

# SOLSCOPE

## Géotechnique et changement climatique

Présenté par

Isabelle Halfon (BRGM) et Sylvie Bretelle (ANTEA GROUP)

# Sommaire

1. Introduction sur le changement climatique
2. Le changement climatique et ses conséquences pour la géotechnique
3. Atténuation : comment diminuer les émissions ?
4. La géotechnique et les énergies renouvelables
5. Adaptation: quelles solutions pour les ouvrages géotechniques ?
6. Conclusions

# 1 – Introduction sur le changement climatique

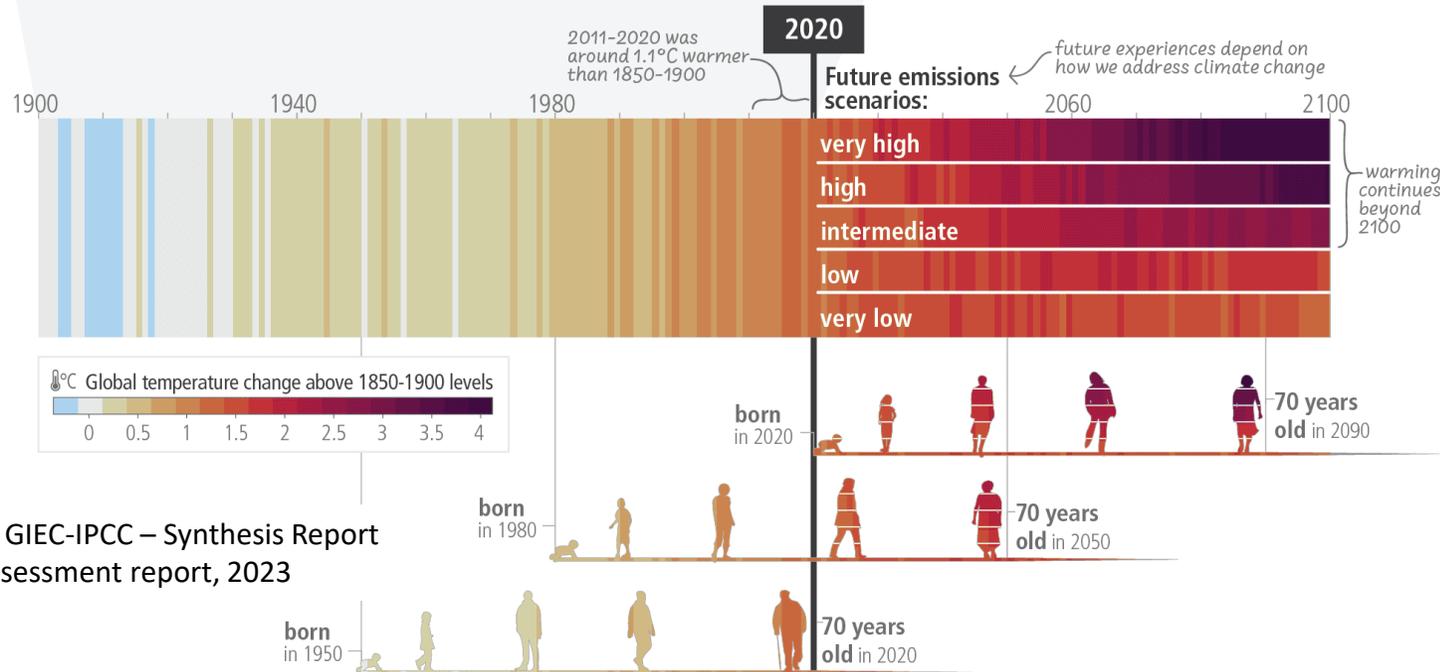


Source GIEC-IPCC, 2019

# Evolution du climat

Evolution du climat observée sur une très courte période (150 ans), sans équivalent à l'échelle humaine

c) The extent to which current and future generations will experience a hotter and different world depends on choices now and in the near-term



Source GIEC-IPCC – Synthesis Report – 6h assessment report, 2023

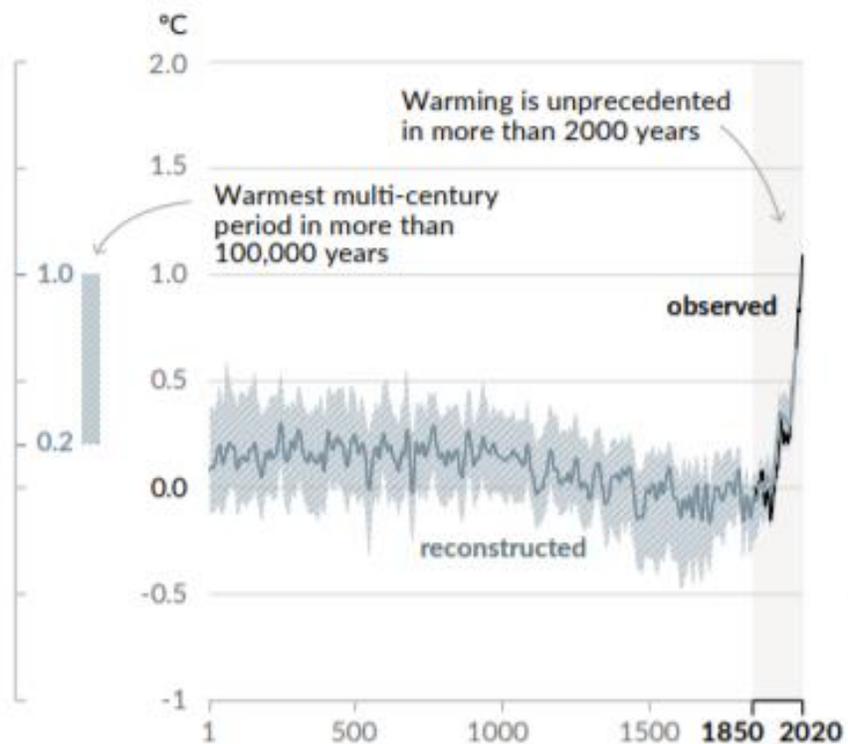
*Augmentation globale de la température : **+1,1°C en 2020** par rapport à 1850/1900*

*Projections horizon 2100 : **+1,5 à +4°C**, selon les scénarios d'émission*

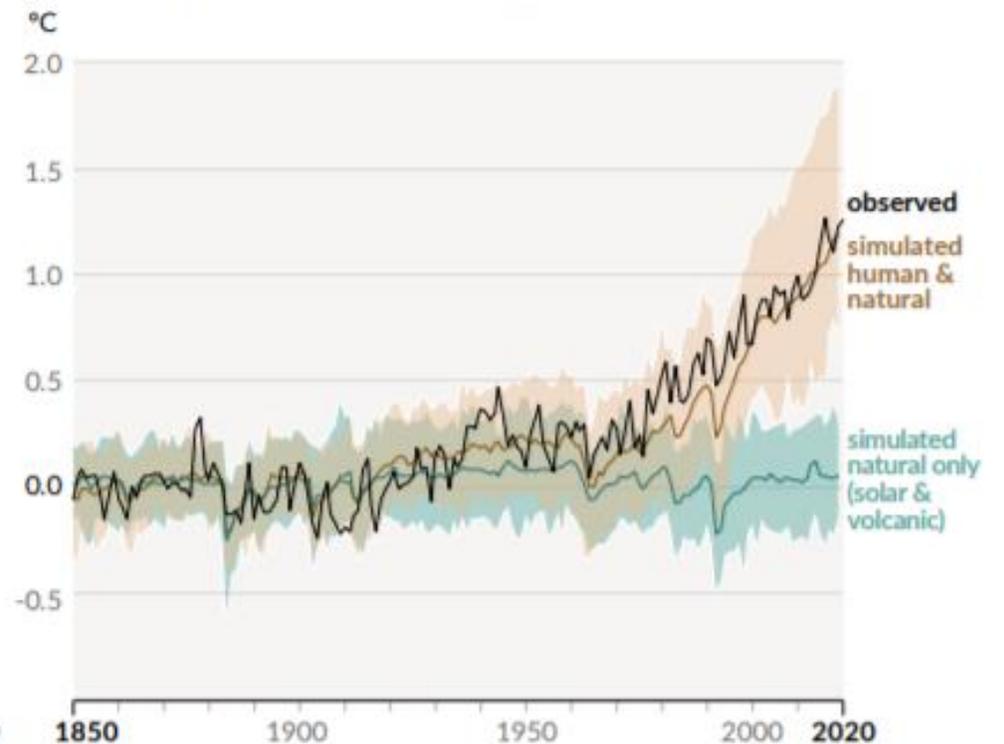
# Causé par les émissions humaines de GES

**GES** (gaz à effet de serre)  
depuis le début de la période industrielle

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and **observed** (1850-2020)

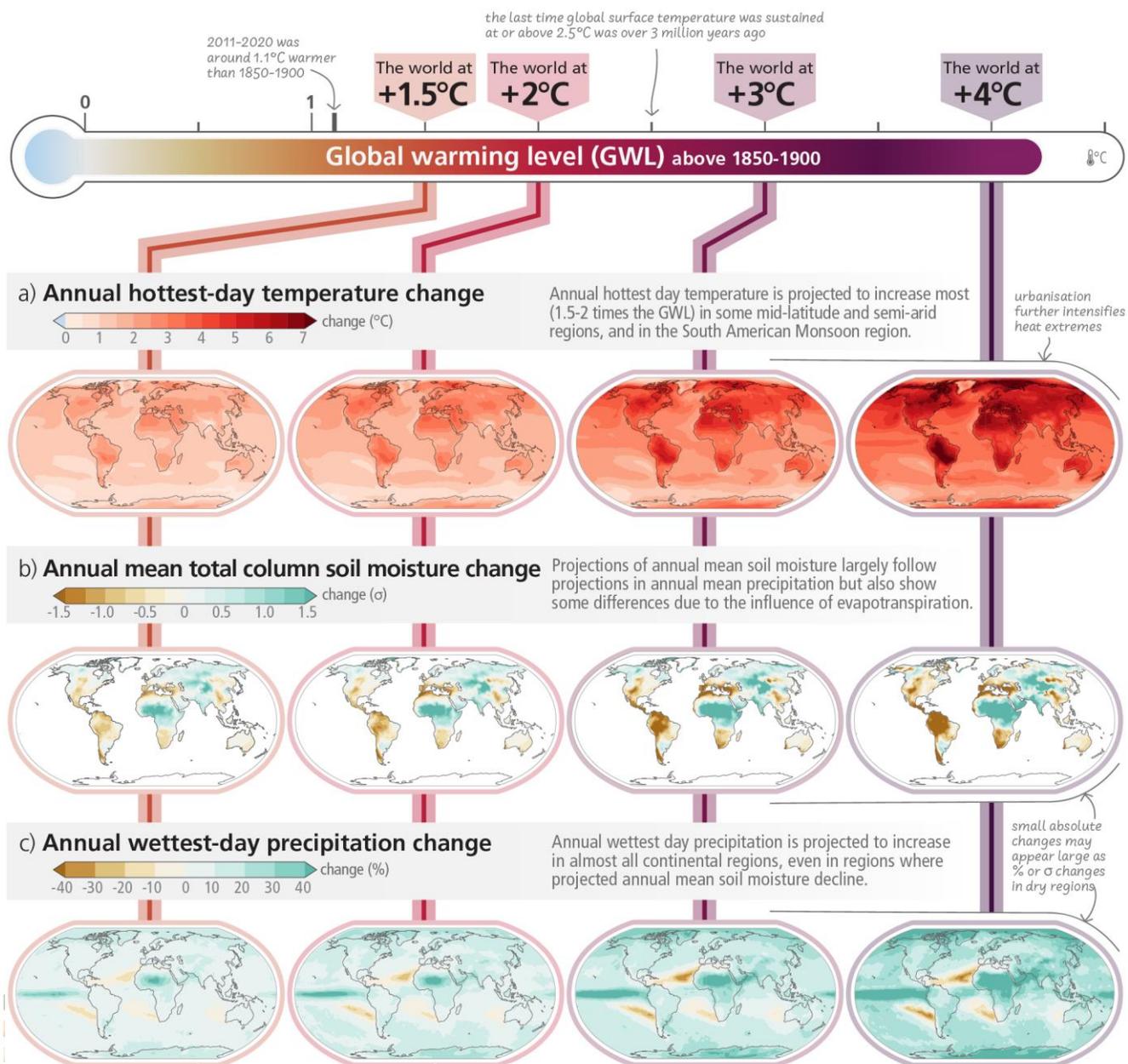


b) Change in global surface temperature (annual average) as **observed** and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850-2020)



GIEC – WG1 – July 2021

With every increment of global warming, regional changes in mean climate and extremes become more widespread and pronounced



# Les principaux impacts directs

**Augmentation des températures moyennes et maximales**  
 Forts écarts régionaux

**Modification de l'humidité des sols**  
 Fortes variations régionales

**Modification des précipitations, notamment extrêmes**  
 Fortes variations régionales

# Nombreux impacts indirects ou en cascade

Notamment :

Fonte des glaciers et calottes polaires

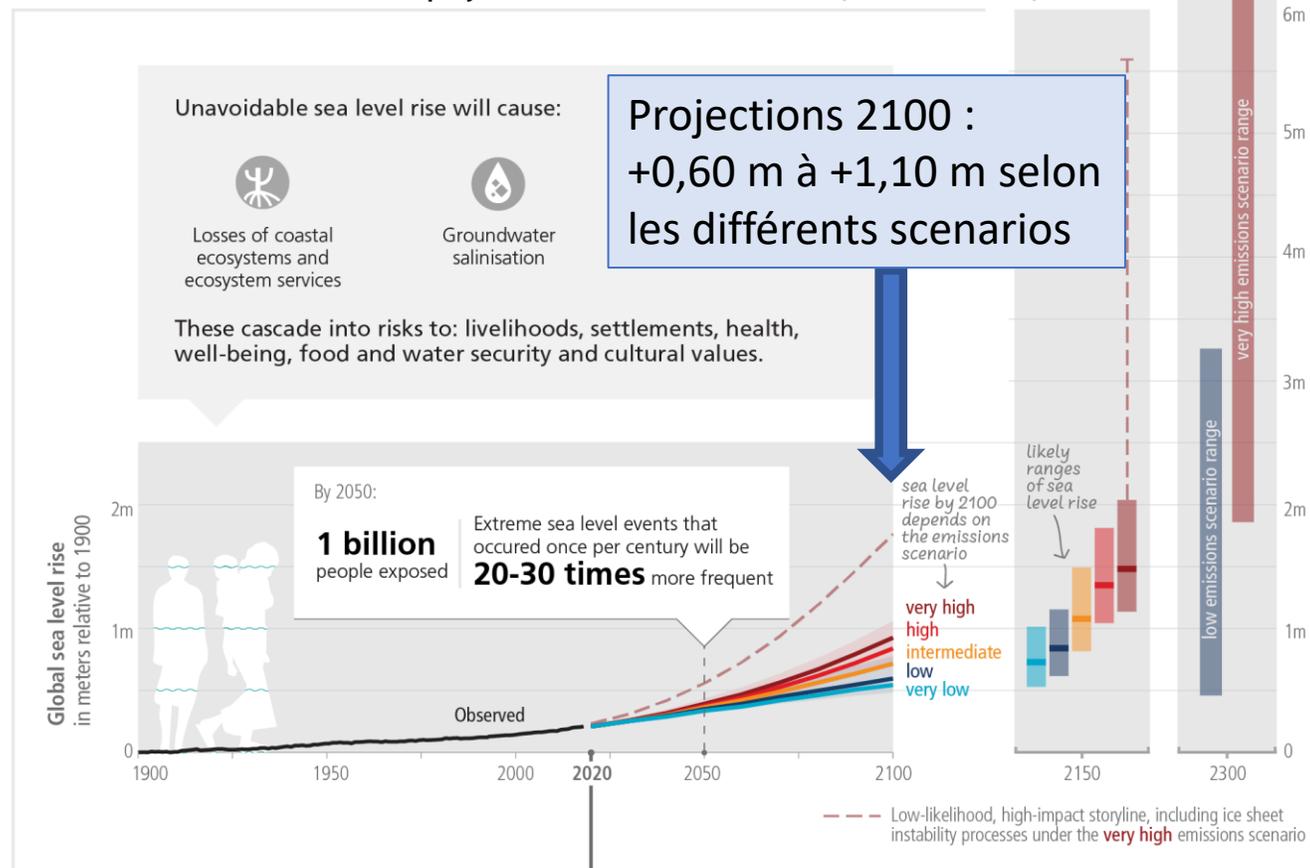
=> élévation du niveau de la mer

## Remarque :

- cette élévation se poursuivra pendant des siècles même dans les scénarios les plus optimistes

Sea level rise will continue for millennia, but how fast and how much depends on future emissions

a) Sea level rise: observations and projections 2020-2100, 2150, 2300 (relative to 1900)



Sea level rise greater than 15m cannot be ruled out with very high emissions

# 2 - Le changement climatique et ses conséquences pour la géotechnique

Elévation du niveau de la mer, tempêtes

=> **érosion littorale, submersions**

Vague de chaleur

=> **sècheresses**

Feux de forêts, assèchement des sols, précipitations extrêmes

=> **ruissellement, érosion des sols**

=> **inondations**

Tempête Xynthia, la Faute-sur-mer, 2010



Feu de forêt, Cernon (39) – 08/2022 © BRGM



Assèchement des sols

# Les risques naturels et l'augmentation d'aléas

Augmentation du niveau d'aléa ou de l'emprise des aléas

- ⇒ **Retrait-gonflement des argiles**
- ⇒ **Mouvements de terrain :**  
glissements, coulées de boue, chutes de blocs, éboulements
- ⇒ **Effondrements de cavités souterraines**
- ⇒ **Recul du trait de côte**



Fissures dues au RGA – © AQC, 2022



Effondrements au droit d'une ancienne carrière souterraine à Gidy © BRGM 2016



Immeuble Le Signal – Soulac-sur-mer (33)-© BRGM



Route du Littoral – La Réunion – 2016 – © BRGM

# Le GT Géotechnique, changement climatique et développement durable

- Le **CFMS a initié un groupe de travail** sur le sujet qui réunit les acteurs de la profession.
- Le changement climatique a des effets sur les métiers géotechniques sous deux angles:
  - **Atténuation** : la **réduction** des émissions (thème du sous groupe 1 du GT CFMS);
  - **Adaptation** aux changements climatiques (thème du sous groupe 2 du GT CFMS).



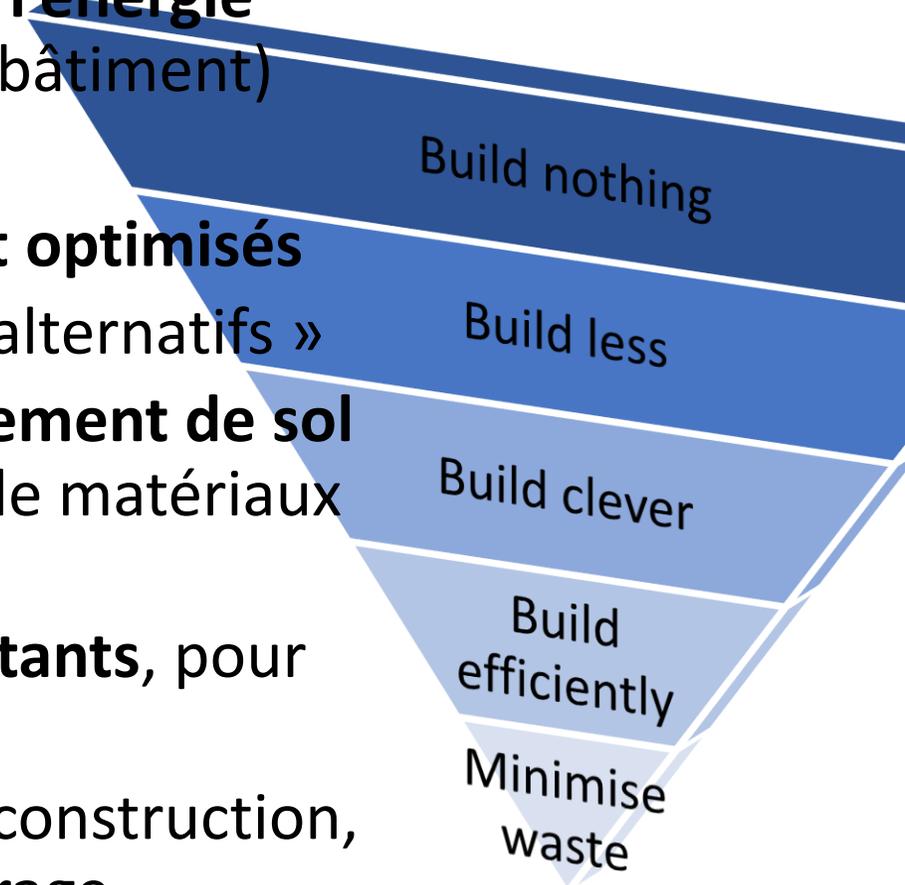
# Diminuer les émissions, c'est d'abord savoir les connaître, les évaluer, les comparer

- **Méthode ACV – Analyse du Cycle de Vie** : « quantifie les impacts environnementaux potentiels causés par un produit, un service ou une décision tout au long de son cycle de vie » - multi-factoriel
- **Bilan carbone - Eco-comparateurs** :
  - Inventaire des sources d'émission : matériaux, transport, engins de chantier, etc.
  - $CO_2 \text{ émis} = (\text{Quantité composant}) \times FE \text{ (facteur d'émission)}$
  - Bases de données des FE
- **Intérêt de l'évaluation des émissions GES** : mise en évidence des postes à fortes émissions : ciment, acier, transport, ...

=> cf. présentation de Myriam Saadé à 14h30

# Les leviers géotechniques pour atténuer les émissions

- Concevoir des ouvrages qui permettent de **produire de l'énergie moins émettrice** ou qui consomment moins d'énergie (bâtiment)
- Qualité / quantité des reconnaissances géotechniques
- Construire avec des **méthodes et un dimensionnement optimisés**
- Construire avec des **matériaux issus du recyclage** ou « alternatifs »
- Utiliser plus fréquemment **l'amélioration ou le renforcement de sol** plutôt que les pieux/l'acier, pour limiter les transports de matériaux et la fabrication au bilan carbone élevé
- Améliorer **l'entretien / maintenance des ouvrages existants**, pour prolonger leur durée de service
- Prévoir dès la conception la **fin de vie de l'ouvrage** : déconstruction, possibilité de recyclage des matériaux composant l'ouvrage



# Les matériaux de construction innovants

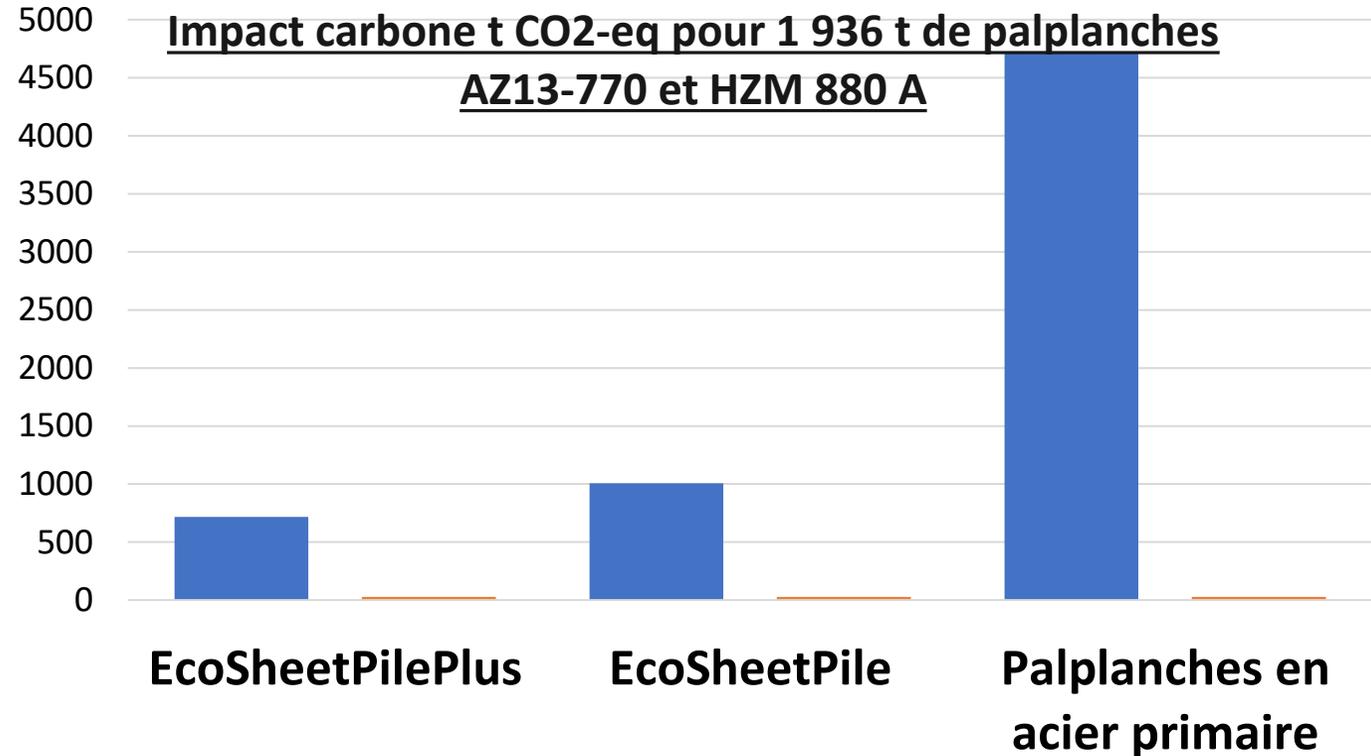
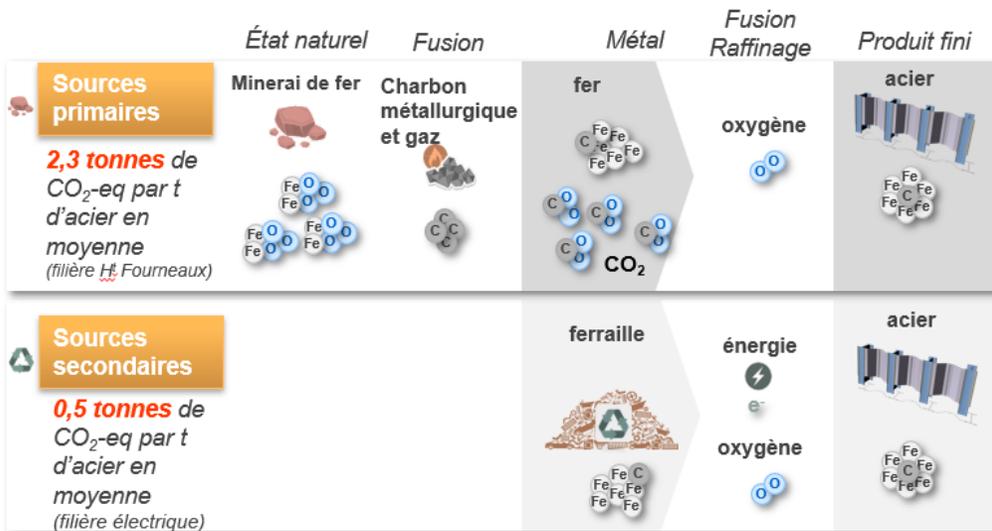
## Exemple **Biocalcis**:

- Ecotechnologie innovante imite les processus naturels de calcification
- Cimentier le sol en place sans ciment
- Domaine application: lutte contre la liquéfaction, contrôler les phénomènes d'érosion interne
- procédé durable, efficace, non intrusif, qui permet de traiter les points singuliers.
- [933 Sols&Fondations Web.pdf \(soletanche-bachy.com\)](#)



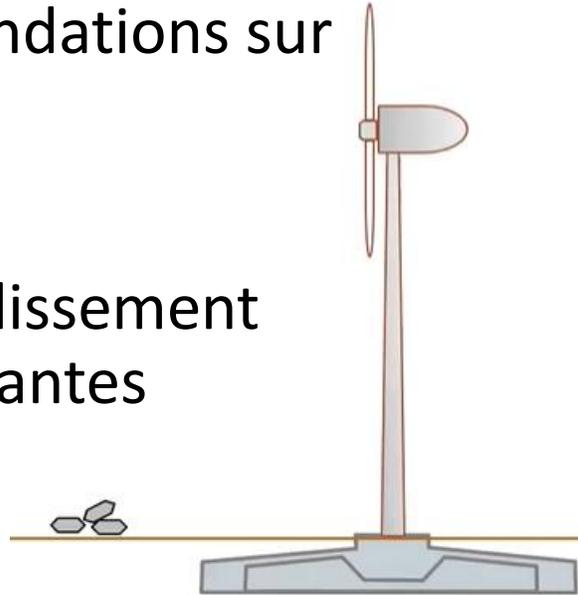
# Les matériaux de construction issus du recyclage

- Acier (source Arcelor)



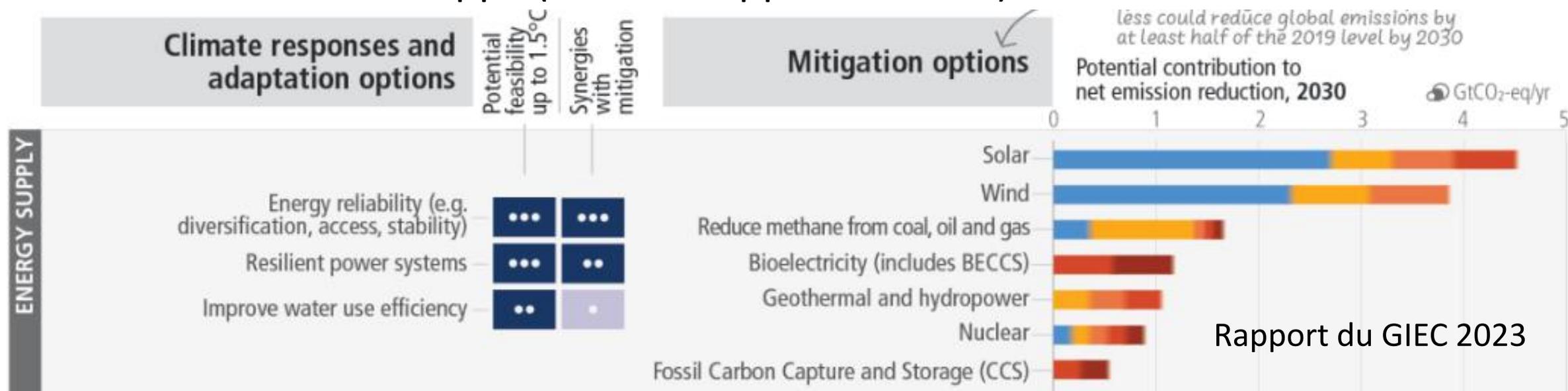
# Concevoir des fondations optimisées

- Concevoir les fondations d'éoliennes (ASIRI+, tache 5)
- Optimisation des fondations sur sol amélioré
- Réutilisation/agrandissement des fondations existantes



# 4 – Géotechnique et énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ont un fort potentiel de réduction des émissions, insuffisamment développé (selon le rapport du GIEC)



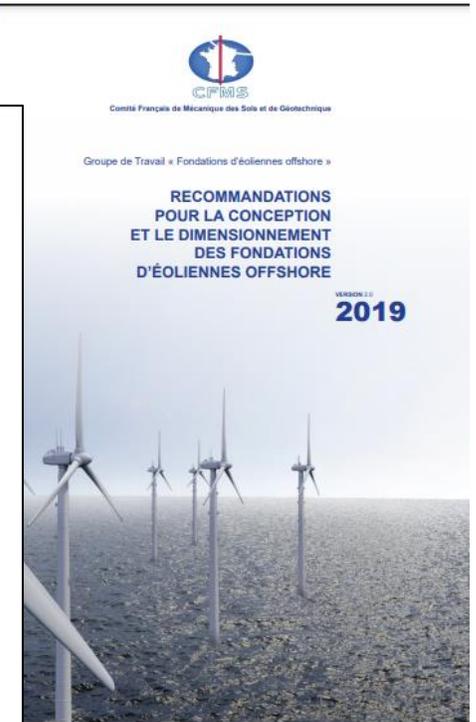
# Implication des géotechniciens dans la conception d'ouvrages de production d'énergie renouvelable

- Éoliennes terrestres et offshore
- Panneaux photovoltaïques
- Géothermies
- Hydro-électricité

⇒ connaître ces ouvrages et leurs spécificités

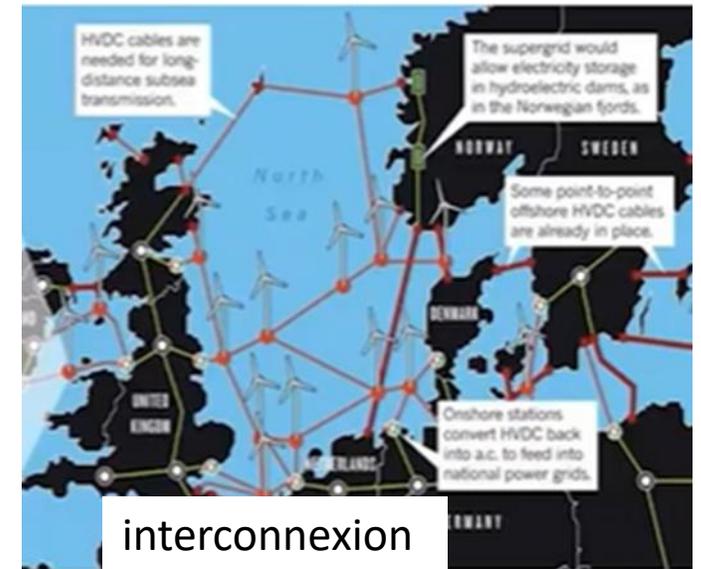
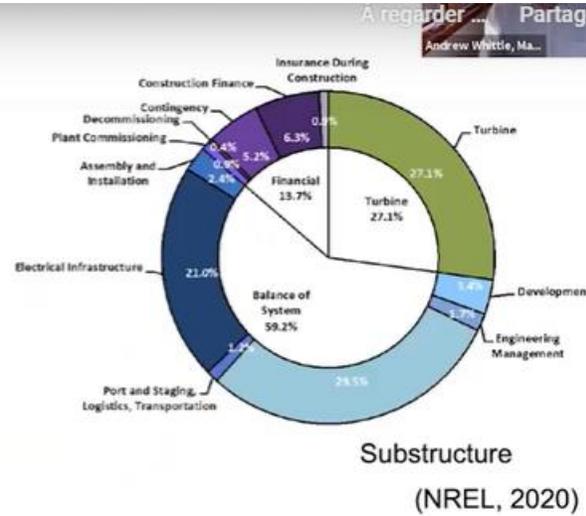
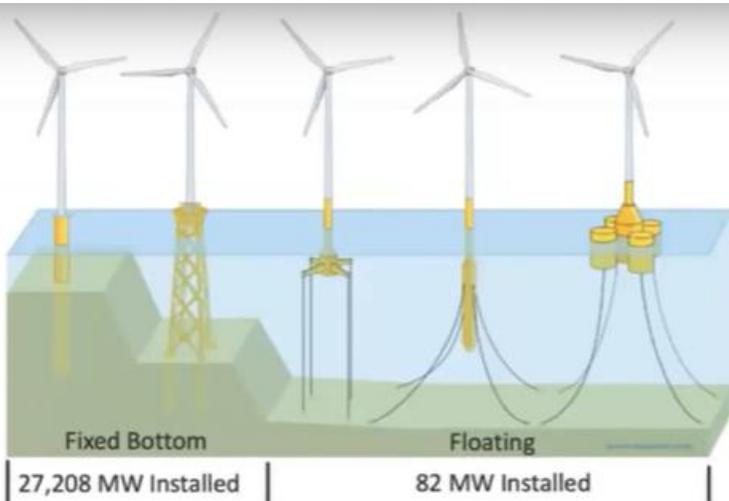
⇒ savoir les dimensionner

⇒ disposer de référentiels / guides



# Eoliennes offshore

- Challenge géotechnique (fondations des éoliennes flottantes plus complexes) fondations > 30% coût
- Potentiel pas encore assez exploité mais des idées ...  
Recommandations en préparation sur les fondations des éoliennes flottantes  
(GT CFMS)



# Panneaux photovoltaïques

- GT fondation panneaux photovoltaïques
- Fondations multiples (centaines) avec des faibles charges
- Fort potentiel d'optimisation et réduction d'impact



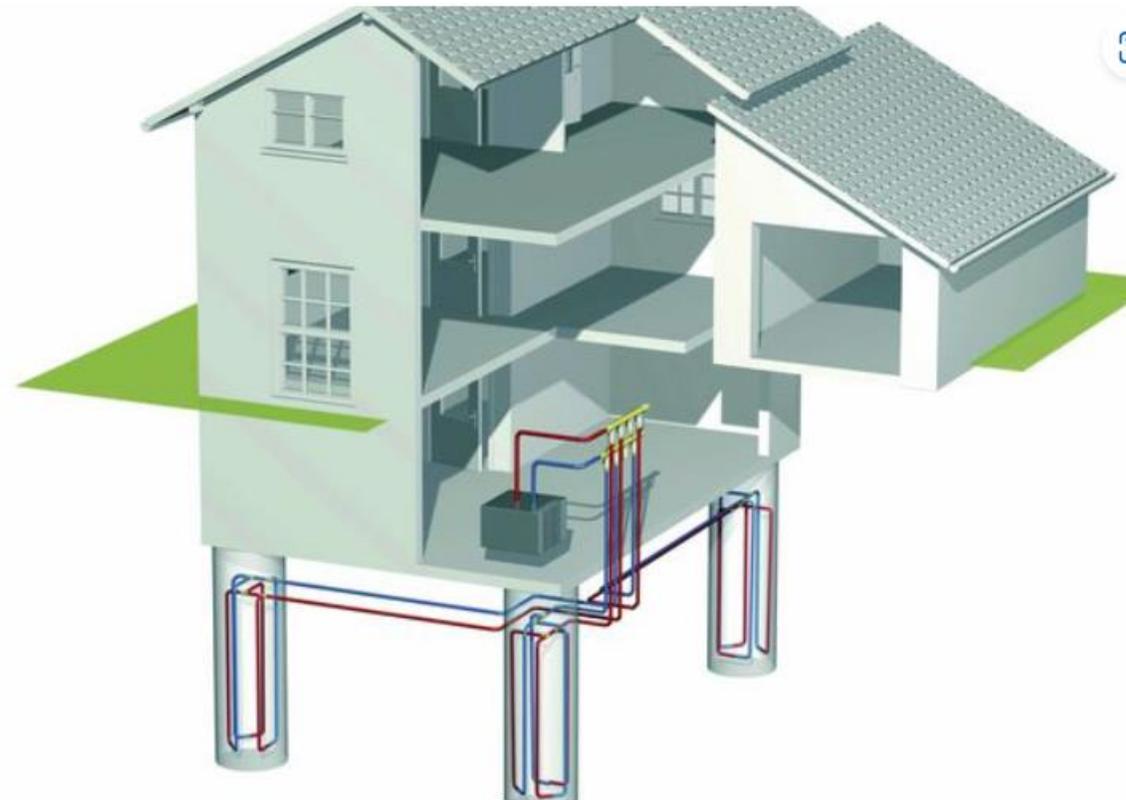
# Développer la (les) géothermie(s) : Utiliser la chaleur du sol et sous-sol

## Différents types de géothermie:

- Fondations et structures géothermiques
- Géothermie de minime importance (0-200m)
- Géothermie profonde

## Fondations et structures géothermiques:

- Capter l'énergie géothermique par les fondations
- TRT : test réponse thermique
- Recommandations Syntec + SOFFONS + CFMS



# La GMI (géothermie de minime importance)

GMI - Géothermie de minime importance (ou de très basse température)

0 - 200 m

## Les installations en boucle fermée

Le régime de la géothermie de minime importance s'applique aux installations sur échangeurs géothermiques fermés :

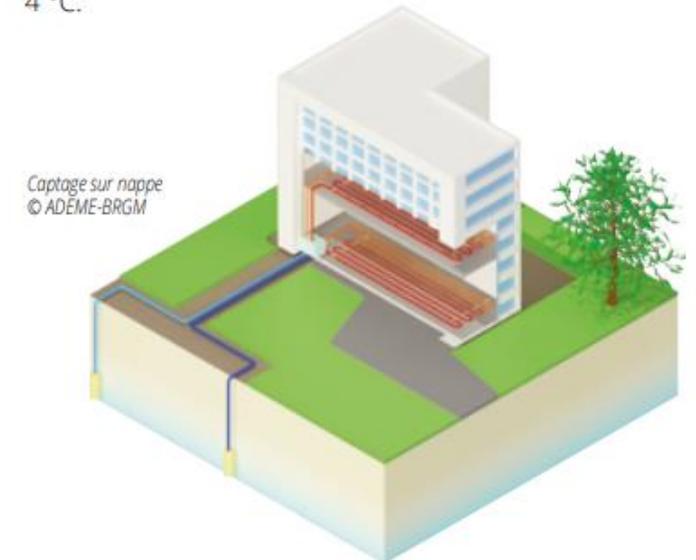
- d'une profondeur comprise entre 10 et 200 mètres ;
- d'une puissance thermique prélevée dans le sous-sol qui ne dépasse pas 500 kW ;
- dont la température du fluide caloporteur qui retourne vers les échangeurs géothermiques fermés est comprise entre - 3 °C et + 40 °C.



## Les installations en boucle ouverte

Pour les systèmes sur nappes (en boucle ouverte), l'installation doit répondre aux critères suivants :

- une profondeur comprise entre 10 et 200 mètres ;
- une puissance thermique prélevée dans le sous-sol qui ne dépasse pas 500 kW ;
- la température de l'eau prélevée doit être inférieure à 25 °C ;
- les eaux prélevées doivent être réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes prélevés et réinjectés doit être nulle ;
- la température maximale de réinjection ne doit pas dépasser 32 °C ;
- les débits pompés doivent être inférieurs à 80 m<sup>3</sup>/h ;
- la variation de la température induite dans la nappe dans un rayon de 200 mètres doit être inférieure à 4 °C.



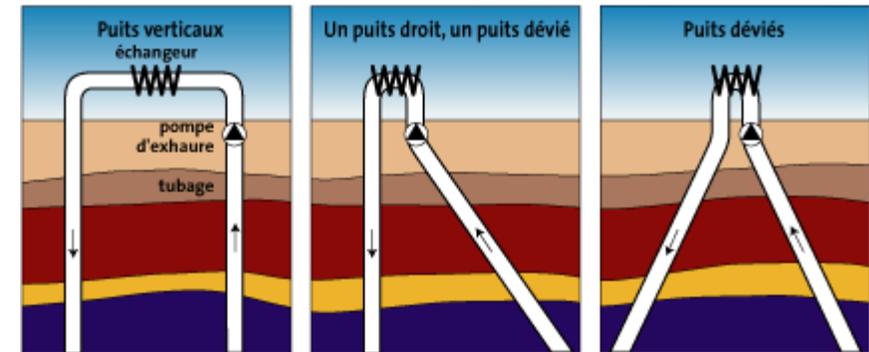
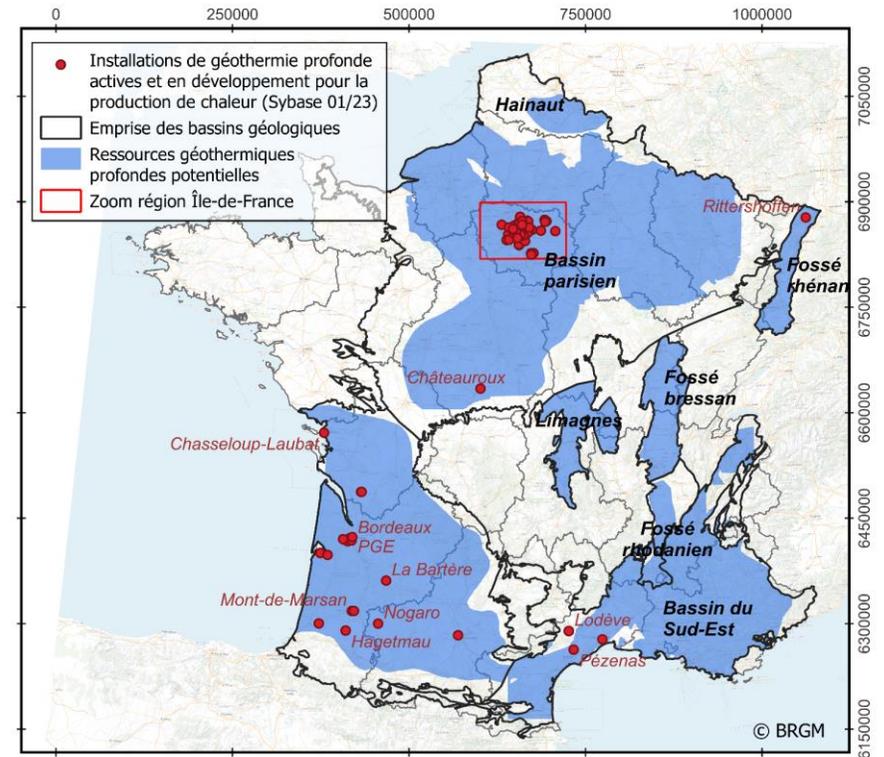
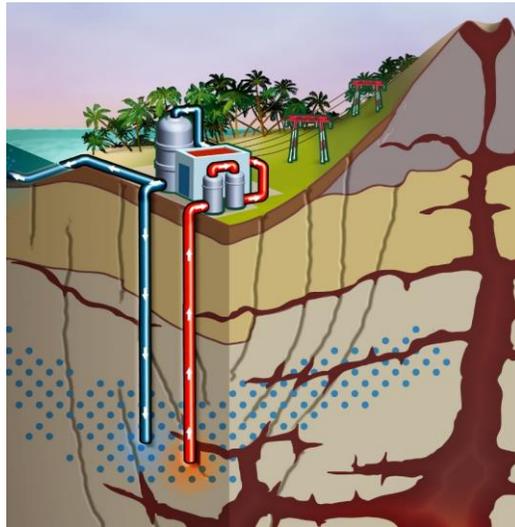
# Géothermie profonde

Géothermie  
profonde à  
développer

> 200 m  
(en général  
500m à 3000m)

- dans les aquifères profonds pour un usage direct en réseau de chaleur notamment ;
- dans les zones volcaniques pour la production d'électricité ;
- dans les fossés d'effondrement pour la production d'électricité et/ou de chaleur par cogénération

Bouillante (Guadeloupe)  
Centrale thermique  
© BRGM



Captage par doublet de forage © BRGM

# 5 – Adaptation : quelles solutions pour les ouvrages géotechniques ?

Une conception géotechnique en vue de réduire l'impact carbone et environnemental des projets :

- Modèle géotechnique adapté, risques « géo » bien évalués,
- Optimisation des ouvrages (c'est le point le plus important),
- Application nuancée des règlements impliquant des traitements d'injections lourds : par exemple le DLE (dossier loi sur l'eau) déclaratif avec faible débit, ou les injections systématiques de traitement des dissolutions du gypse
- Techniques plus vertes (géostructures, amélioration des sols) – attention, une solution technique a priori « bas carbone » n'est réellement intéressante que si elle a la même durée de vie et ne nécessite pas de réparation en cours de vie (d'où la nécessité d'une approche ACV plutôt qu'une étude de type bilan carbone sur les matériaux de construction).

# Ouvrages les plus impactés / exposés

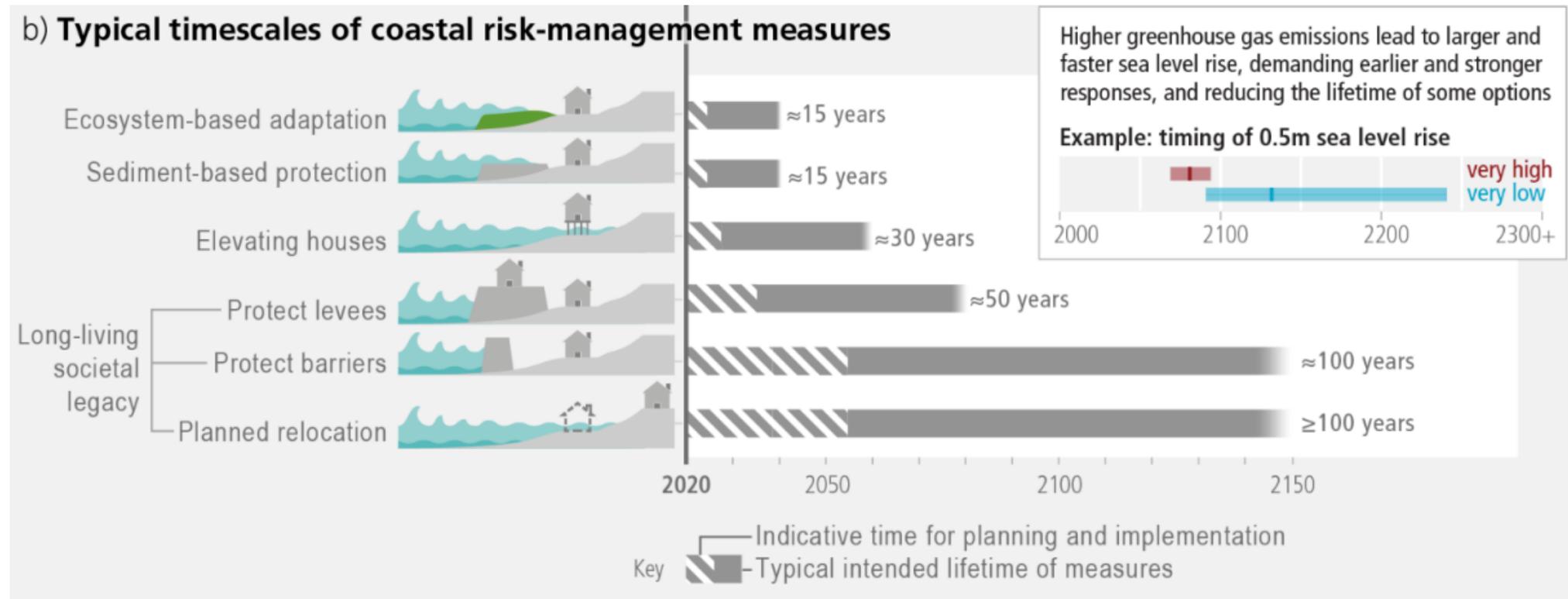
- Maisons individuelles (sècheresses)
- Ouvrages maritimes (élévation niveau de la mer, submersion)
- Pentes naturelles rocheuses ou sols meubles (précipitations extrêmes, feux de forêt, glissements de terrain, éboulements, coulées de boue, ...)
- Ouvrages linéaires (routes, autoroutes)
- Ouvrages en terre, digues (assèchement des sols, érosion, inondations)
- Ouvrages fluviaux et fondations des ouvrages en rivière (précipitations extrêmes, crues)

# Les sollicitations climatiques dans les normes

- **Questions en suspens** : évolution des règles de calcul ? quelles sollicitations climatiques considérer à l'avenir ?
- Intérêt des **études de sensibilité** à ces sollicitations

# Adaptation à l'évolution du niveau de la mer

- Les solutions envisageables



# Exemples de solutions d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer



# 6 – Conclusions

- **Le géotechnicien est un acteur dans le développement durable** (il peut agir sur l'atténuation et l'adaptation)
- **L'évaluation des émissions GES devient un critère de conception** : se l'approprier, l'expérimenter, le comprendre pour connaître les leviers d'optimisation
- **Innovation et utilisation de matériaux bas carbone et recyclés** : les connaître pour savoir les préconiser, rechercher des solutions locales
- **Implication dans la conception d'ouvrages de production d'énergie renouvelable**
- **Adaptation** : Tous les ouvrages géotechniques sont concernés
- **Evolution de la réglementation** : prise en compte des effets, nouveaux matériaux : temps long et va au-delà de la géotechnique
- **Nécessité de formation des géotechniciens** aux enjeux et solutions

# Ressources

- **IPCC** The Intergovernmental Panel on Climate Change – Rapports du GIEC : <https://www.ipcc.ch/>
- **DRIAS** Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement : projections climatiques : <http://www.drias-climat.fr/>
- [Responding to Climate Change Through Geotechnical Engineering Research | National Academies](#)
- [A Review of Carbon Footprint Reduction in Construction Industry, from Design to Operation - PMC \(nih.gov\)](#)
- <https://www.nzgs.org/libraries/climate-change-sustainable-development-and-geotechnical-engineering-a-new-zealand-framework-for-improvement/>
- [Géothermies | le site d'information sur les géothermies de l'ADEME et du BRGM \(geothermies.fr\)](#)