

## Transitions énergétiques: enjeux, verrous, défis

*Colloque de lancement du Laboratoire Inspirons Demain sur l'énergie*

# Energies renouvelables

*Betty Semail, Hussein Mroueh, Xavier Guillaud, Olivier Averbuch, François Schmitt, Fabien GRAVELEAU*

- ✓ **Les énergies renouvelables** sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation (définition ONU)



Energie  
solaire



Energie  
éolienne



Energie  
géothermique



Energie  
marine



Bioénergie

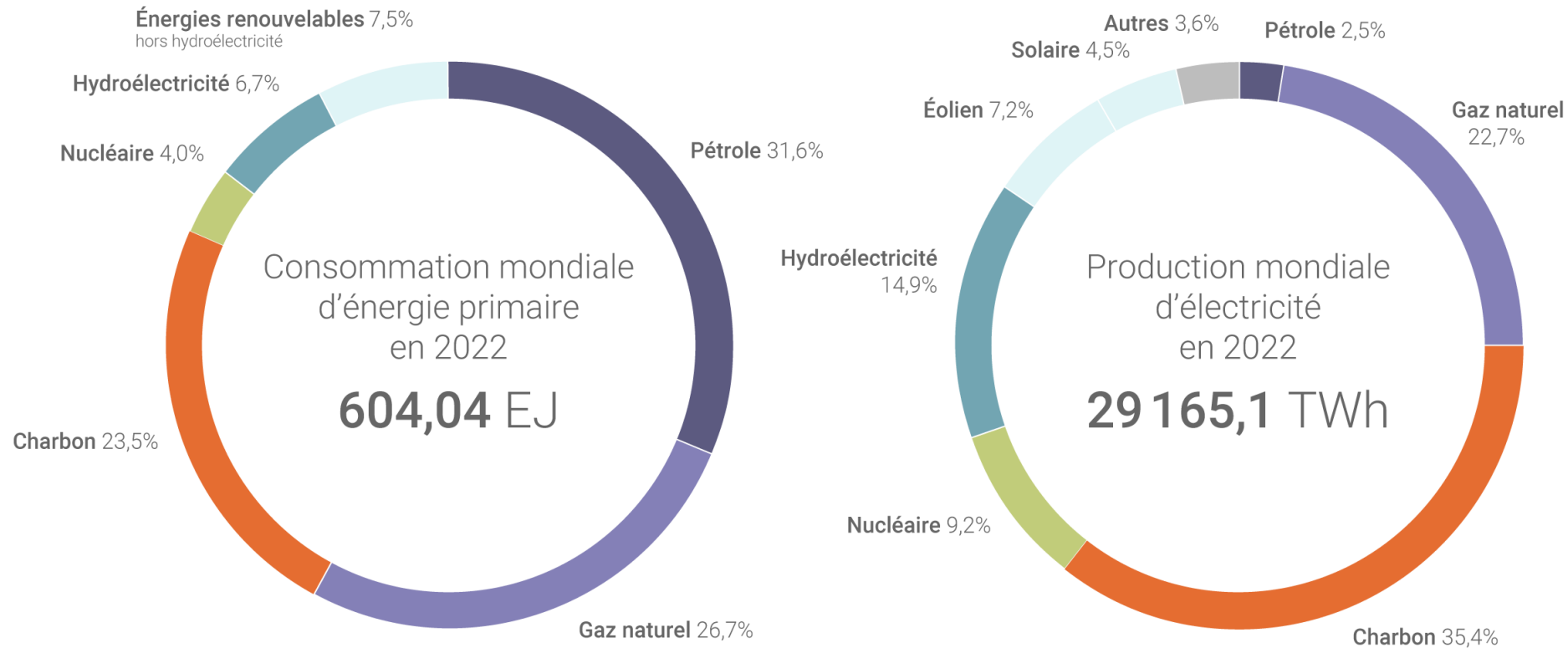


Hydro-  
électricité

Source: Nations Unies action climat

## ✓ Le mix énergétique mondial et le mix électrique versus les ENR

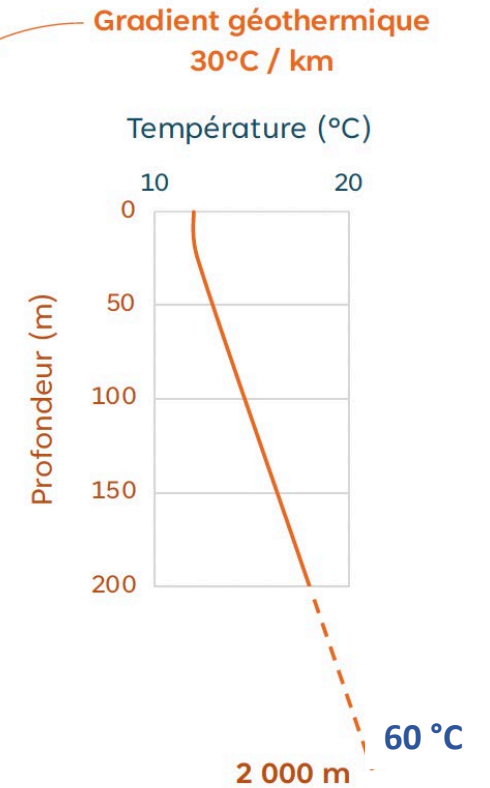
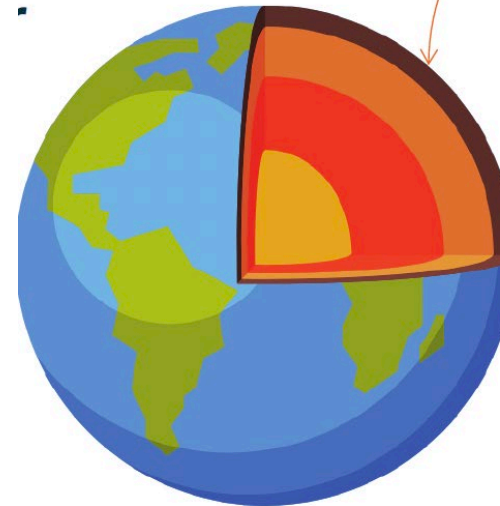
**Monde** La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2022





✓ **La géothermie:** une énergie renouvelable valorisant l'énergie emmagasinée sous forme de chaleur à l'intérieur de la Terre

✓ **99% de la masse de la Terre est à une température de plus de 1000°C**



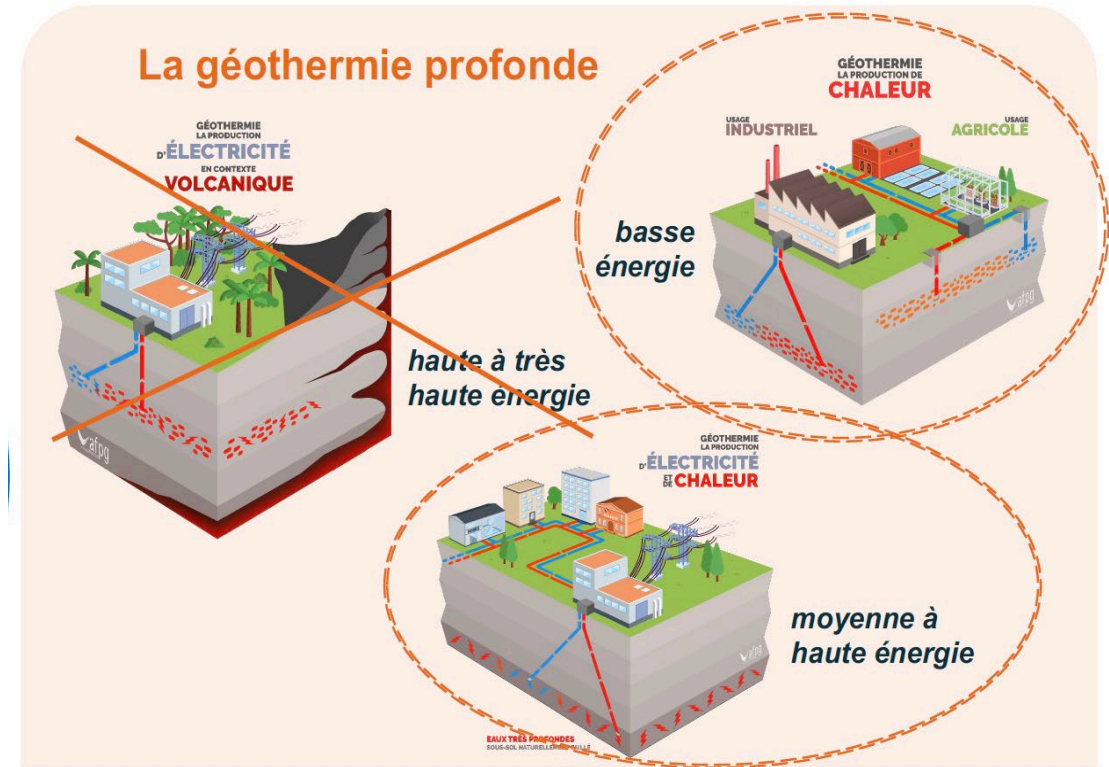
(A. Pommart, AFGP, Réunion Géothermie profonde ULille, 22 février 2024)

## ✓ La géothermie de surface versus la géothermie profonde



Passage par  
une pompe  
à chaleur

- Température entre 10°C et 30°C
- Profondeur entre 0 et 200m

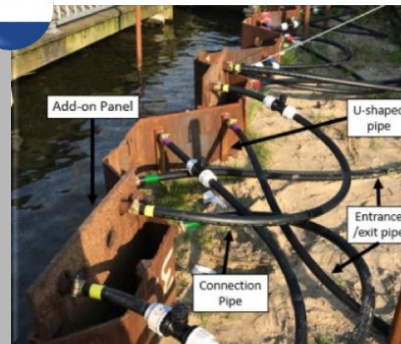
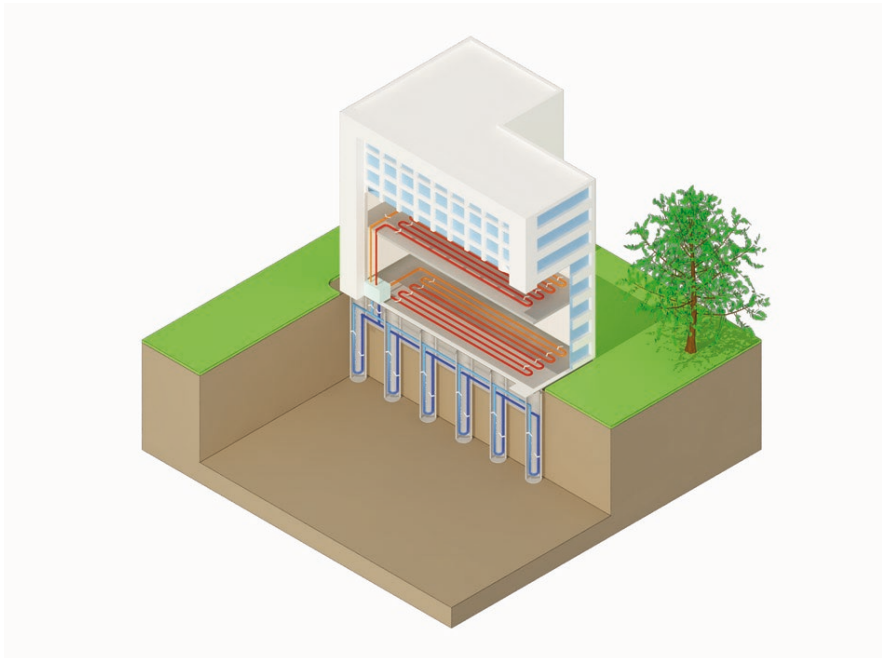


(A. Pommart, AFGP, Réunion  
Géothermie profonde ULille, 22  
février 2024)

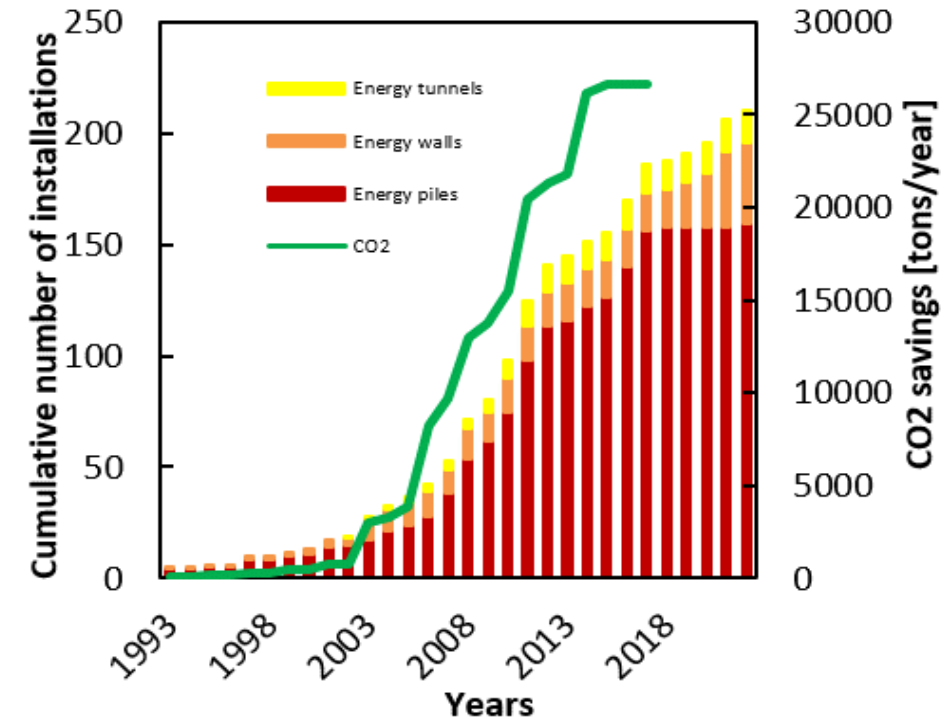
- Température entre 30°C et 150°C
- Profondeur entre 200 et 4000m

## ✓ La géothermie de surface : les géostructures (axe de recherche du LGCGE)

- Double rôle: thermique et structural
- Les tubes échangeurs de chaleur sont intégrés aux fondations du bâtiment
- Ils contiennent le fluide calorporteur

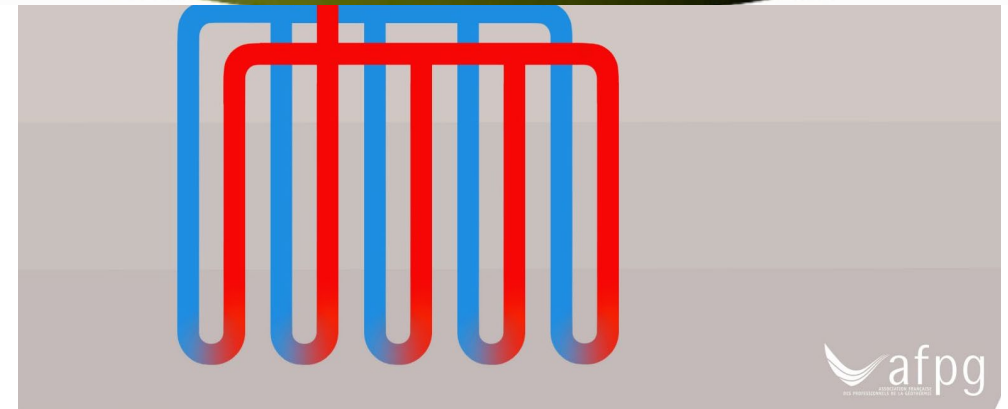


Energy Quay Walls (2021)  
TU-Delft / UniMi



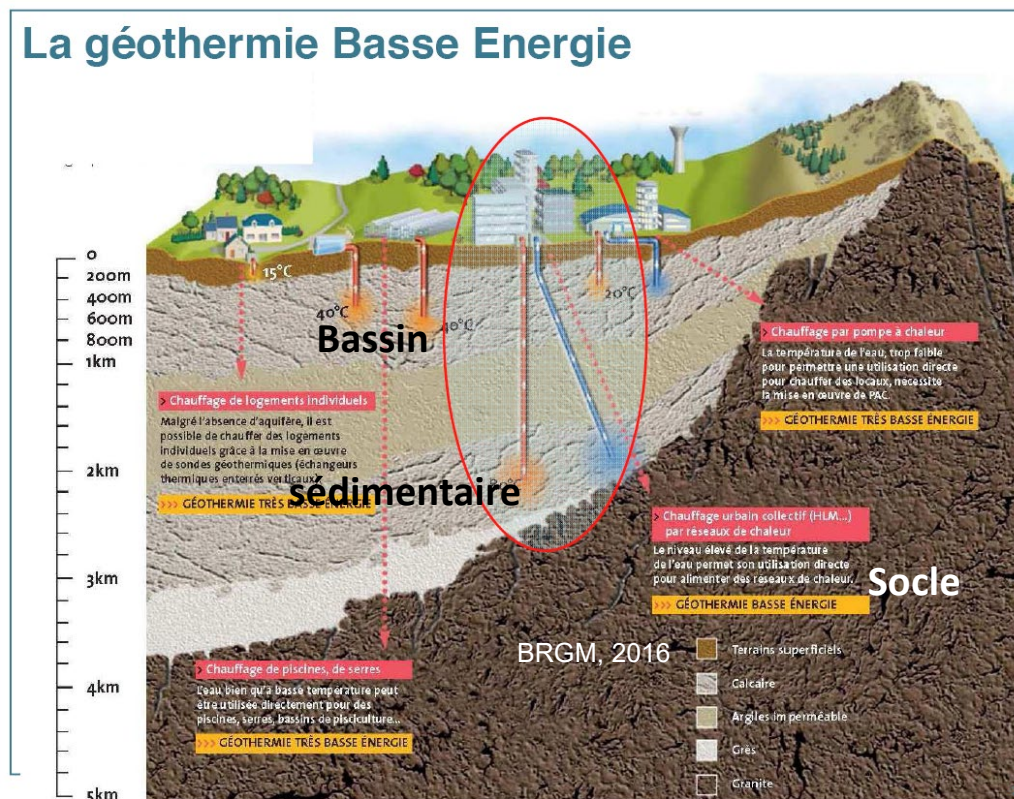
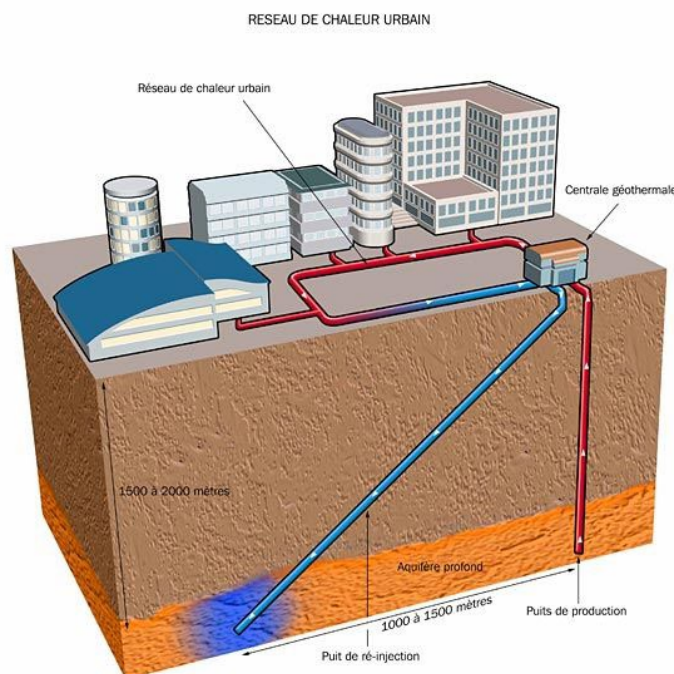
## ✓ La géothermie de surface : projet de démonstrateur sur le campus Cité Scientifique

- En partenariat avec la MEL et l'ADEME
- Soutenu par le COMP de l'Université



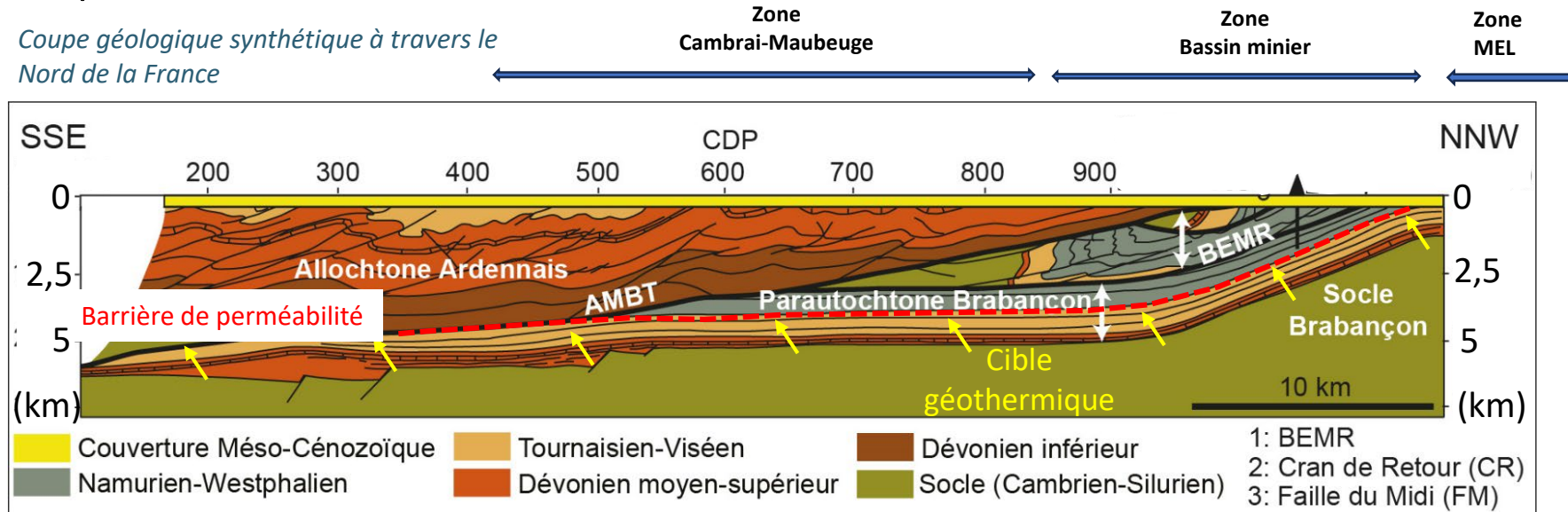
✓ **La géothermie profonde basse énergie: problématique du choix du site (axe de recherche du LOG en collaboration avec le BRGM)**

- Pompage de l'eau à partir d'une nappe profonde
- Installation de canalisation en doublet





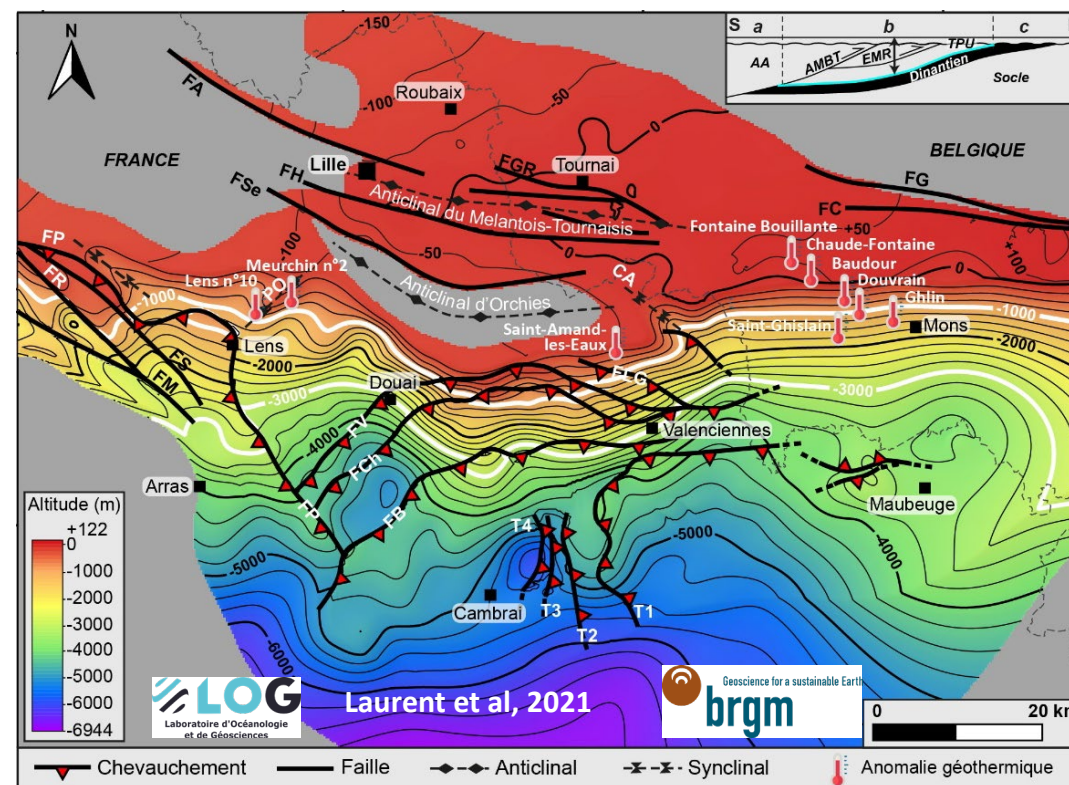
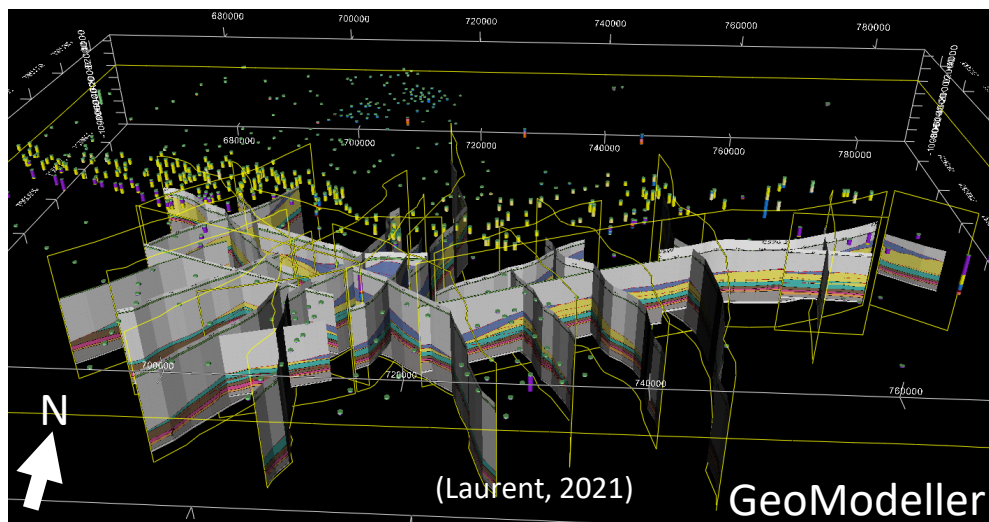
- ✓ **La géothermie profonde basse énergie: problématique du choix du site** (axe de recherche du LOG en collaboration avec le BRGM)
  - Modélisation des sous-sols
  - Exemple du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais



- Un réservoir géothermique (les calcaires du Carbonifère) enfoui à plus de 3 kilomètres
- Une barrière de perméabilité formée par les séries schisteuses houillères permettant la séquestration d'eaux chaudes
- Des anomalies géothermiques de surface répertoriées

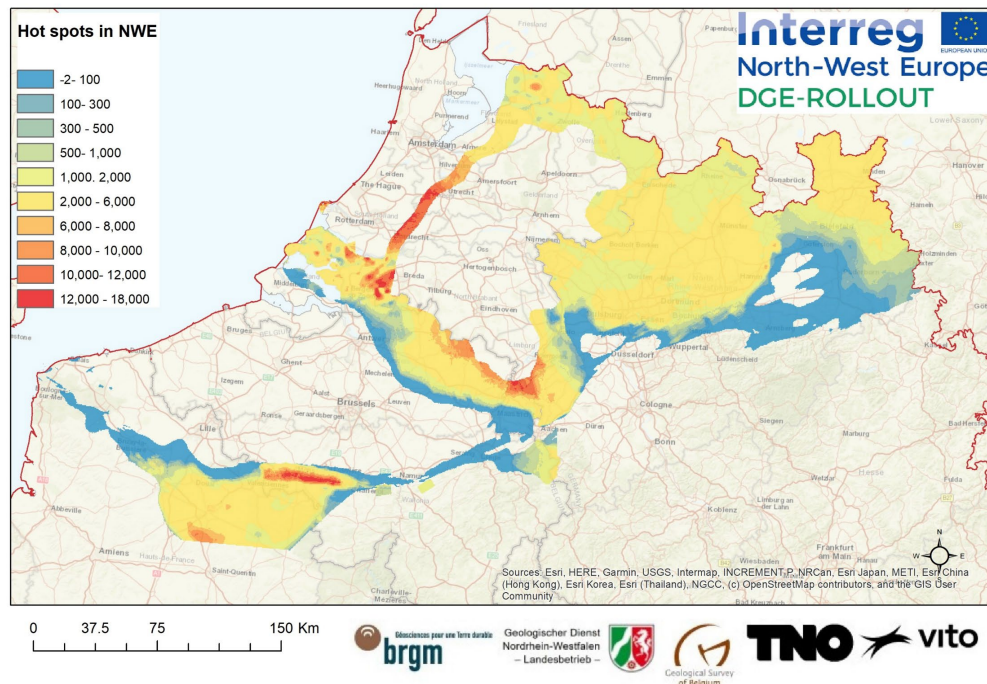
(Laurent et al, 2021)

- ✓ **La géothermie profonde basse énergie: problématique du choix du site** (axe de recherche du LOG en collaboration avec le BRGM)
  - Etablissement d'un modèle géologique 3D permettant de définir l'extension, la profondeur et l'épaisseur du réservoir cible pour la géothermie profonde (thèse A. Laurent)



- ✓ **La géothermie profonde basse énergie: problématique du choix du site** (axe de recherche du LOG en collaboration avec le BRGM)
  - Transposition en terme de potentiel géothermique (« hot spots ») et intégration à l'échelle de l'échelle du NW de l'Europe (projet Interreg DGE-Roll-out)

North-West Europe Hotspots map: combining Dinantian heat in place and socio-economic potential



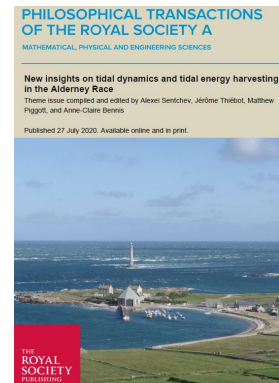
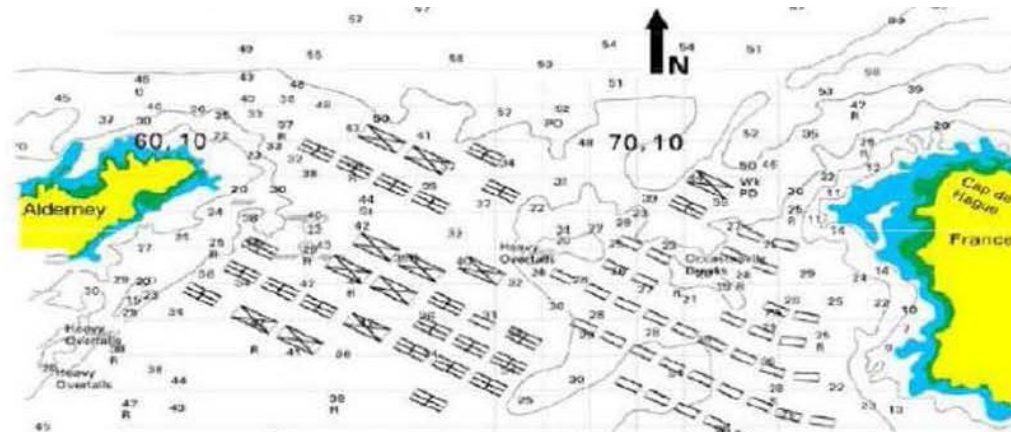
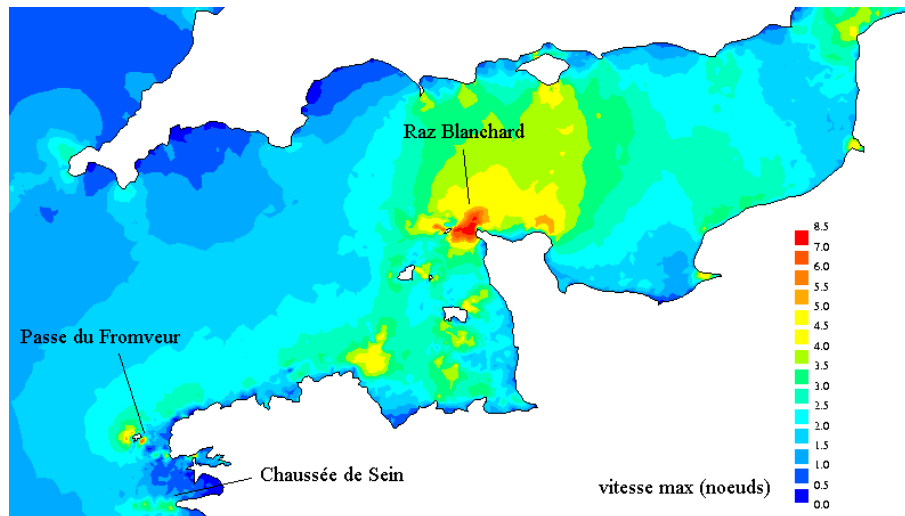
- ✓ **Exemple d'application:**
  - Implantation sur le site de Renault Douai. Deux doublets de forages à 4km de profondeur pour process et chauffage des bâtiments.



Energie  
marine

✓ La caractérisation des courants marins pour les hydroliennes (axe de recherche du LOG)

- Caractériser la ressource
- Identifier l'emplacement optimal des hydroliennes (modélisation)
- faire le suivi des courants 3D pendant 2+ ans.
- Exemple du Raz Blanchard





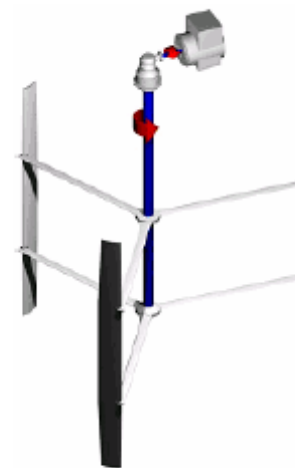
Energie  
marine

✓ **La caractérisation des courants marins pour les hydroliennes** (axe de recherche du LOG)

- Caractériser la ressource
- Identifier l'emplacement optimal des hydroliennes (modélisation)
- faire le suivi des courants 3D pendant 2+ ans.
- Exemple du Raz Blanchard



Immersion de l'hydrolienne HQ-OCEAN d'HydroQuest à Paimpol (printemps 2019)



(a) Kobold turbine.

✓ La caractérisation des écoulements d'air marins qui affectent les éoliennes off shore (axe de recherche du LOG)



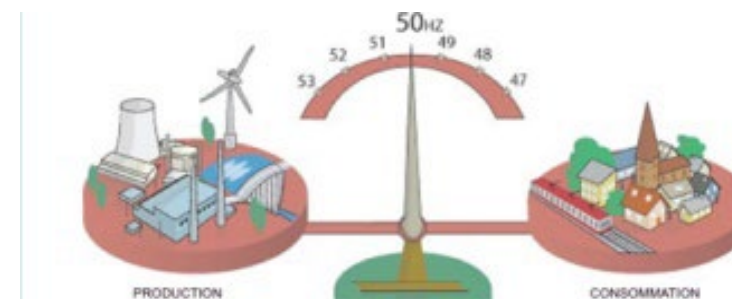
Energie  
éolienne

- Approche observationnelle multi-capteurs (Lidar, Sodar, anémomètre..)
- Combinée avec le machine learning : classification très précise des phénomènes atmosphériques se produisant en altitude à partir des mesures au sol
- Exemple d'analyse pour le futur parc éolien off shore au large de Dunkerque



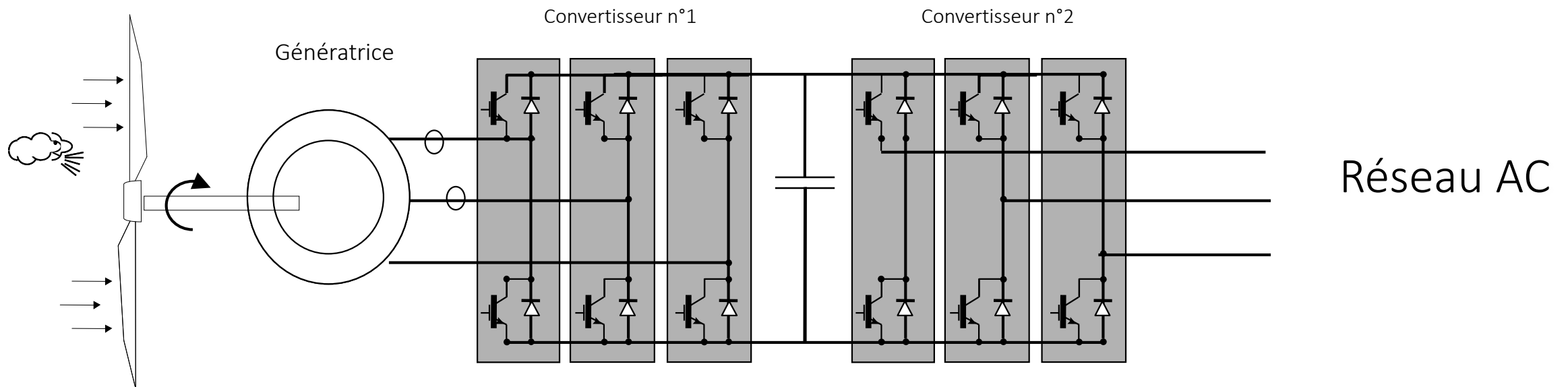


- ✓ Un réseau électrique européen
- ✓ A tout instant, on doit assurer l'équilibre production consommation



- ✓ Que change l'intégration des éoliennes dans cet immense système électrique ?

- ✓ Représentation simplifiée de la connexion de l'éolienne au réseau



- ✓ La Vitesse de l'éolienne est variable pour optimiser la conversion de puissance.
- ✓ Pour cela, nécessité d'avoir 2 convertisseurs pour connecter cette éolienne au réseau
  - **Découplage complet entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne**



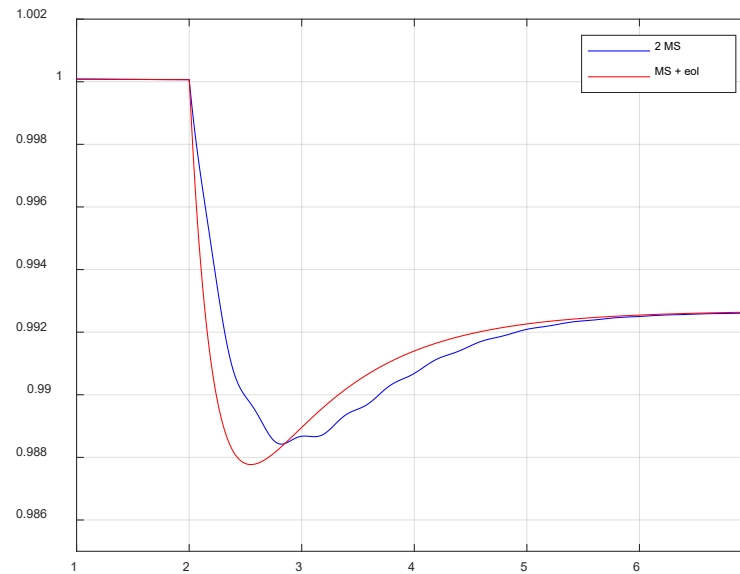
## ✓ Problématique du manque d'inertie

- En cas de déconnexion d'une source importante, la fréquence réseau diminue transtoirement
- L'inertie des centrales de production « classique » limite la variation de fréquence (Rate of Change of Frequency ROCOF).
- L'éolienne ne contribue pas naturellement à l'inertie du réseau, donc augmentation du ROCOF.

Exemple d'une perte de puissance sur le réseau

En bleu : 2 machines synchrones

En rouge : 1 des machines synchrones a été remplacée par un système éolien



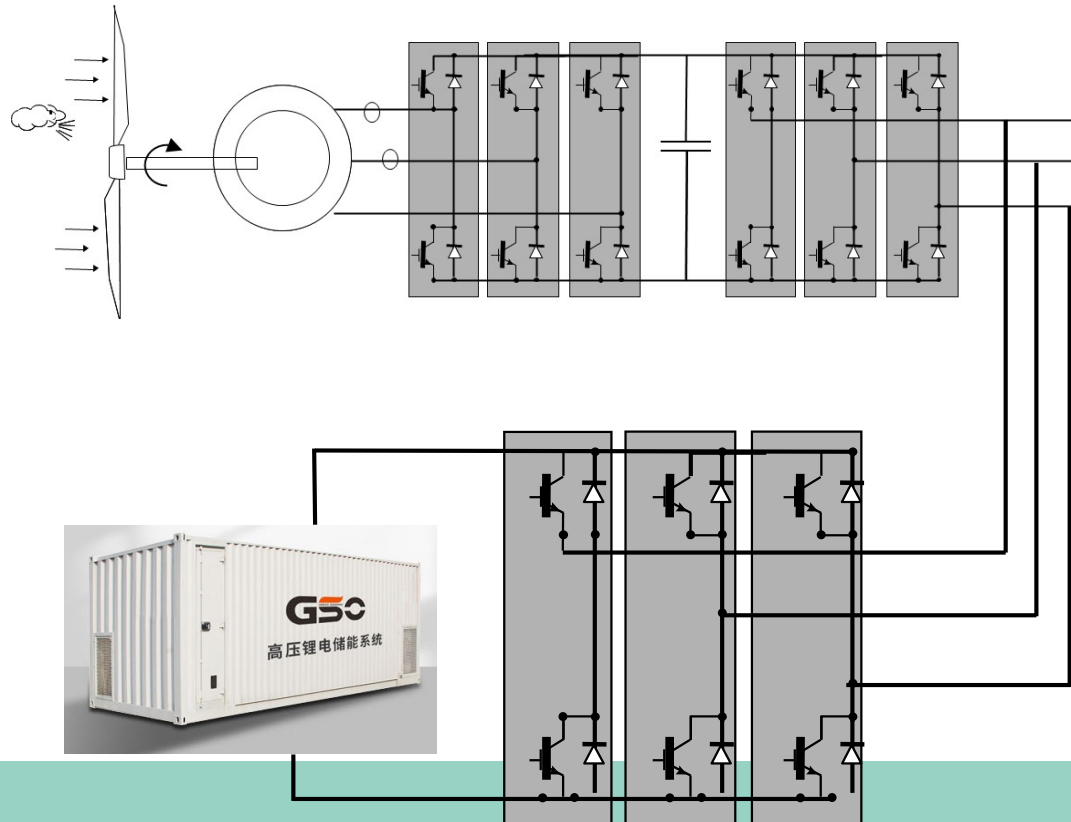
→ Gros problèmes pour les sources de production classiques qui risquent de décrocher

→ Problématique sur les protections des réseaux

...

✓ **Comment pallier le problème du manque d'inertie?** (axe de recherche du L2EP)

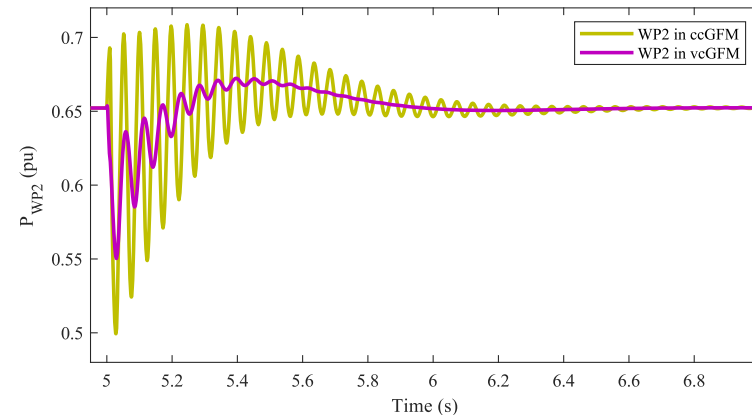
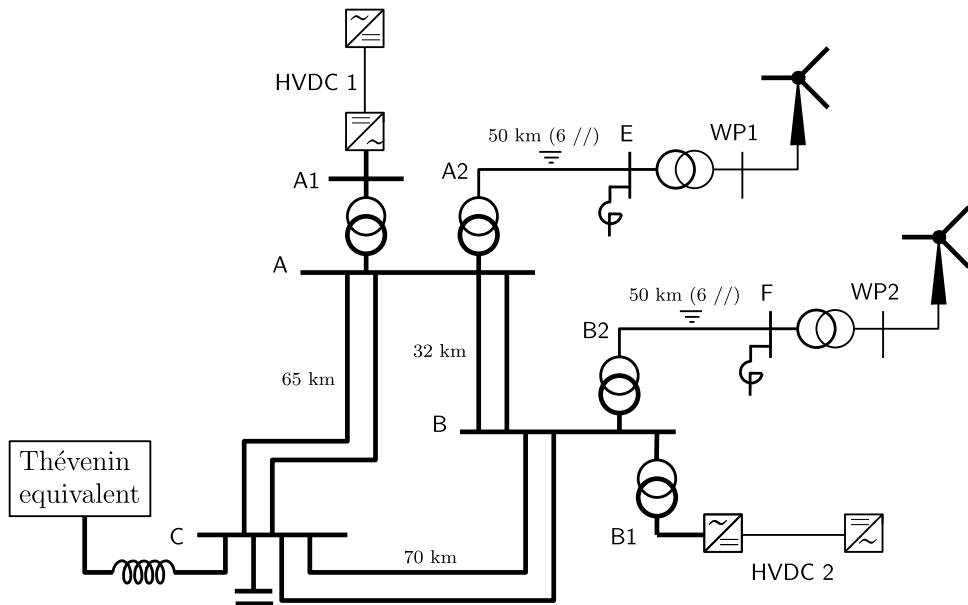
- Ajuster la vitesse de l'éolienne à la fréquence du réseau par la commande
- Placer un dispositif de stockage en parallèle avec le convertisseur



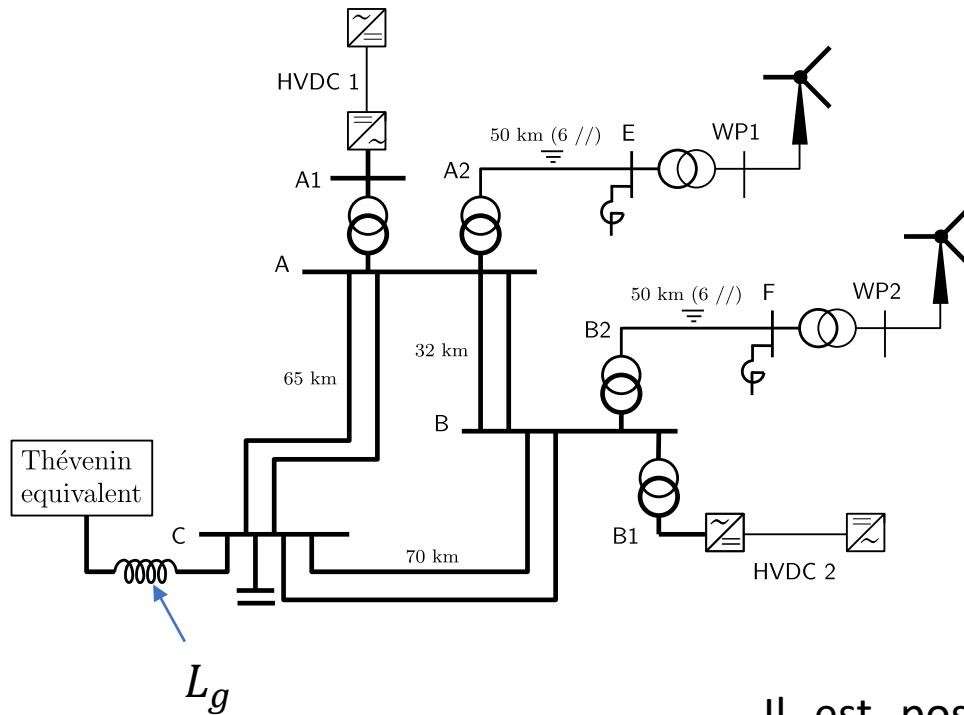
→ Problématique de dimensionnement optimal et de commande de ces systèmes de stockage

✓ **Problématique de l'instabilité du réseau à forte intégration de convertisseurs** (axe de recherche du L2EP)

- En cas de réseaux proches du 100% électronique de puissance
- Phénomènes d'oscillation de la tension en certains nœuds dus à l'interaction entre les convertisseurs

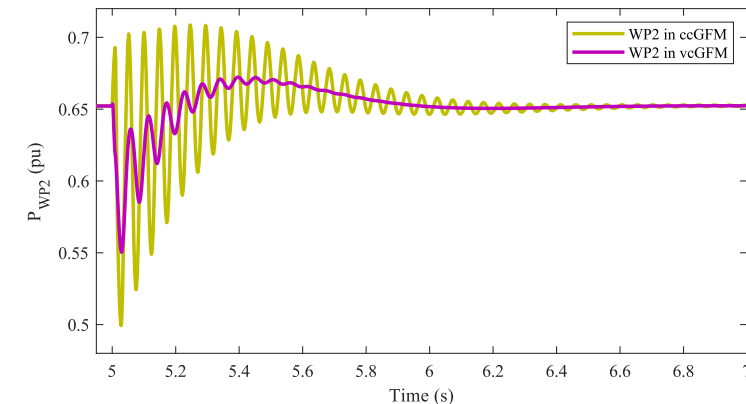


- Pallier cette instabilité par la commande des convertisseurs
- Problématique du placement des convertisseurs dans les réseaux



Dans certaines régions, on peut avoir des poches de réseaux 100% alimentés par de l'électronique de puissance et très éloignés des réseaux classique ( $L_g$ ) élevé.

On constate alors de nouveaux phénomènes oscillatoires, potentiellement dangereux.



Il est possible d'atténuer ces oscillations par action sur la commande des convertisseurs (commande de type grid forming).

**Problématique du placement optimal de ces convertisseurs dans les réseaux**

# Merci pour votre attention

*Des questions ?*