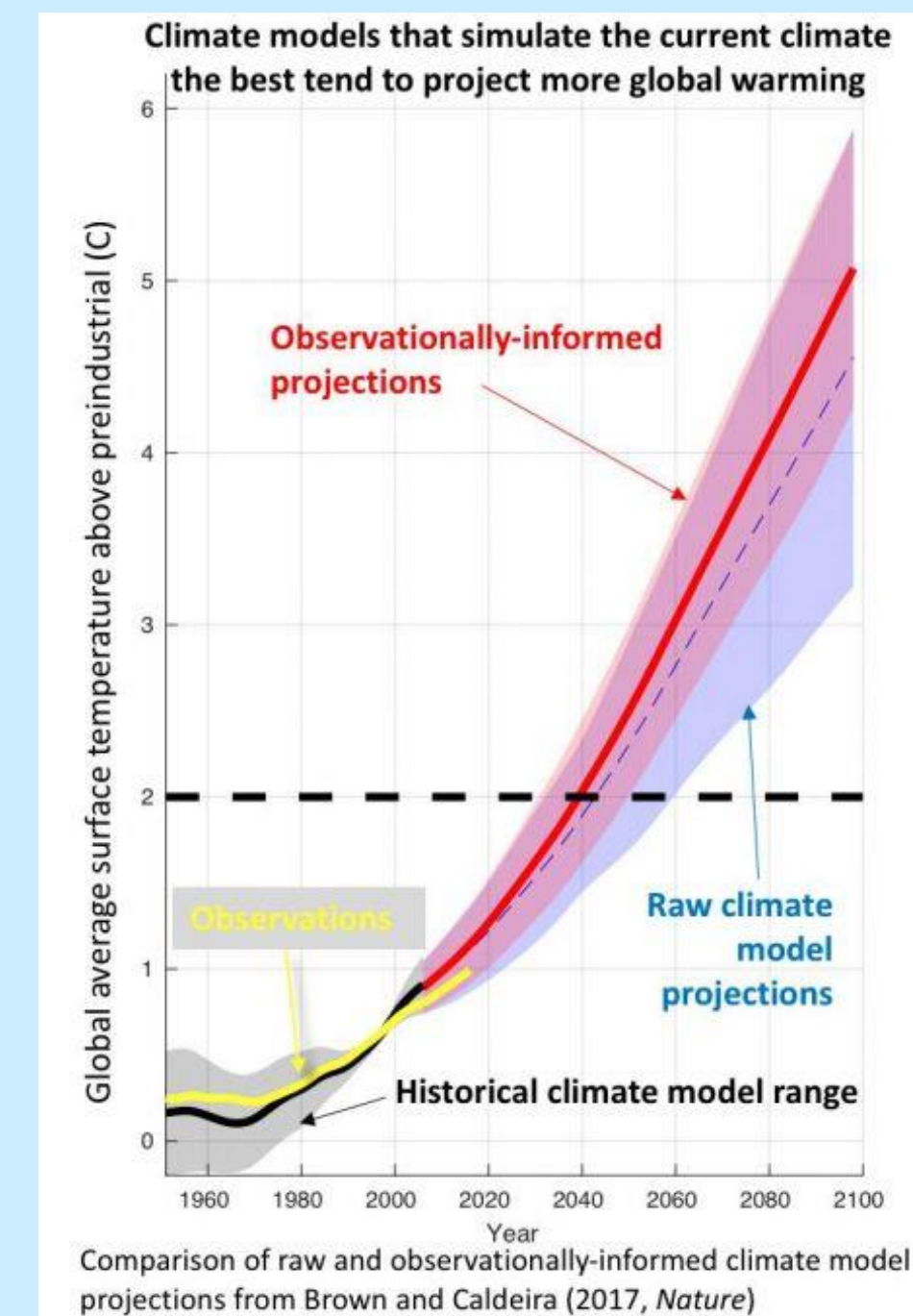
“ Capacité d'un système social, économique ou écologique à faire face à une **perturbation**, une **tendance** ou un **évènement** dangereux, en réagissant ou en se réorganisant de manière à conserver sa fonction essentielle, son identité et sa structure tout en gardant ses facultés d'adaptation, d'apprentissage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

(D'après IPCC, 2014 et Arctic Council, 2016)

Ce qui fait partie de notre définition :

- Risque, crise, catastrophe
- Vieillissement, dégradation chronique
- Changement climatique
- Évolutions techniques, sociétales

## Adaptation au changement climatique



Adaptation

Gérer  
l'inévitable



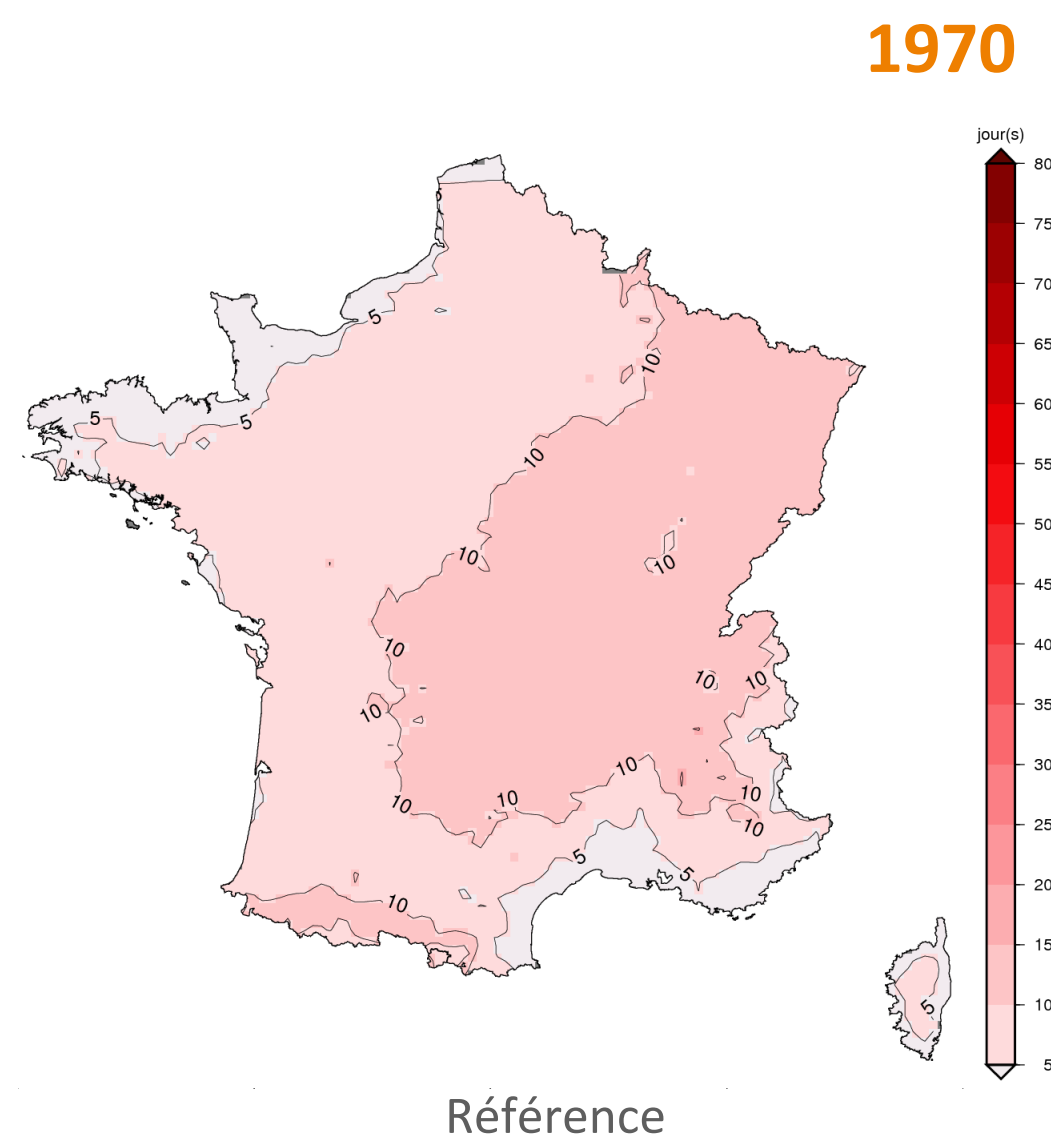
Atténuation

Eviter l'ingérable

# Enjeux de la résilience et de l'adaptation au changement climatique

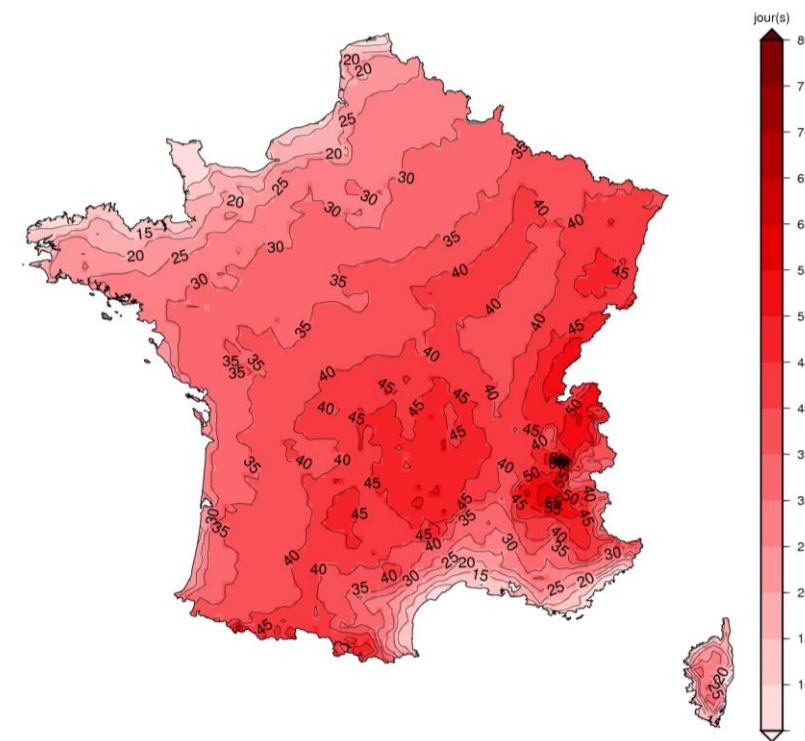


Indicateur : nombre de jours de vagues de chaleur (température maximale supérieure de plus de 5°C à la normale pendant au moins 5 jours consécutifs)



## Projections centrées sur 2035 (2020-2050)

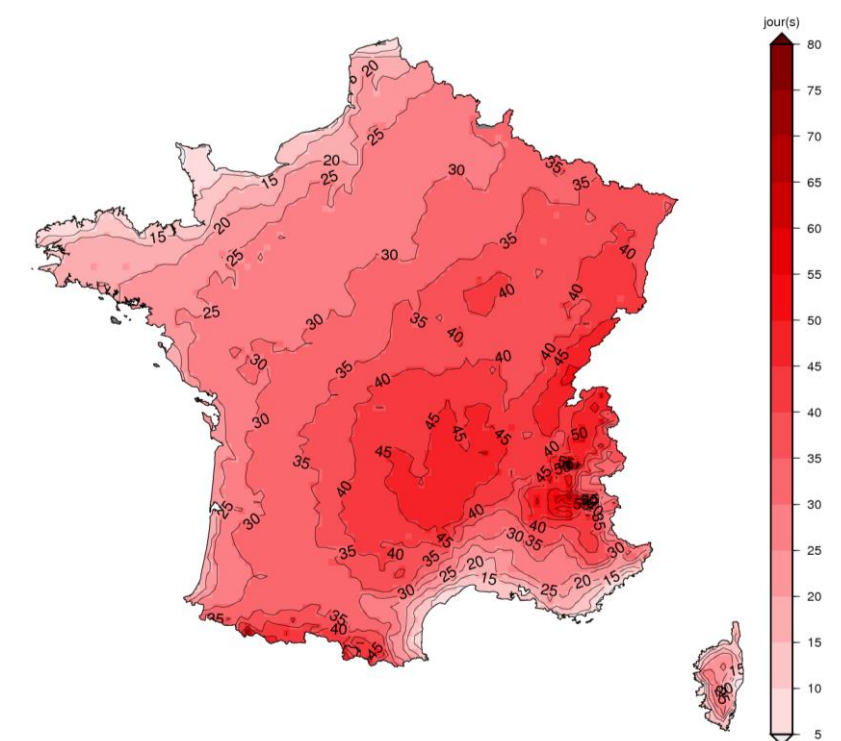
RCP8.5



Scénario sans politique climatique

**x4**  
sur la majeure partie du territoire et  
jusque **x6** par endroits

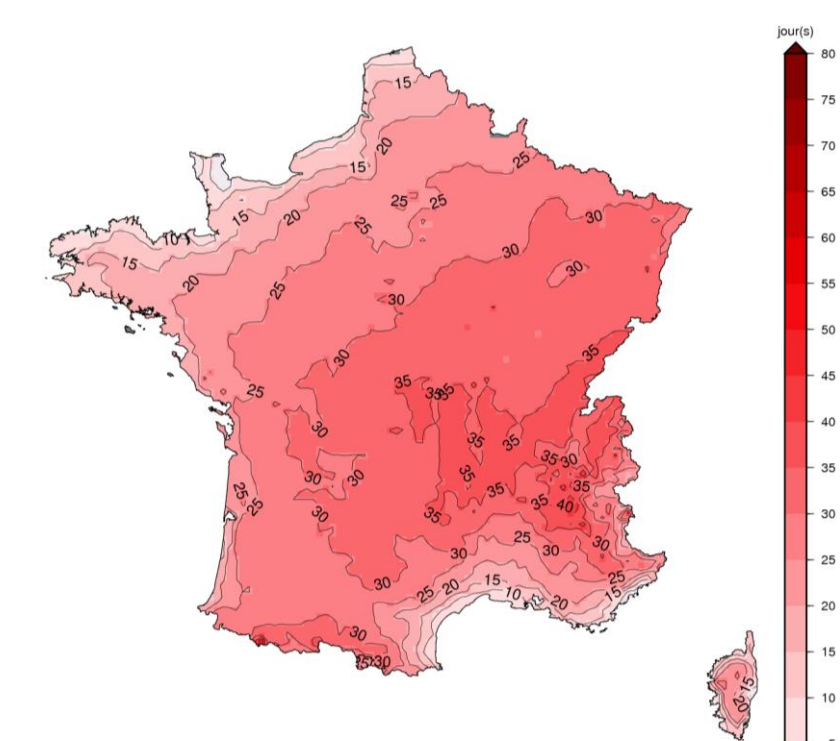
RCP4.5



Scénario avec une politique  
climatique visant à stabiliser les  
concentrations en CO2

**x4**  
sur la majeure partie du territoire et  
jusque **x6** par endroits

RCP2.6



Scénario avec une politique  
climatique visant à faire baisser les  
concentrations en CO2

**x3**  
sur la majeure partie du territoire et  
jusque **x5** par endroits

Source : Drias, les futurs du climat

# Enjeux de la résilience et de l'adaptation au changement climatique



Sources : France3-régions, Le Progrès, Commune de Sarrogn, Météo Franc-comtoise, Cerema, DIR Méditerranée,

# Enjeux de la résilience et de l'adaptation au changement climatique

Impacts sur les infrastructures



Impacts sur les usagers



Impacts sur la gestion



Impacts sur les budgets



Impacts sur les territoires



Etc.

# Approche d'amélioration de la résilience au changement climatique

OFFRES CEREMA POST CRISE  
«AMÉNAGER À VOS CÔTÉS LES  
TERRITOIRES RÉSILIENTS»

## Améliorer la résilience de vos infrastructures et réseaux de transport : Diagnostiquer les vulnérabilités aux aléas climatiques actuels et futurs

**CONTEXTE**

Les infrastructures de transport font face à de nombreux aléas d'origine naturelle ou anthropique : des événements extrêmes endommagent ou détruisent régulièrement routes, ponts, plateformes portuaires et aéroportuaires.

Les effets de ces intempéries sont aggravés par l'urbanisation, l'artificialisation des sols, le manque de suivi des ouvrages critiques, la sous-estimation de la vulnérabilité de l'environnement et le changement climatique.

Lorsque les infrastructures de transport deviennent inopérantes, deux crises successives surviennent : difficultés dans les opérations de secours, puis réhabilitation ou reconstruction des infrastructures sous forte contrainte budgétaire. A cela s'ajoutent les impacts indirects sur les usagers et sur l'économie liés aux difficultés de déplacement.

Rendre les infrastructures résilientes aux risques est une réponse à privilégier pour sauvegarder durablement un patrimoine essentiel. La prise en compte de la résilience dans les investissements - travaux neufs, de maintenance ou de réhabilitation - n'est ainsi plus une option pour la puissance publique, Etat et collectivités.

**THÉMATIQUES ASSOCIÉES**

- \* Résilience des infrastructures et réseaux de transport
- \* Résilience des territoires
- \* Climat

**VOTRE BESOIN**

Vous gérez un réseau d'infrastructures de transport et vous préoccupez de la continuité d'activité. Vous craignez que des aléas mal estimés ne viennent anéantir votre patrimoine et mettre en péril l'activité économique de votre région ou de votre périmètre d'action. Vous souhaitez identifier les vulnérabilités, physiques ou fonctionnelles, de vos infrastructures et préparer une réponse globale. Vous souhaitez être accompagnés par des experts de la résilience des réseaux de transport pour définir la stratégie d'action adaptée à vos besoins réels.

**LA RÉPONSE DU CEREMA**

Le Cerema réalise une analyse de risques sur votre patrimoine, identifie les points critiques de votre réseau ou de vos plateformes, évalue les dommages potentiels et vous propose des solutions d'atténuation des effets de ces aléas. Une offre intégrée d'accompagnement comporte : diagnostic des vulnérabilités, hiérarchisation des différentes solutions, définition et déploiement des solutions, communication vers les parties prenantes.

**Identifier les vulnérabilités : votre stratégie de résilience**

Etape essentielle de la démarche Cerema d'amélioration de la résilience d'un réseau de transport, elle s'appuie sur : un périmètre d'étude adapté aux objectifs du territoire, l'identification des aléas et leurs évolutions possibles, la qualification des vulnérabilités physiques et fonctionnelles, l'analyse des impacts sur les déplacements.

Lorsque vulnérabilités des infrastructures et impacts pour le territoire sont connus, le Cerema vous accompagne dans l'identification des solutions et de leurs coûts, afin de les prioriser et les mettre en œuvre.

**Assistance à maîtrise d'ouvrage**

Votre stratégie de résilience étant adoptée, le Cerema propose des solutions techniques éprouvées et neutres et vous accompagne dans la rédaction des marchés de maîtrise d'œuvre. Il vous apporte également son expertise en phase travaux, afin de lever toute difficulté technique. Le Cerema vous aide, enfin, à identifier les aides disponibles et à lancer les travaux au plus vite.

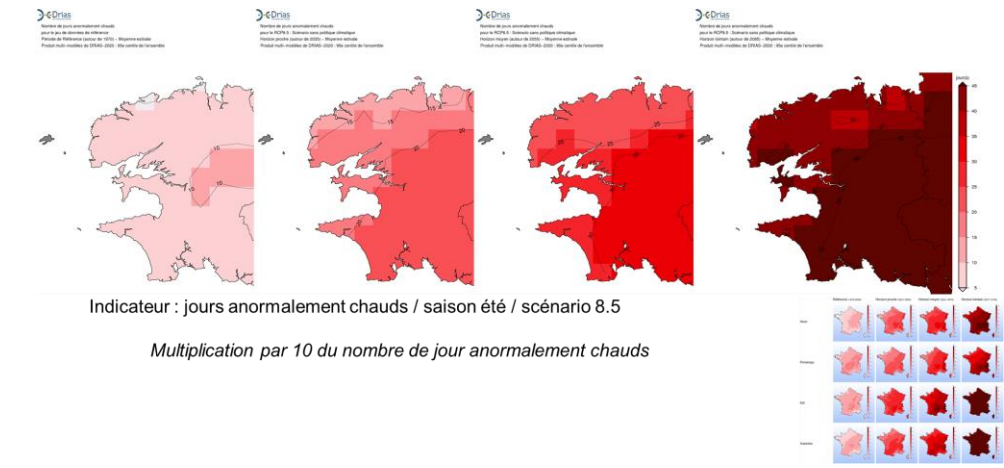
## Les résultats

- Identification des sensibilités actuelles aux aléas climatiques
- Analyse de l'évolution des vulnérabilités dans un contexte de changement climatique
- Identification de solutions d'adaptation
- Définition d'une stratégie de résilience avec priorisation des solutions d'adaptation

*Une méthode développée pour la route et transposable à d'autres problématiques*

## Objectifs possibles de la démarche

- Adapter les solutions techniques
- Prioriser les solutions d'adaptation
- Améliorer les politiques et stratégies de gestion
- Optimiser les dépenses budgétaires
- Améliorer la résilience du réseau et des territoires



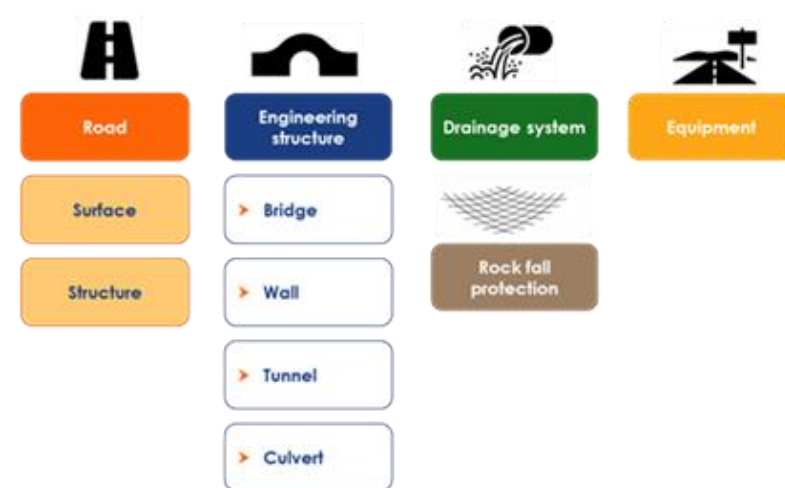
Indicateur	Températures élevées	Températures basses	Précipitations intenses et inondations par ruissellement	Échouages	Éboue	Inondations fluviales et submersions marines	Montée de niveau mers	Gel et cycles de gel/dégel	Neige	Mouvements de terrain causés par gel/dégel	Forces de fort vent	Vent tempêtes (comparaison à long terme en compte de probabilité des vents)
Actuel	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Scénario RCP 4.5 Saison estivale	2	0	2	2	2	2	2	0	0	2	2	1
Scénario RCP 4.5 Saison hivernale	2	0	2	2	2	2	2	0	0	2	2	1
Scénario RCP 8.5 Saison estivale	2	0	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2
Scénario RCP 8.5 Saison hivernale	4	0	3	4	4	4	4	0	0	4	4	2

# Approche d'amélioration de la résilience au changement climatique

## 1. Définir objectifs, périmètres et gouvernance



## 2. Sélectionner les composants et services



## 3. Identifier, sélectionner et collecter les données



## 6. Evaluer la vulnérabilité

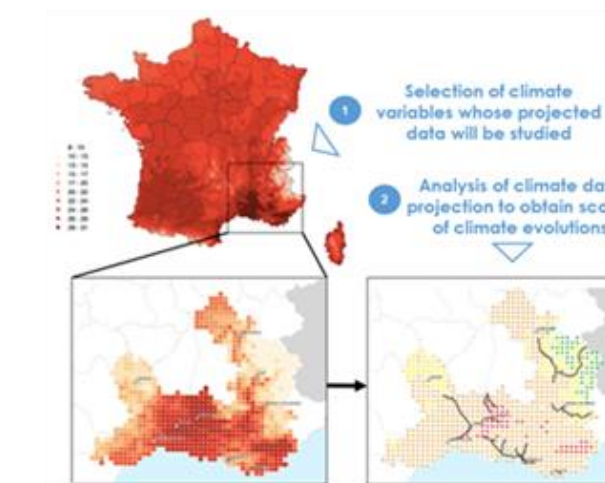
	Extreme hot	Extreme cold	Heavy rain	Drought	Flooding	Marine submersion	Level	Impact
Road	2	1	2	0	3	3	2	Critical
Surface	0	0	0	0	0	0	1	Minor
Structure	0	0	2	0	0	0	0	No impact

Climate events x Sensitivity = Vulnerability

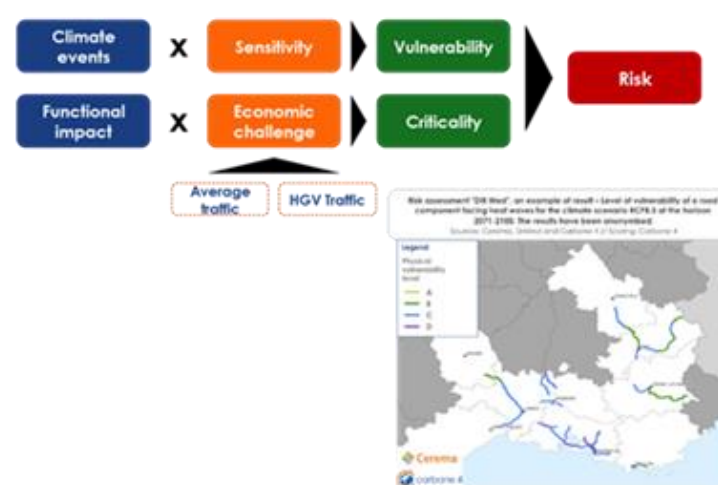
## 5. Analyser la sensibilité



## 4. Analyser l'exposition



## 7. Evaluer le risque



## 8. Identifier les mesures d'adaptation

Adaptation Measures (Infrastructure Related)	Adaptation Measures (Traffic Hazard Management)	Adaptation Measures (Maintenance Measures)	Adaptation Measures (Planning)
Road adaptation measures	Intelligent Transport Systems (ITS)	Periodic Routine Service restoration	Integration of climate change in the design phase
Bridge retrofit	Early warning systems	Re-routing (short-term and planned)	Technical regulations
Tunnel protection from flooding	Retaining structures	Evacuation routes	Adaptation of current regulations to climate change
Others			Legal Frameworks
			Others

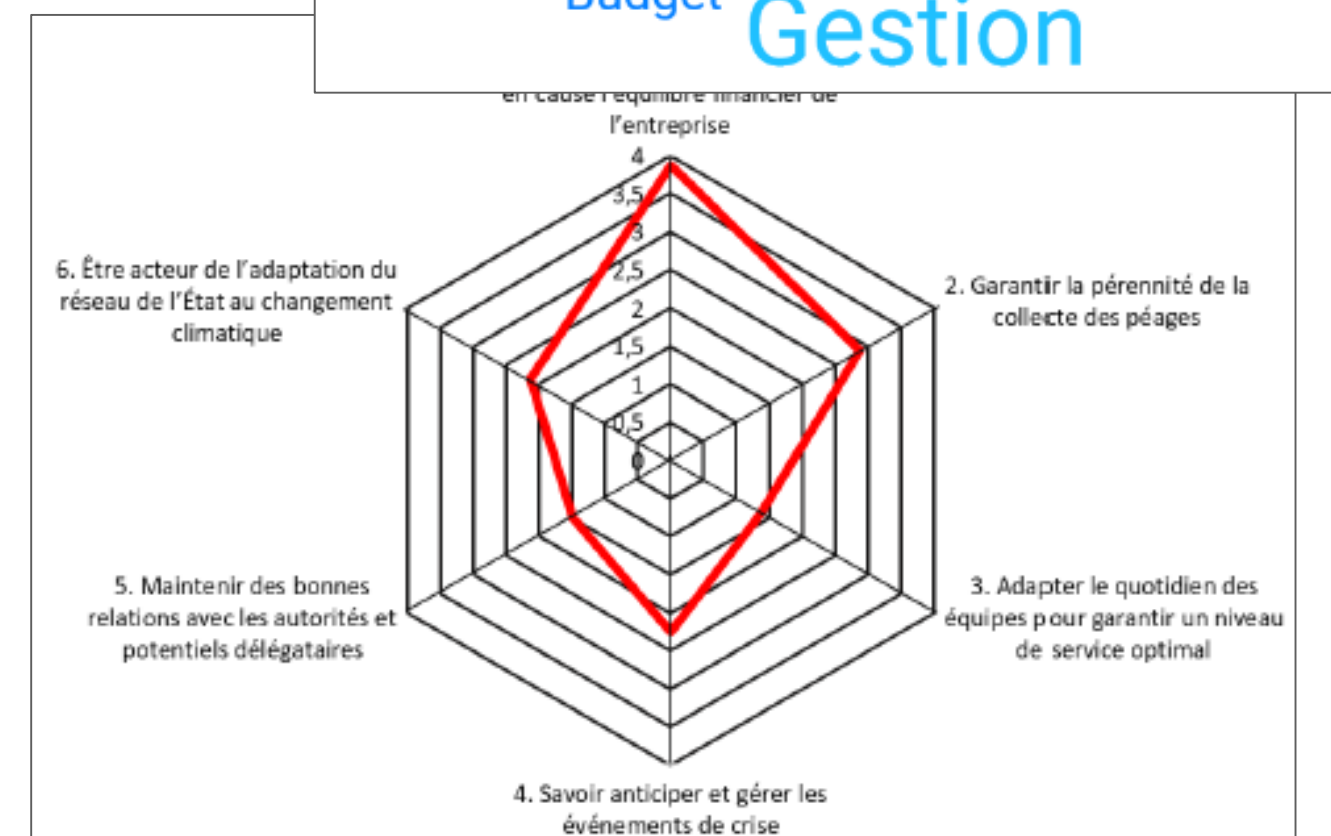
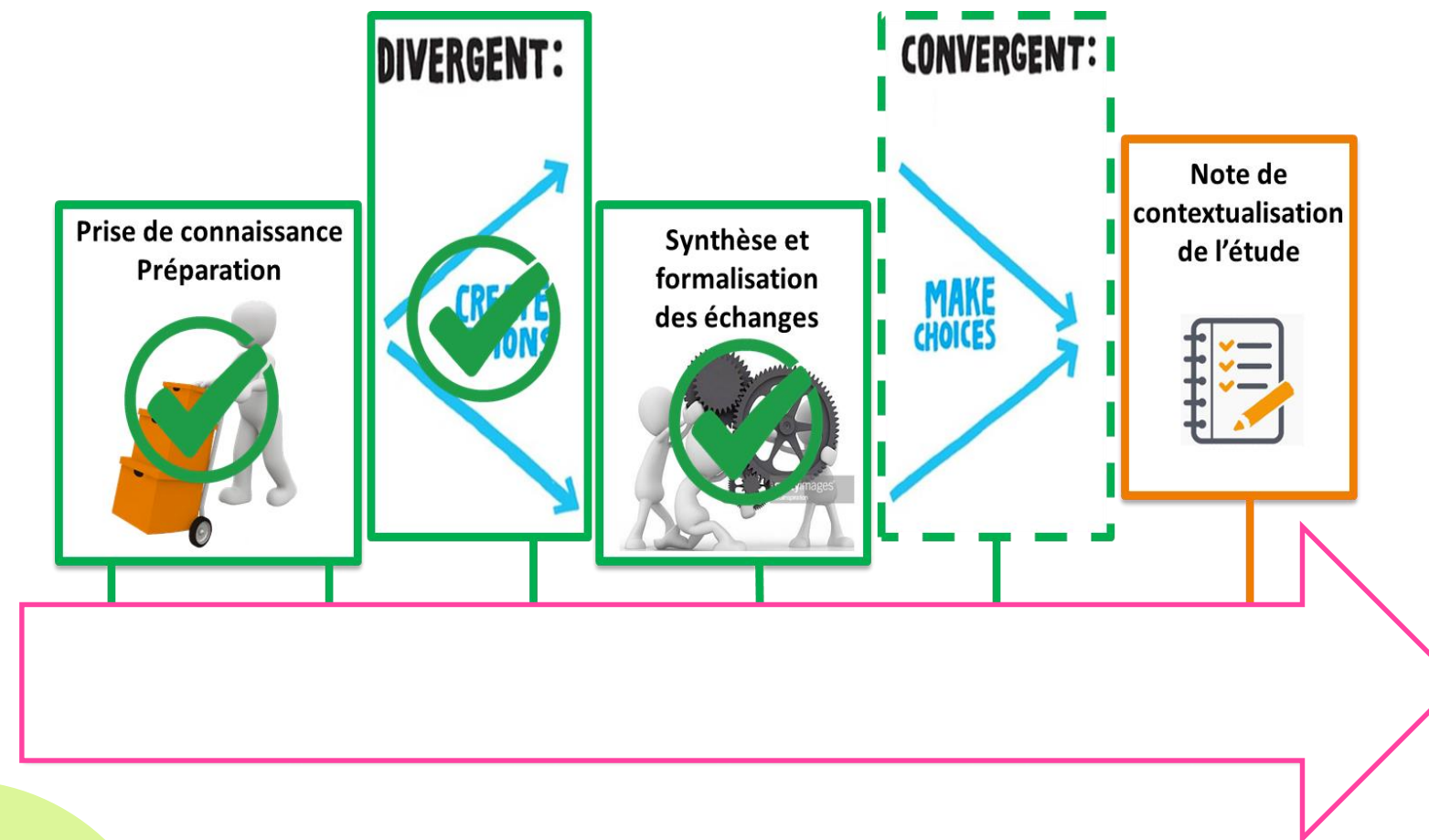
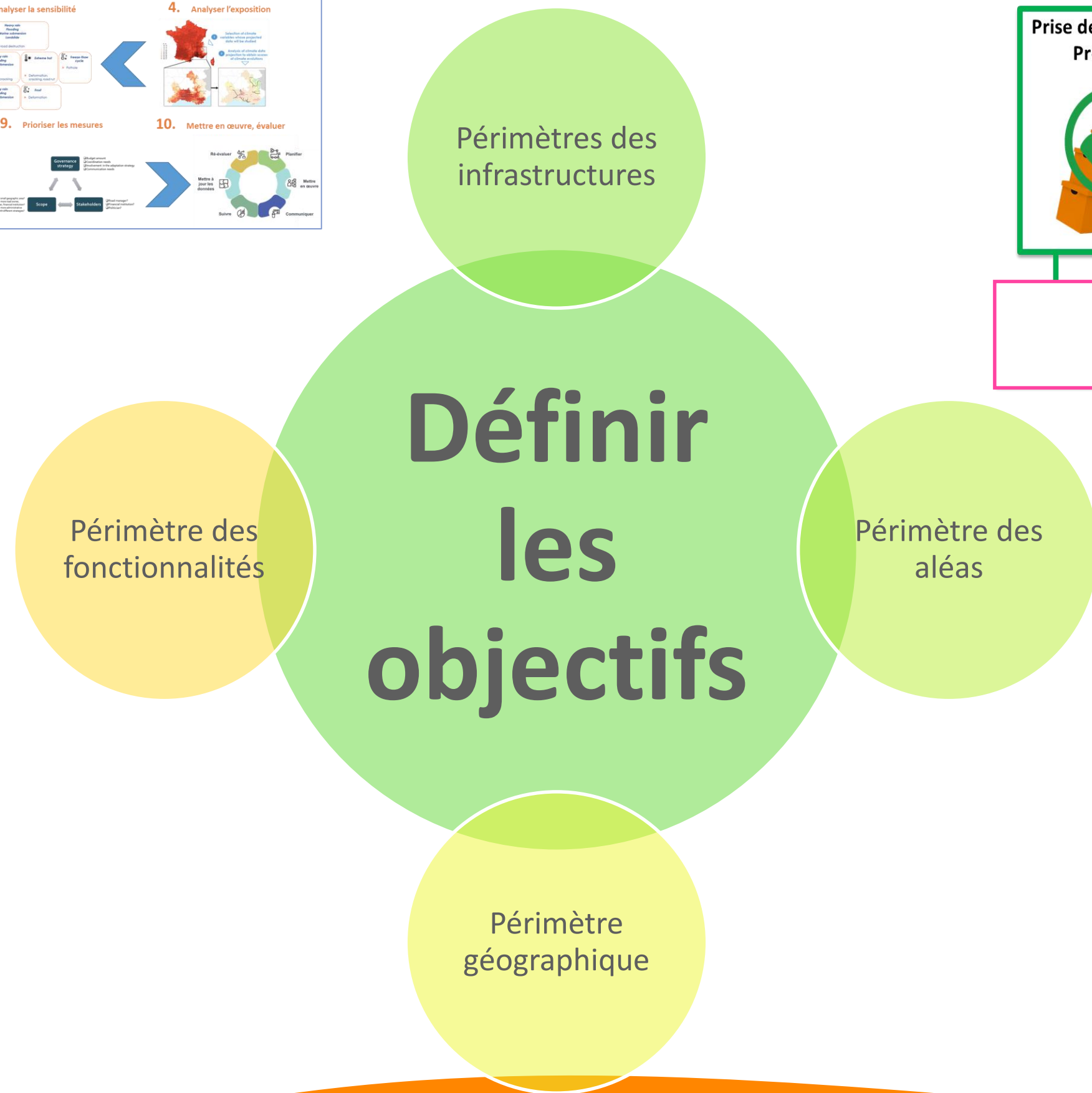
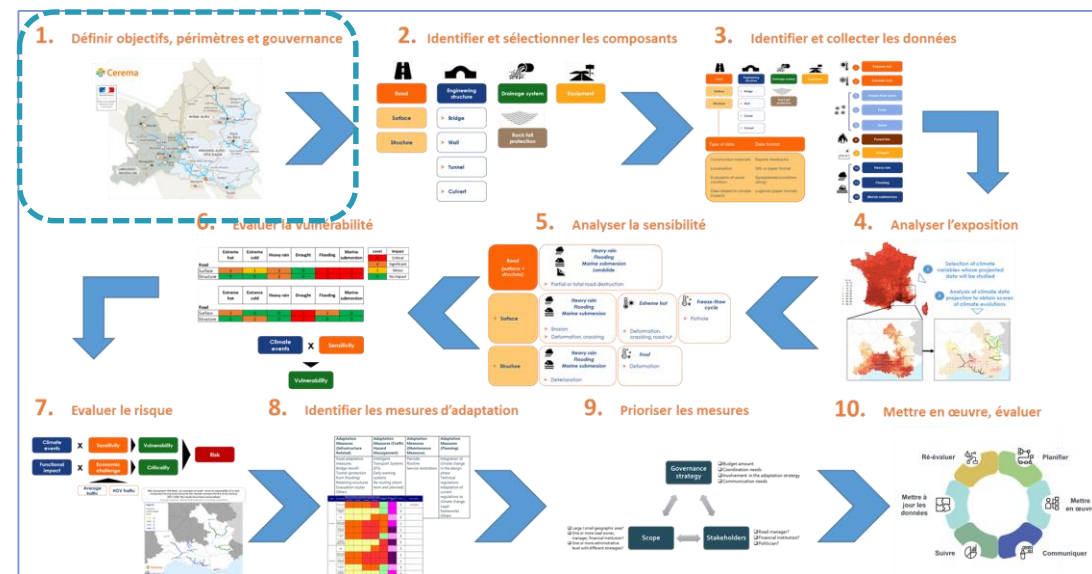
## 9. Prioriser les mesures



## 10. Mettre en œuvre, évaluer

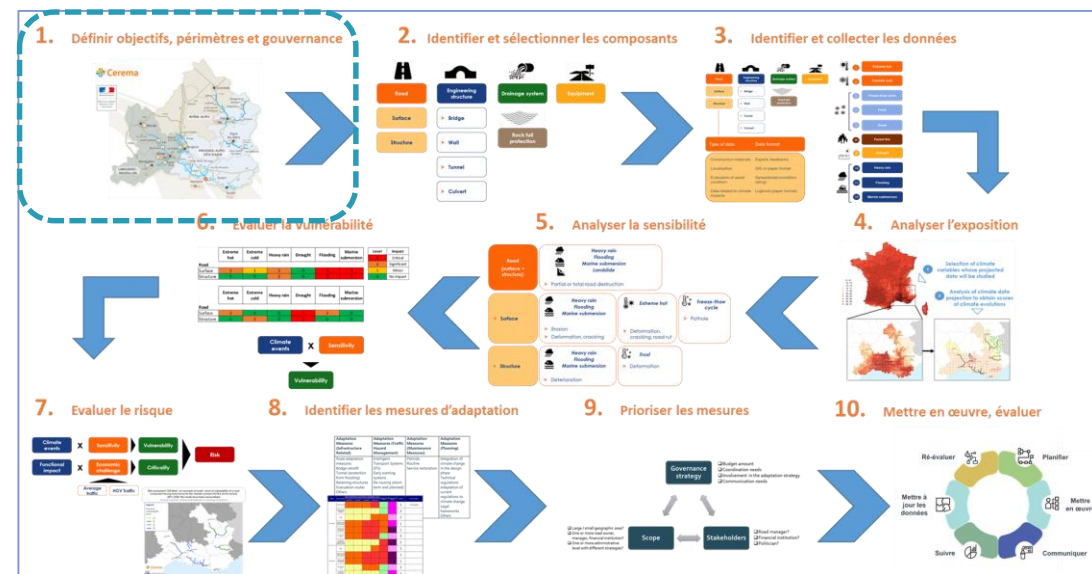


# Approche d'amélioration de la résilience au changement climatique

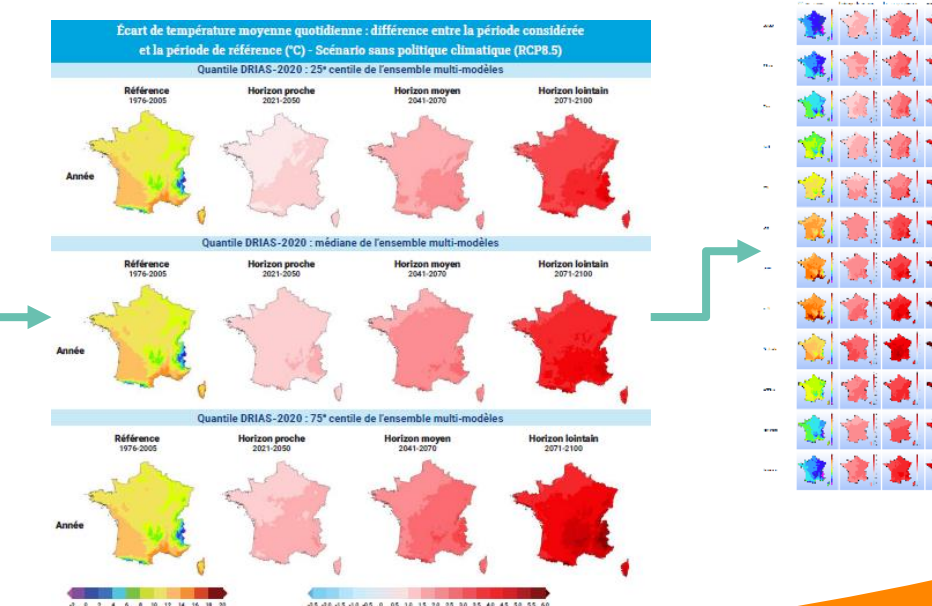
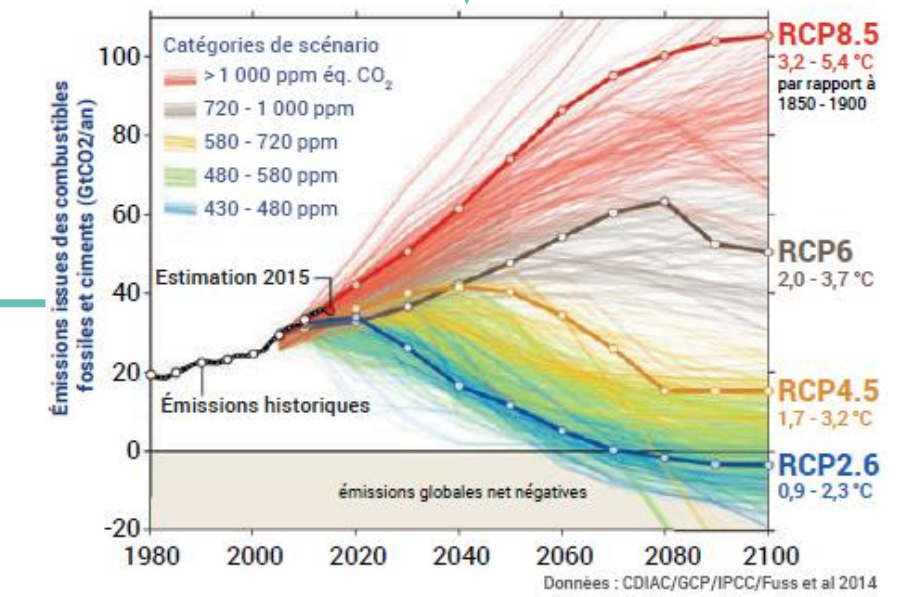
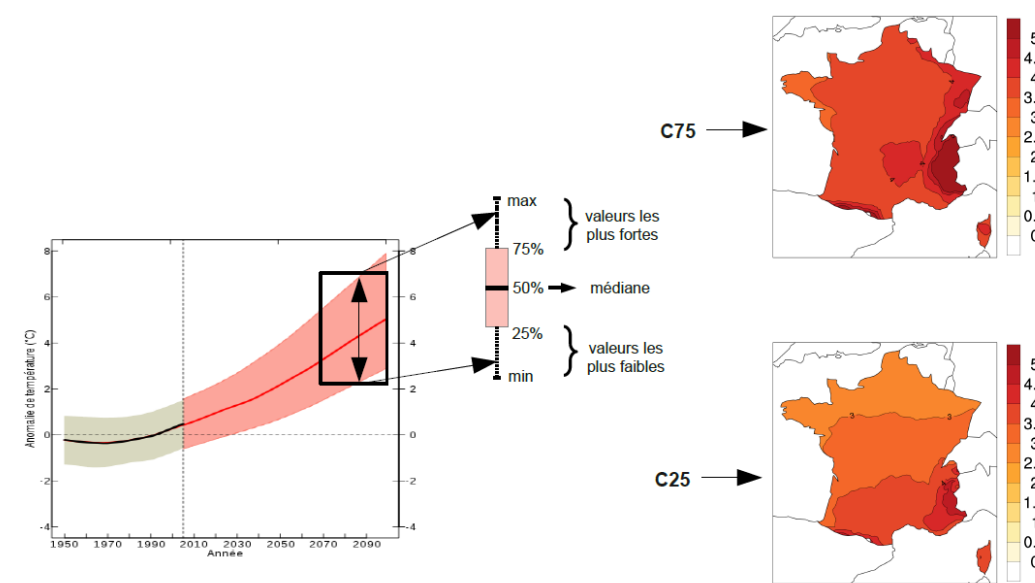
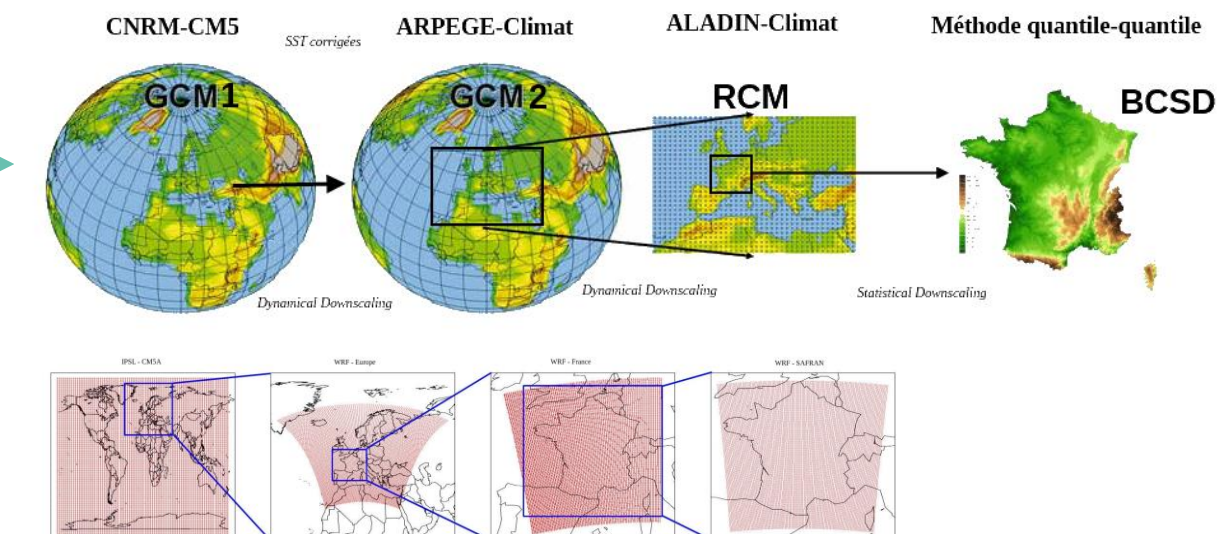




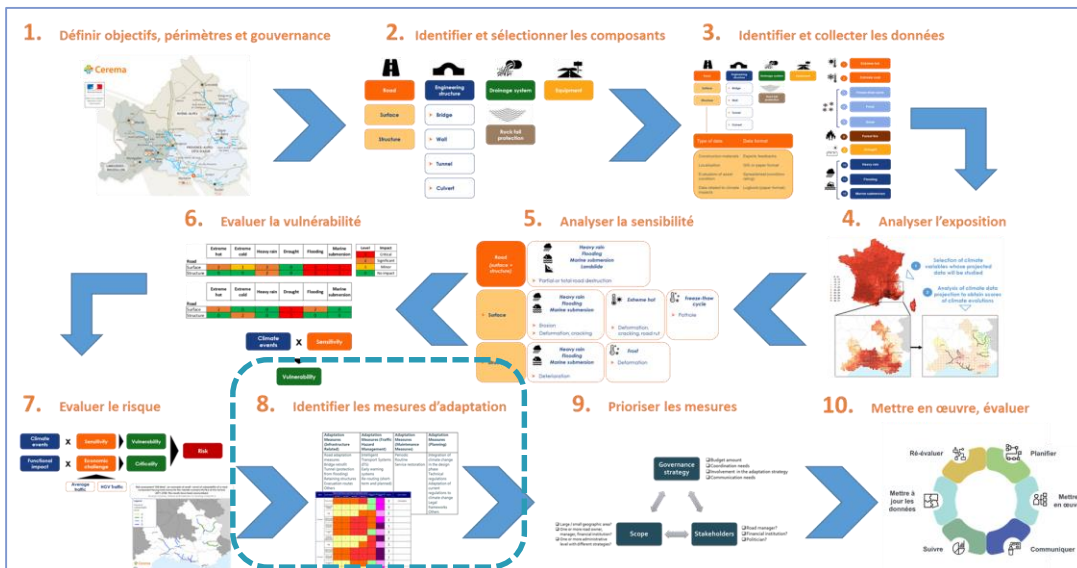
# Approche d'amélioration de la résilience au changement climatique



- Vent fort
- Régime de vent
- Températures élevées
- Grand froid
- Feux de forêt
- Biodiversité
- Sécheresse
- Fortes précipitations
- Brouillard
- Neige
- Grêle
- Orage, foudre
- Inondations par débordement de cours d'eau, ruissellement, remontée de nappe
- Etiage
- Glissement, chute de blocs, effondrement, RGA, érosion
- Coulée de boue, cavité souterraine
- Circulation des océans
- Changement de paramètre des eaux, submersions, régime de vagues et houle



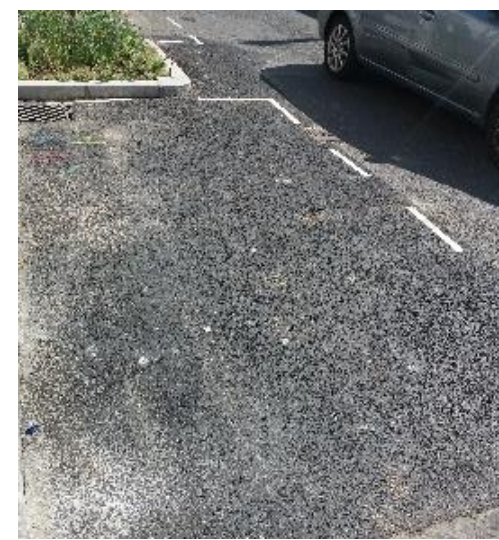
# Approche d'amélioration de la résilience au changement climatique



Adaptation Mesures (Infrastructure Related)	Adaptation Mesures (Traffic Hazard Management)	Adaptation Mesures (Maintenance Measures)	Adaptation Mesures (Planning)
Road adaptation measures Bridge retrofit Tunnel (protection from flooding) Retaining structures Evacuation routes Others	Intelligent Transport Systems (ITS) Early warning systems Re-routing (short-term and planned)	Periodic Routine Service restoration	Integration of climate change in the design phase Technical regulations Adaptation of current regulations to climate change Legal frameworks Others

Probleme	Impact attendu	Facteurs de risque	Impact des mesures	Impact des mesures	Impact des mesures
Probleme de stabilité des talus	Augmentation des risques de glissement de terrain	Augmentation des précipitations, élévation du niveau de la mer	Mettre en œuvre des mesures de stabilisation des talus	Amélioration de la stabilité des talus	Amélioration de la stabilité des talus
Probleme de déformation des ponts	Augmentation des risques de déformation des ponts	Augmentation des précipitations, élévation du niveau de la mer	Mettre en œuvre des mesures de renforcement des ponts	Amélioration de la résistance des ponts	Amélioration de la résistance des ponts
Probleme de submersion des routes	Augmentation des risques de submersion des routes	Augmentation des précipitations, élévation du niveau de la mer	Mettre en œuvre des mesures de drainage des routes	Amélioration de la capacité de drainage des routes	Amélioration de la capacité de drainage des routes

Solutions d'adaptation pour une section d'un grand réseau autoroutier du réseau routier national concédé.  
Source : Cerema



Ci-dessus  
Parking perméable et réservoir de stockage des eaux pluviales, Royaume-Uni (Londres).  
Photo : Cerema



Ci-contre  
Buses sur l'AA66, Royaume-Uni.  
Photo : Highway England

Adaptation du Grand Port Maritime de Bordeaux au changement climatique

AGIR SUR LES INFRASTRUCTURES EXISTANTES

AGIR SUR LA GOUVERNANCE

Stratégie d'adaptation du Grand Port Maritime de Bordeaux  
Source : Cerema

# Approche d'amélioration de la résilience au changement climatique

## De nombreuses études depuis près de 10 ans :

- Analyse de risque avec solutions d'adaptation sur **un axe ferroviaire complet**
- Analyse de risque avec stratégie de résilience de plusieurs **ports**, dont des Grands ports maritimes
- Analyse de risque du **réseau routier national d'une DIR** : réseau de 750 km de routes avec plus d'un millier d'ouvrages d'art
- Analyse de risque d'une section d'un **réseau autoroutier concédé**, avec stratégie d'adaptation
- **Analyse de risque du réseau d'une métropole** – réseaux : routier, transports ferroviaires/guidés, transports en commun, contexte urbain
- Analyse de risque à **échelle très locale** – 2 grands ponts français
- Intégration de l'adaptation au changement climatique des infrastructures des transport dans les **études d'impact** et **PCAET**
- Plusieurs autres analyses avec des échelles géographiques, des contextes climatiques et des types de réseaux de transport variés
- En cours :
  - adaptation des référentiels de gestion des infrastructures de transport (tous types),
  - application à d'autres infrastructures stratégiques (énergie, eau potable...)



# Approche d'amélioration de la résilience au changement climatique

## Le bénéficiaire



## Les objectifs

Evaluer l'exposition et les vulnérabilités actuelles et futures du réseau dans un contexte de changement climatique

- **Analyse des expositions actuelles et futures**
  - **Identification des données de projections climatiques** à analyser : sources, modèles, scénarios, horizons, périmètre
  - **Analyse de l'exposition projetée** pour différents scénarios climatiques et horizons : températures, précipitations, inondations, etc.
- **Analyse des sensibilités et vulnérabilités**
  - **Catégorisation des actifs** du réseau pour permettre l'étude des vulnérabilités : types de ponts, de chaussées, etc.
  - **Identification de fonctionnalités** du réseau
  - **Analyse des vulnérabilités actuelles** des actifs et des fonctionnalités de l'ensemble du réseau
  - **Estimation de l'évolution de ces vulnérabilités**

Pour :

- Toutes les infrastructures du réseau **750 km de routes, +1000 OA**
- Plusieurs fonctionnalités de desserte
- **12 aléas climatiques**



Sources : DIR Méditerranée



# Approche d'amélioration de la résilience au changement climatique

Le bénéficiaire



Les objectifs

Evaluer la vulnérabilité de l'Axe Seine au changement climatique et identifier des solutions d'adaptation



## ➤ Analyse des vulnérabilités (AMO Cerema)

- Identification et catégorisation des actifs ferroviaires, soit 12 types d'infrastructures décomposés en 72 catégories de composants
- Analyse des caractéristiques actuelles et futures de 12 familles d'aléas
- Analyse des sensibilités relatives des composants et infrastructures face aux aléas impactants

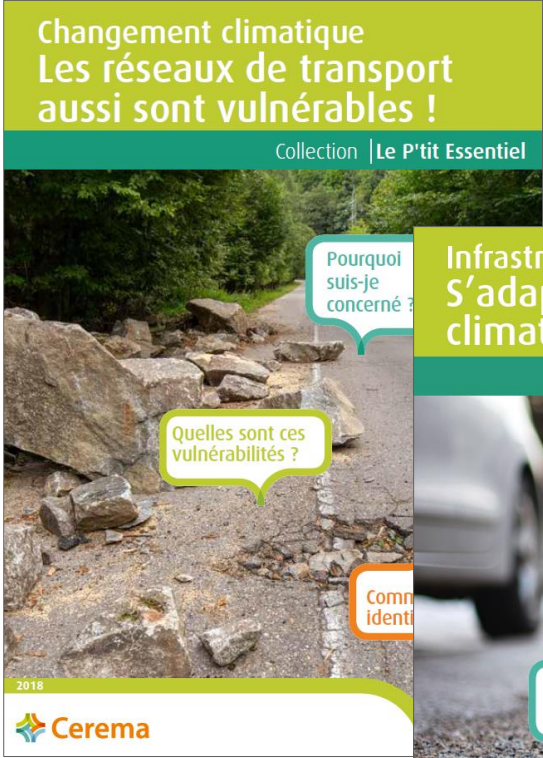
## ➤ Identification de solutions d'adaptation

## ➤ Prochaines étapes

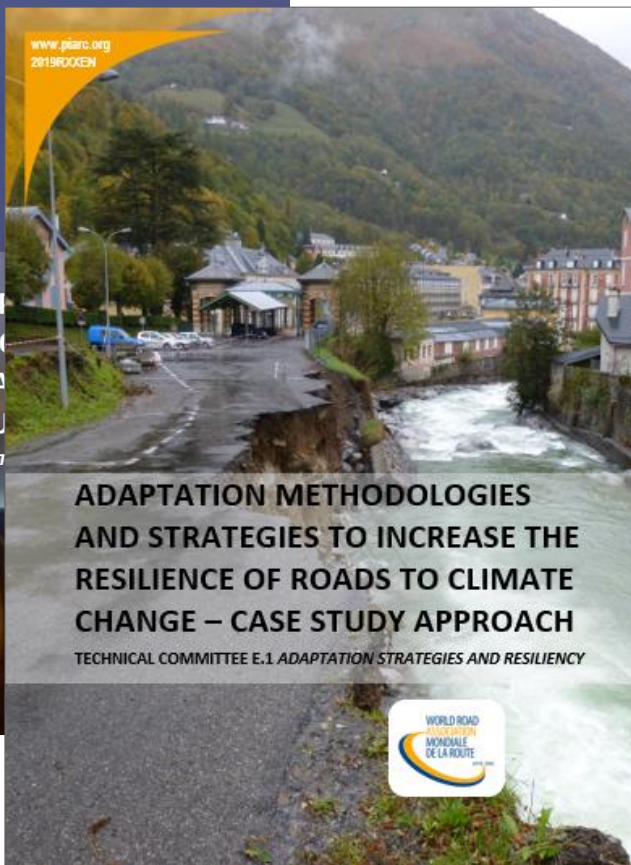
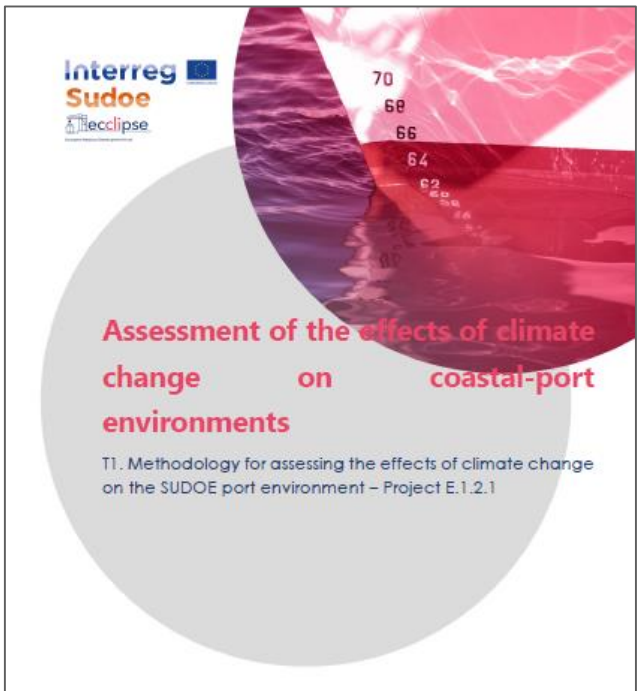
- Accompagnement en matière de **sensibilisation** interne à l'entreprise
- **Formation** au suivi des démarches de résilience
- **Identification d'axes** dont les vulnérabilités sont prioritaires à évaluer
- **Nouvelles analyses** de vulnérabilité envisagées



# Merci de votre attention !



**Contacts :**  
**Marie Colin**  
Référénte technique résilience des infrastructures et adaptation au changement climatique  
[marie.colin@cerema.fr](mailto:marie.colin@cerema.fr)  
**Fabien Palhol**  
Directeur de la recherche et de l'innovation – Cerema ITM  
[fabien.palhol@cerema.fr](mailto:fabien.palhol@cerema.fr)



[www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)  
[@CeremaCom](https://twitter.com/CeremaCom) / [@Cerema](https://www.linkedin.com/company/cerema)