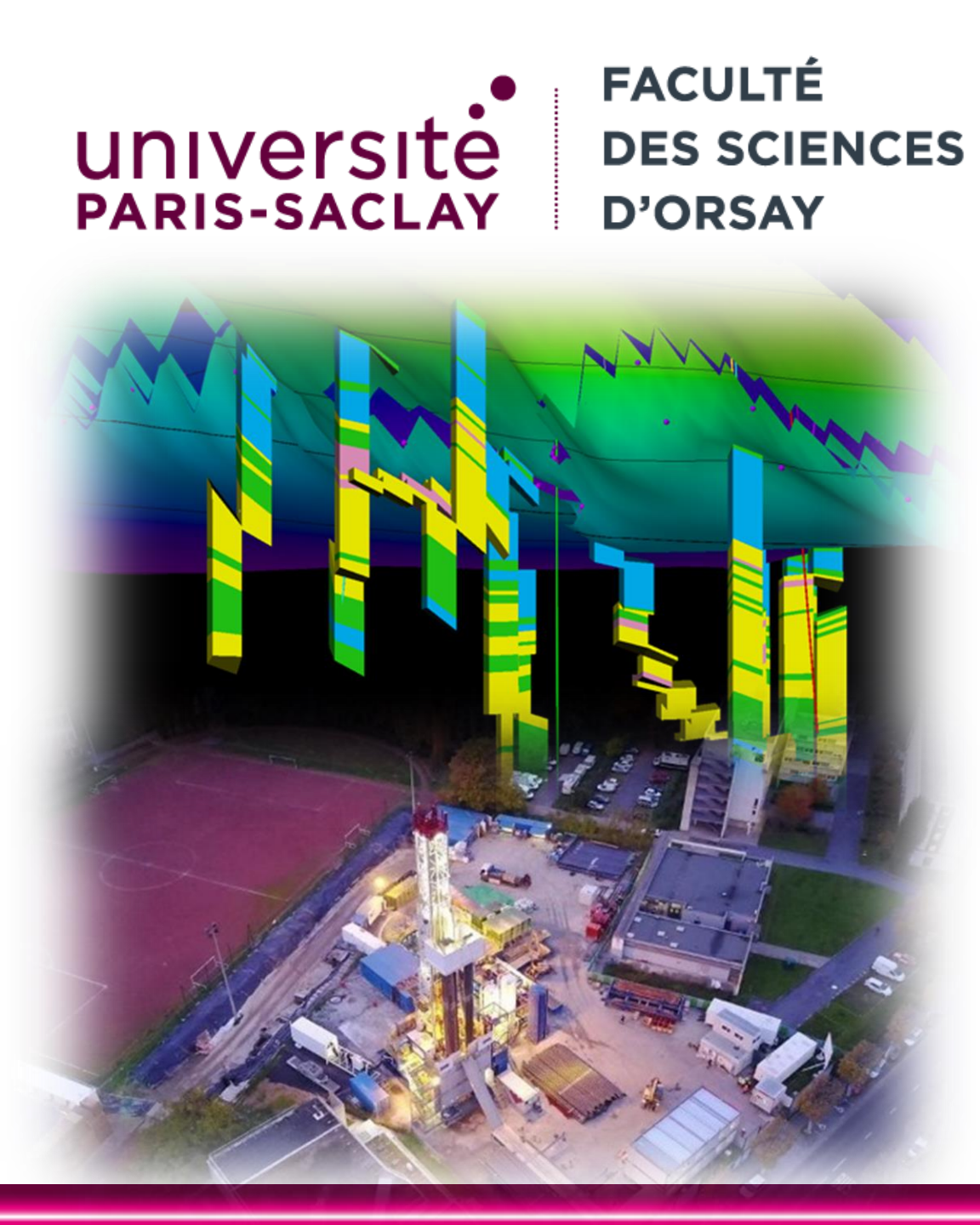


The background of the slide features a composite image. The top half shows a 3D visualization of a geothermal reservoir with a green and blue wavy surface and several vertical wells represented by yellow and blue rectangular columns. The bottom half is an aerial photograph of an industrial geothermal site, showing a large drilling rig, various buildings, and a red sports field in the background.

Géothermie

Apports dans la lutte contre le réchauffement climatique

par Benjamin Brigaud

Professeur à l'Université Paris-Saclay
Membre de l'Institut Universitaire de France

21 mai 2026

Plan

I. Géothermie : mobilisation de la chaleur - Définitions générales

II. Quelques chiffres clefs énergie, focus sur la chaleur

III. Les Géothermies – Les différentes techniques pour mobiliser la chaleur

- III.1 Géothermie de surface (<200 m, 10-30°C)
- III.2 Géothermie profonde

IV. Les défis de la géothermie pour régler les problèmes rencontrés et les risques associés

- III.1 Risques sur les installations
- III.2 Risques de sismicité induite : Nord de Strasbourg, test de mise en production, fin 2020 (magnitude 3.5, arrêt de la ré-injection)
- III.3 Risques géologique d'échec
- III.4 Problèmes d'exploitation : Exemple sur les doublets de Saclay (injection difficile, migration de fines)

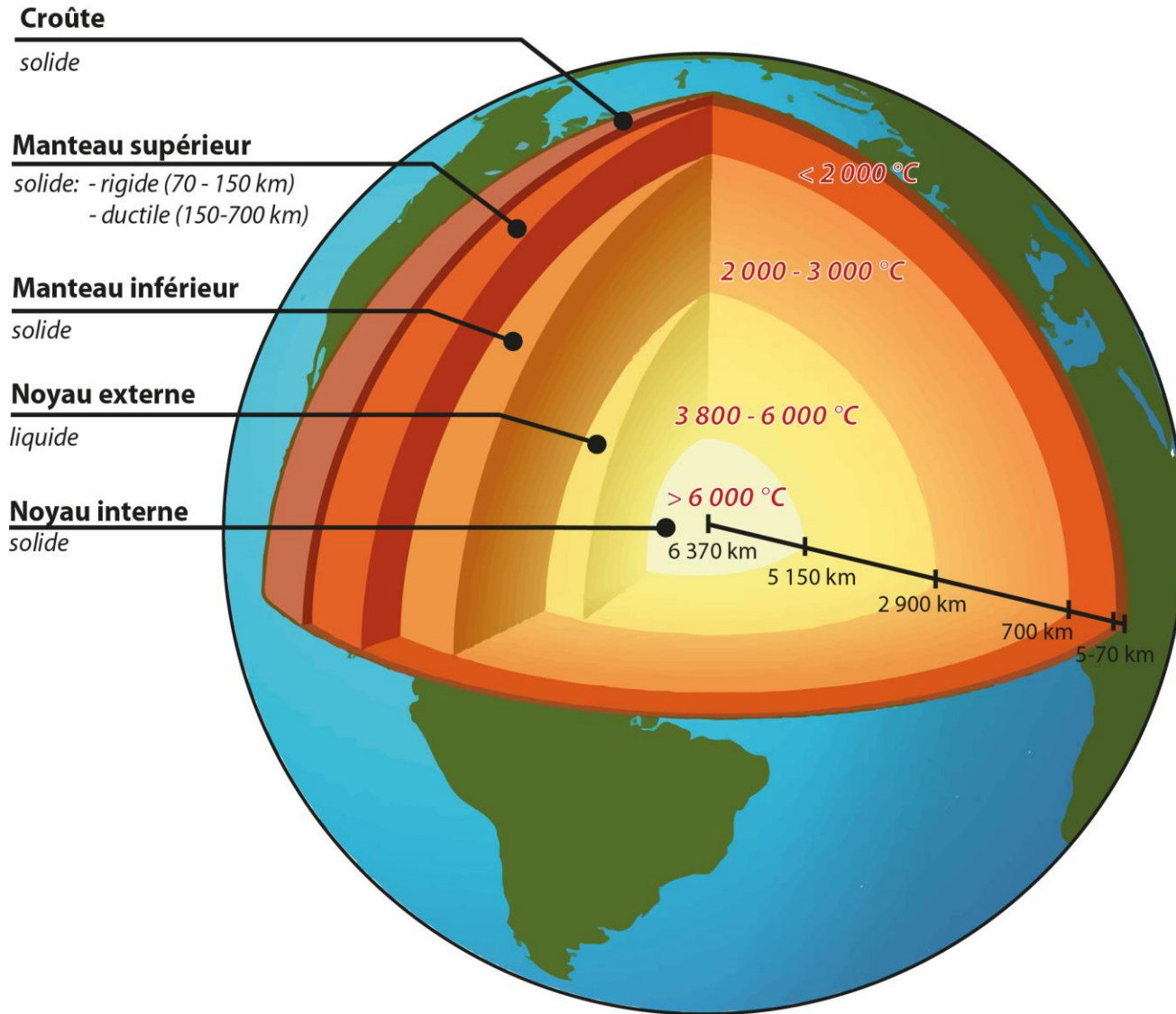
V. La Recherche & Développement en géothermie

- IV.1 Problématiques et enjeux
- IV.2 Quelques exemples de travaux universitaires

I. La géothermie

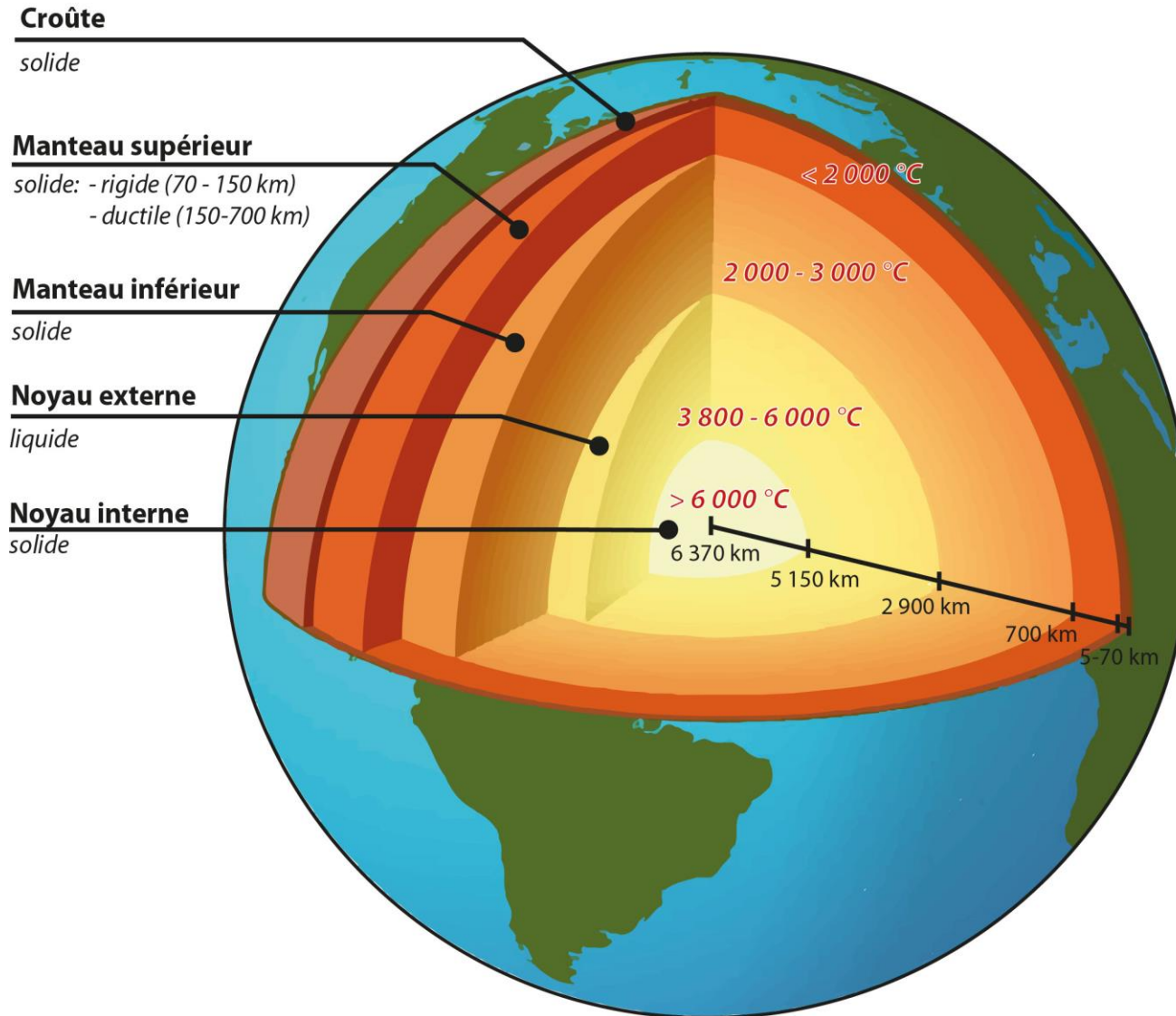
- mobilisation de la chaleur contenue dans le sous-sol à très basse, basse ou haute température

I. La géothermie



Noyau interne: 1220 km
Noyau externe: 2250 km
Manteau inférieur: 2200 km
Manteau supérieur: 665 km en moyenne (de 695 km à 630 km)
Croûte terrestre en moyenne 35 km
Croûte océanique: 5 km
Croûte continentale chaîne de montagne: 70 km

I. La géothermie



Chaleur héritée phase d'accrétion / cristallisation de la graine / refroidissement séculaire → 25% et 75% désintégration éléments radioactifs ^{238}U , ^{232}Th et ^{40}K

Noyau interne: 1220 km

Noyau externe: 2250 km

Manteau inférieur: 2200 km

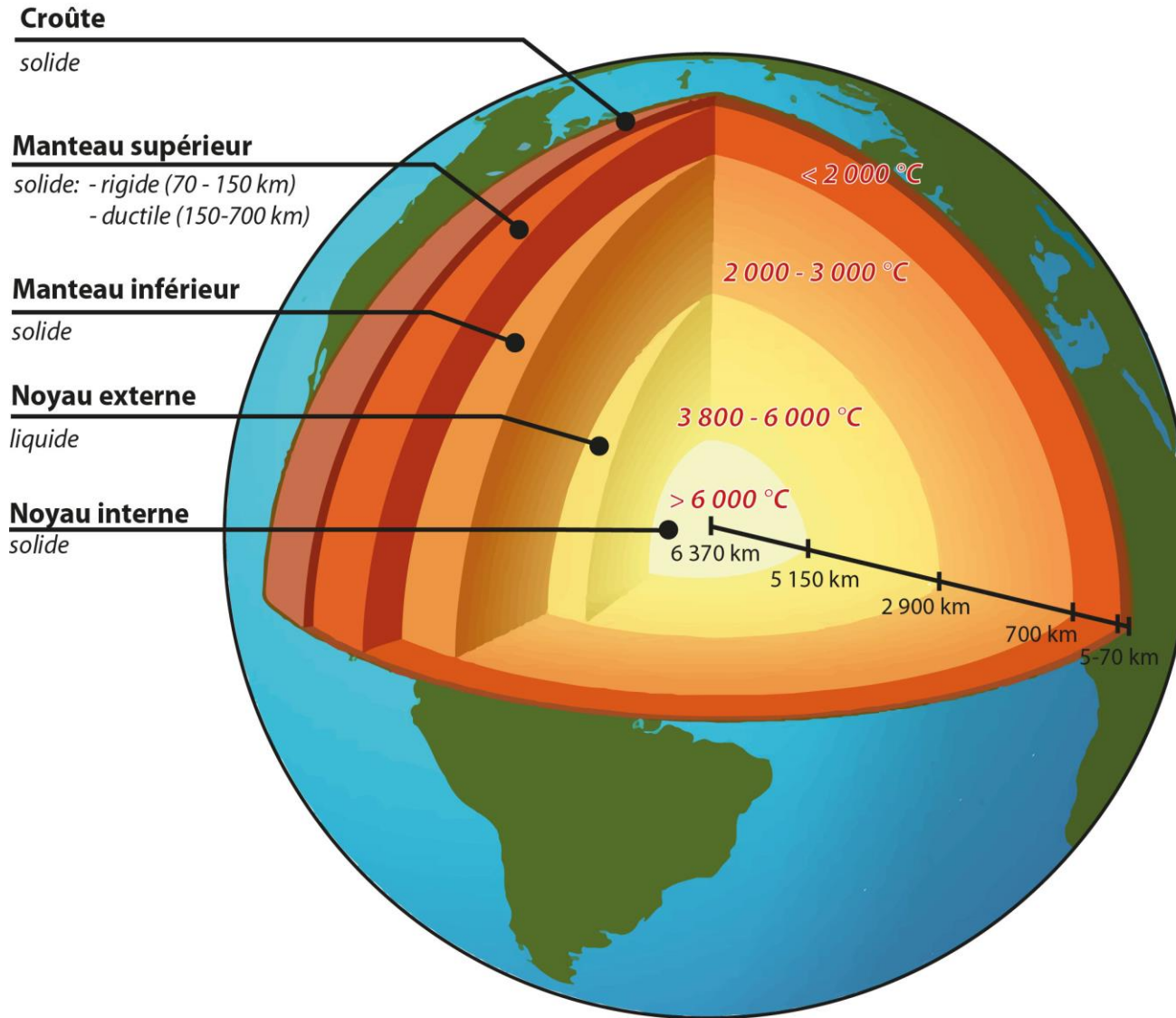
Manteau supérieur: 665 km en moyenne (de 695 km à 630 km)

Croûte terrestre en moyenne: 35 km

Croûte océanique: 5 km

Croûte continentale chaîne de montagne: 70 km

I. La géothermie



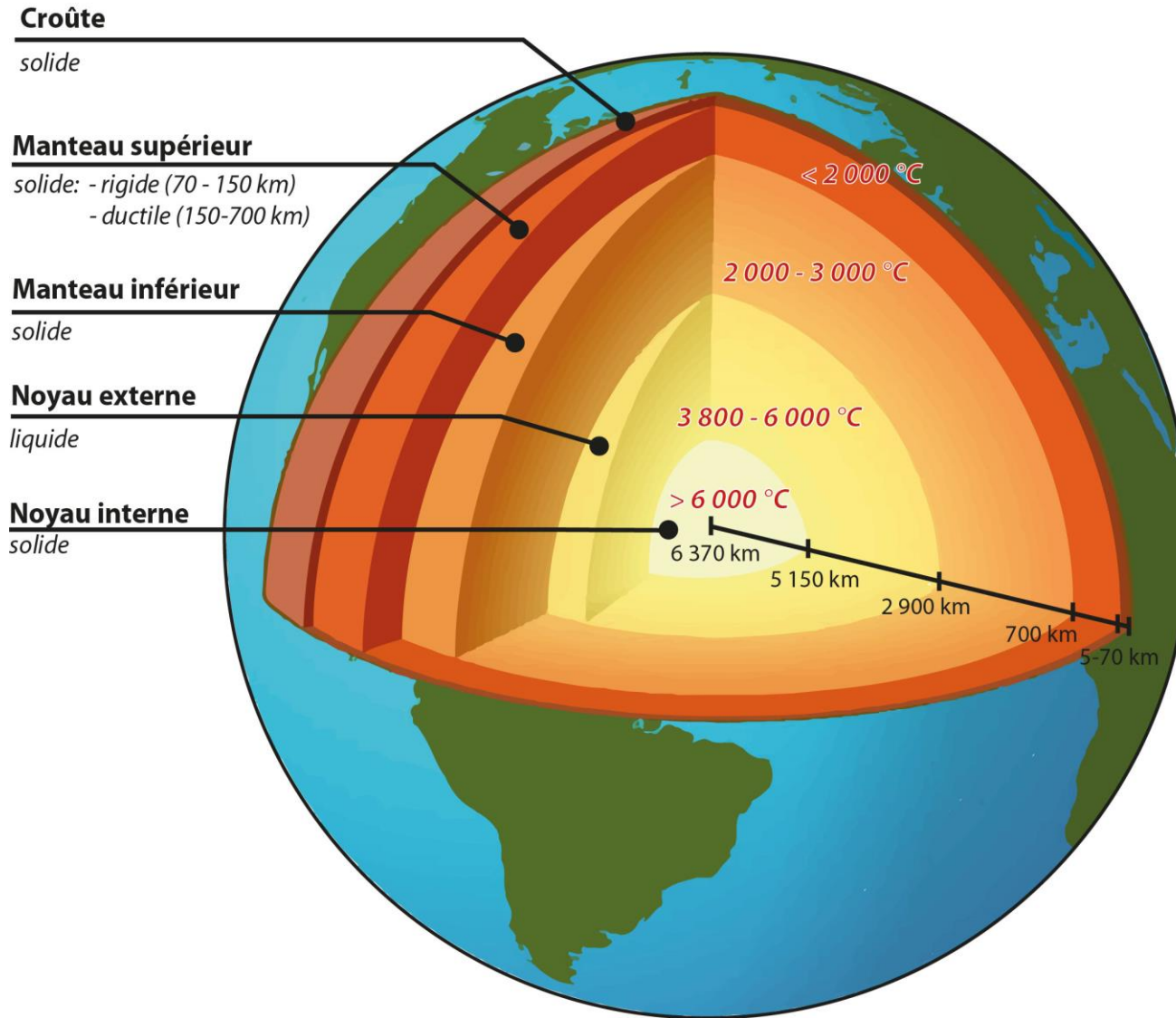
Le gradient géothermique

variation de température (dT) en fonction de la variation de profondeur (dh), exprimé en $K.m^{-1}$ (degré par mètre ou degré par kilomètre)

Évolution de la température en profondeur

- Noyau 2900km à 6370km 3500 à 5000°C
0.5°C/km
- limite manteau-noyau 3000 à 3800°C
- Manteau 2900km à 5-70km 1000 à 2700°C – convection 0.5°C/km
- Croute continentale, 30-60km, <1000°C – 30°C*30km = 900°C, conduction, gradient géothermique de 10-30°C/km, en moyenne gradient géothermique: 3°C/100m

I. La géothermie



Flux de chaleur par conduction (énergie par surface):

$$q = -k \cdot \text{grad}(T)$$

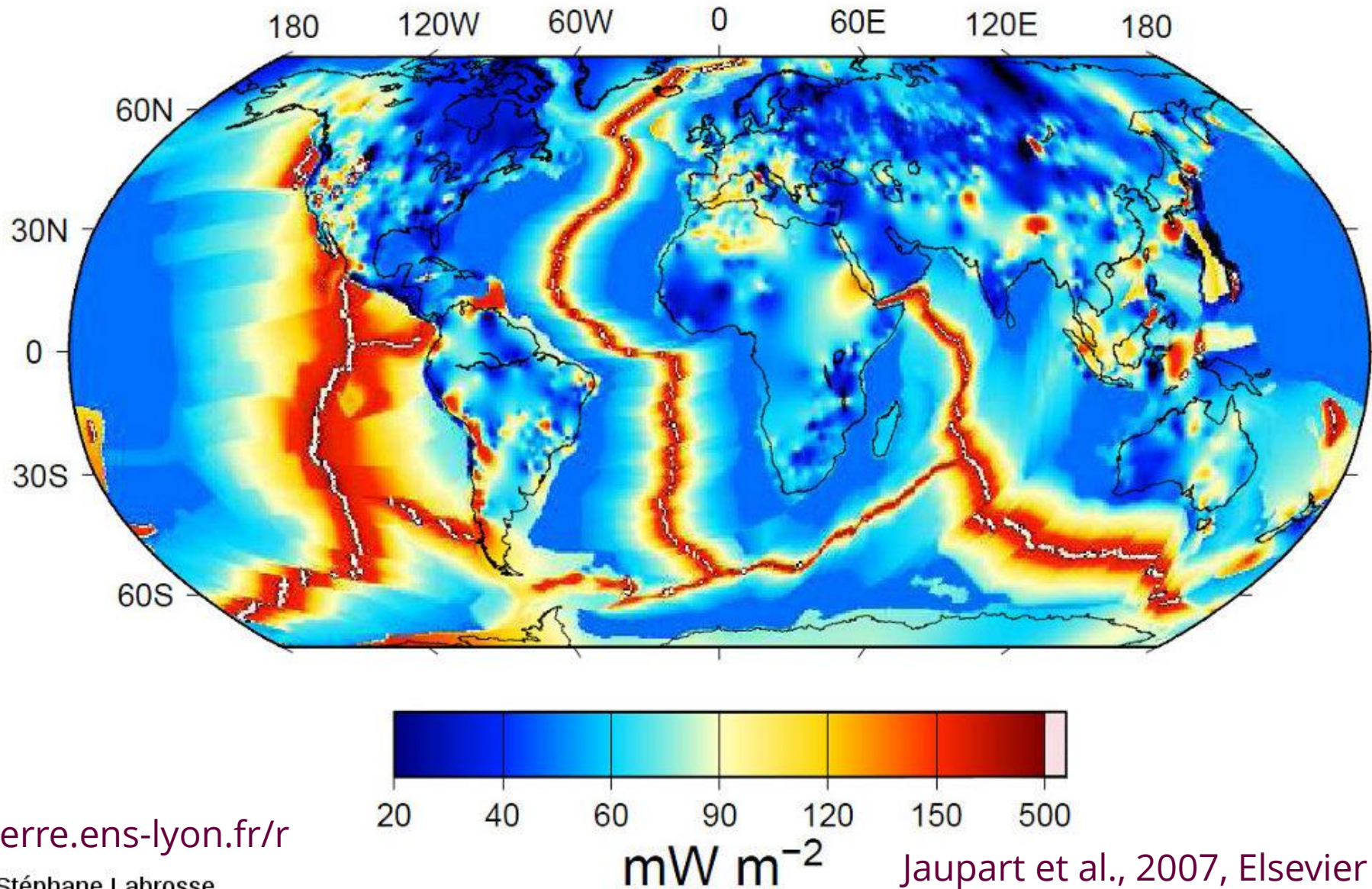
k=conductivité thermique W par mètre et par degré

grad(T)=gradient géothermique

flux chaleur à la surface de la croûte continentale
60mW/m² / 0.06W.m² (168W/m² pour soleil)

flux varie à la surface de la Terre 100mW/m²
croûte océanique, 82mW/m² en moyenne

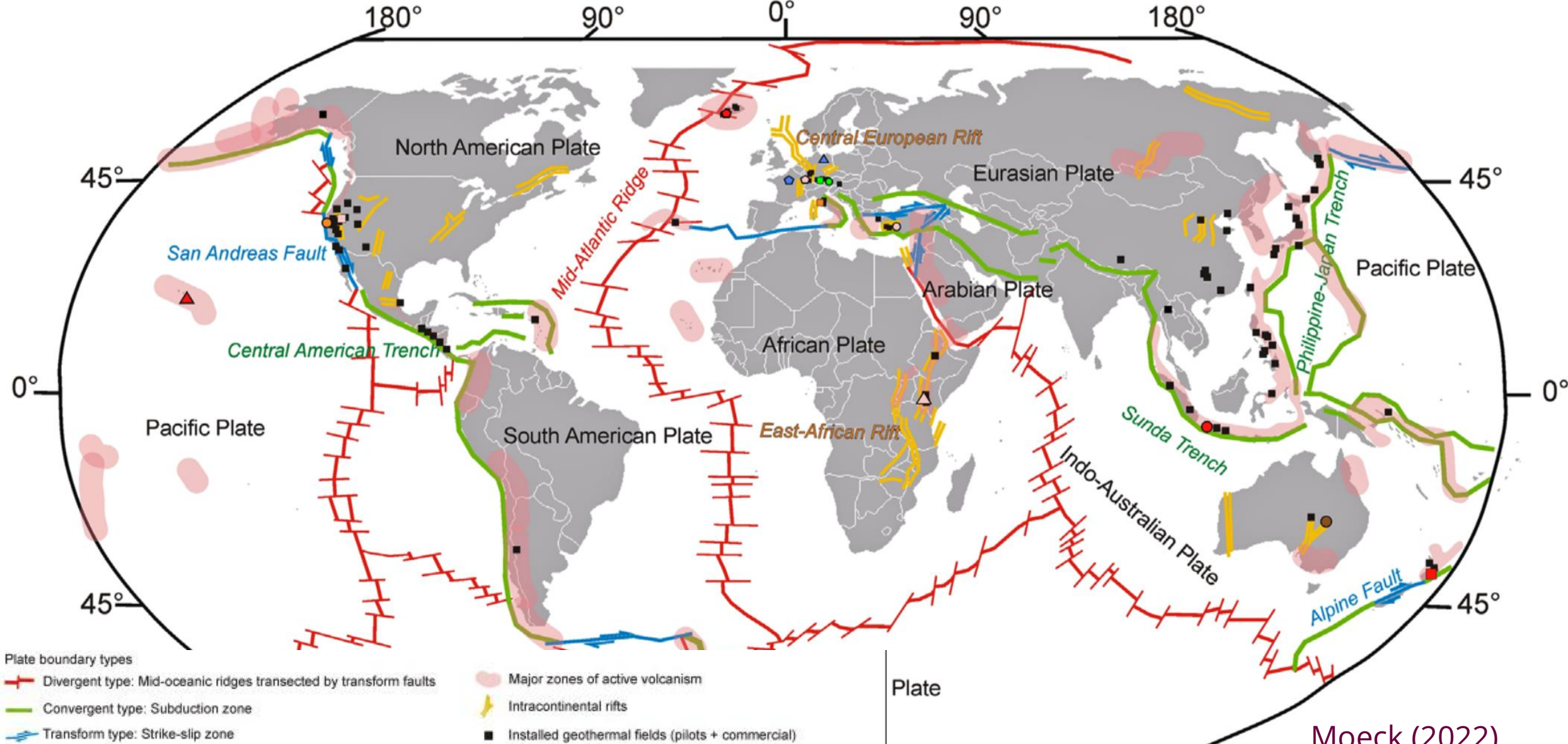
Carte des flux de chaleur



@<https://planet-terre.ens-lyon.fr/r>

Stéphane Labrosse

Jaupart et al., 2007, Elsevier



Examples of geothermal play types with current production

- CV1 - Magmatic - Volcanic field type:** Taupo (New Zealand), Kamojang (Indonesia), Reykjanes (Iceland), Puna (Hawaii/USA)
- CV1 - Magmatic - Plutonic type:** Larderello (Italy), The Geysers (USA)
- CV3 - Extensional domain type:** Bradys (Nevada/USA), Kizildere (Turkey), Soult-sous-Forêts (France), Olkaria (Kenya)
- CD1 - Intracratonic basin type:** Neustadt-Glewe [heat] (Germany), Paris Basin [heat] (France)
- CD2 - Orogenic belt/foreland basin type:** Unterhaching (Germany), Altheim (Austria)
- CD3 - Basement (hot dry rock) type:** Habanero (Australia)

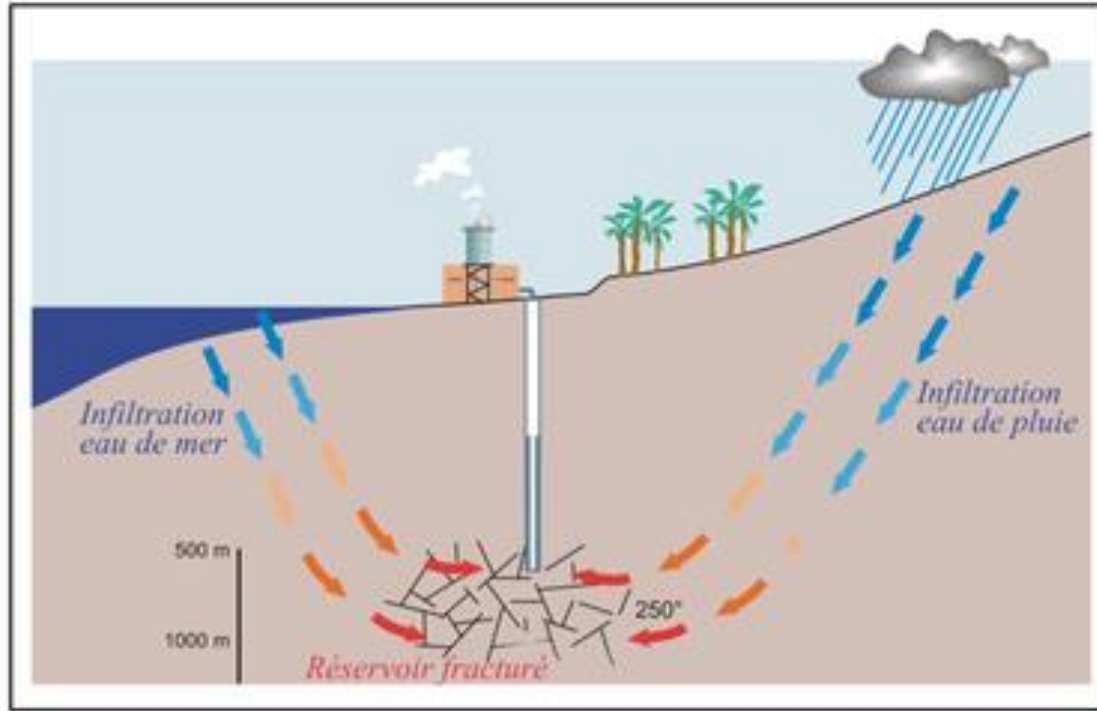
Magmatique / champ volcanique: exemple Krafla, Islande

Production électricité
+ chaleur



@photos Brigaud

La centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe)



<https://www.geothermies.fr/outils/operations/la-centrale-geothermique-de-bouillante-guadeloupe>

Depuis 1986 (4.7MW) puis 2004 11MW
15.7 MW de capacité
10% de l'électricité de l'île



(Credit: 2023 © Guadeloupe Energie. Taken from: <https://www.guadeloupe-energie.gp/en/renewable-energy/geothermal-energy/the-geothermal-energy-sector-in-guadeloupe/>)

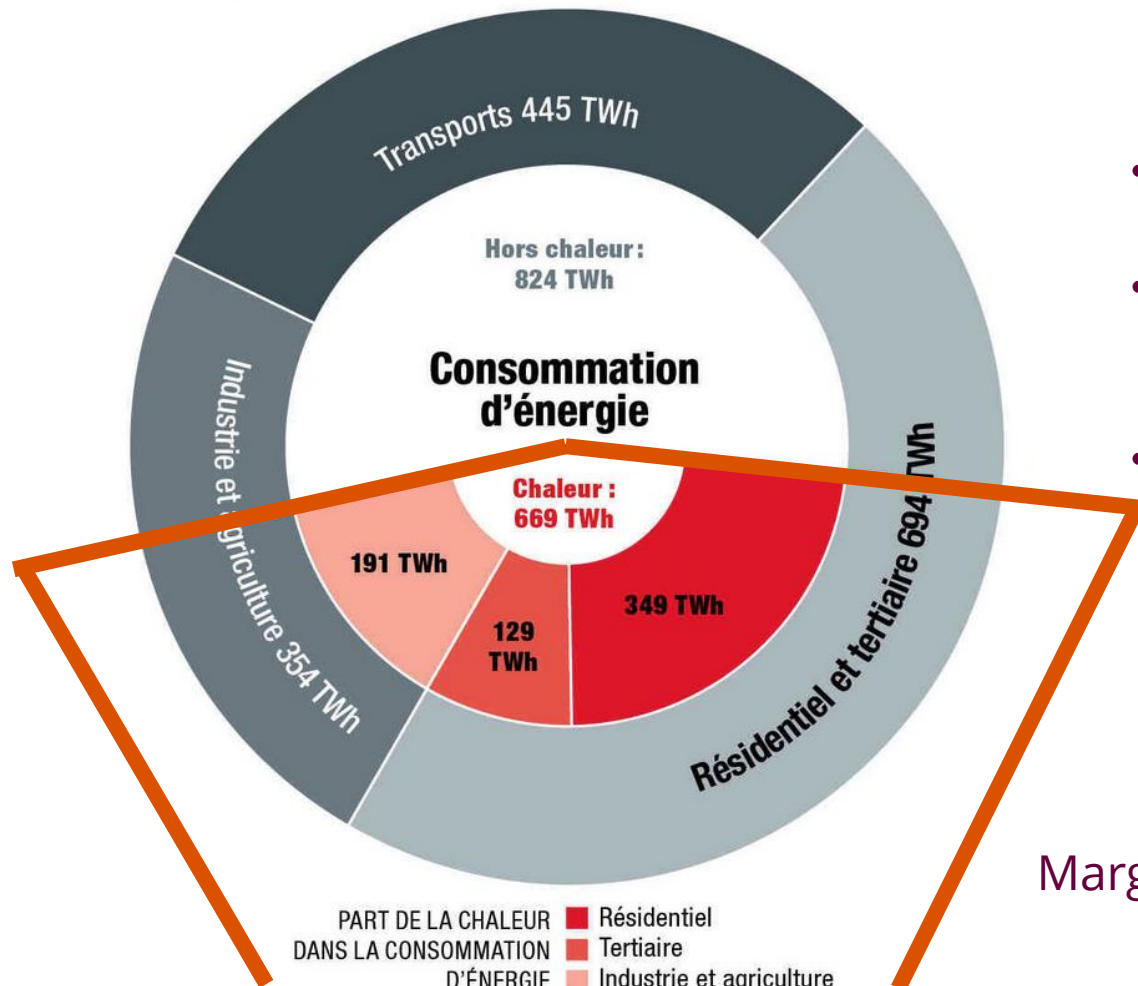


Part des usages chaleur par secteur dans la consommation d'énergie finales en France (2020)

Environ 1500 TWh consommé en 2020

La chaleur est omniprésente

Elle représente environ 45 % de l'énergie consommée en France chaque année, et 69 % de celle utilisée dans le résidentiel et le tertiaire.



- Chauffage, eau chaude, clim / sur totalité de la chaleur = 52% conso du résidentiel, 20% du tertiaire, 28% industrie
- Dans résidentiel et tertiaire 95% besoin chaleur sont couverts par des modes individuels et 5% par des réseaux de chaleur, dit collectif, zone urbaine,
- Dans les zones urbaines, plus de la moitié est chauffé par le gaz du réseau public....

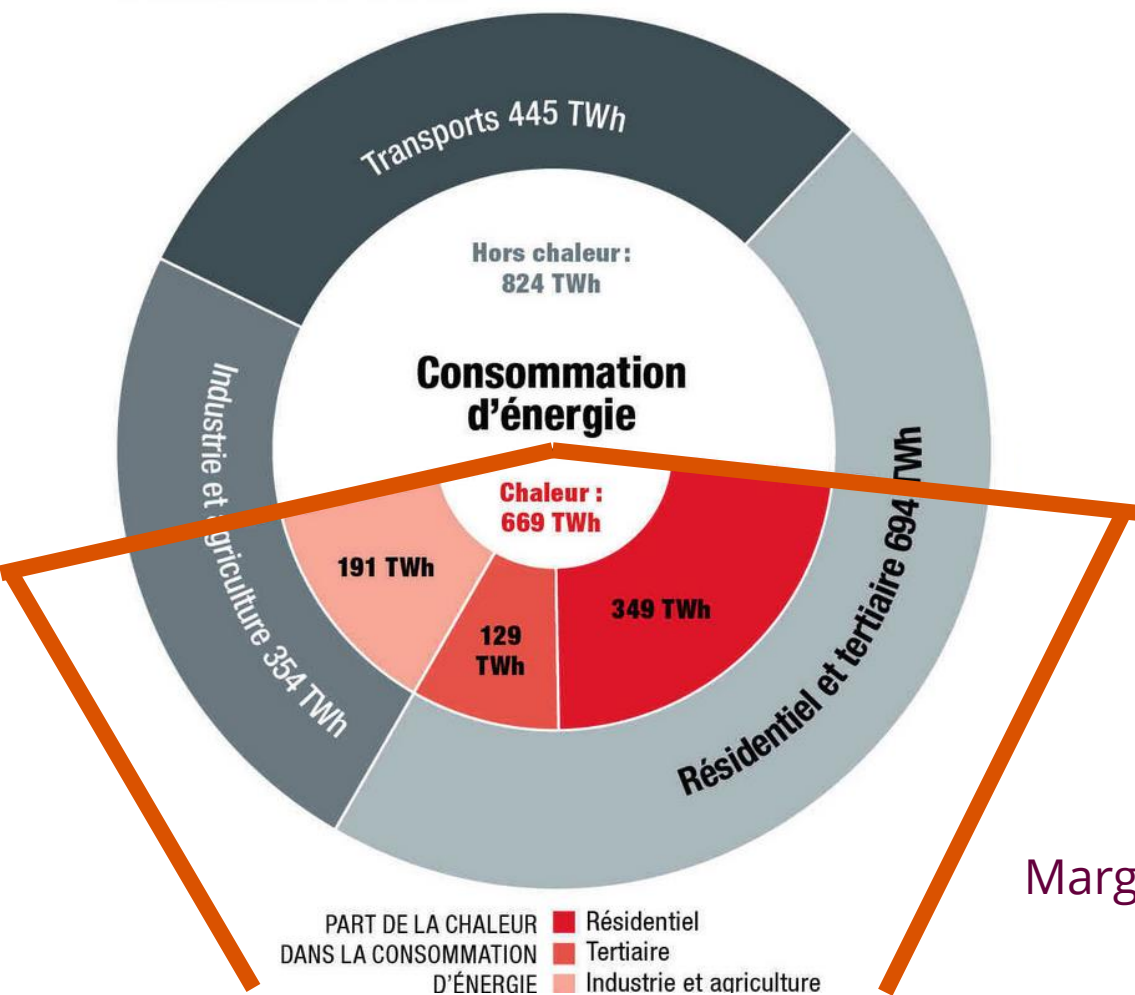
Margo & Grillet, 2022

Part des usages chaleur par secteur dans la consommation d'énergie finales en France (2020)

Environ 1500 TWh

La chaleur est omniprésente

Elle représente environ 45 % de l'énergie consommée en France chaque année, et 69 % de celle utilisée dans le résidentiel et le tertiaire.



Part du renouvelable dans la production de chaleur (2020, TWh)

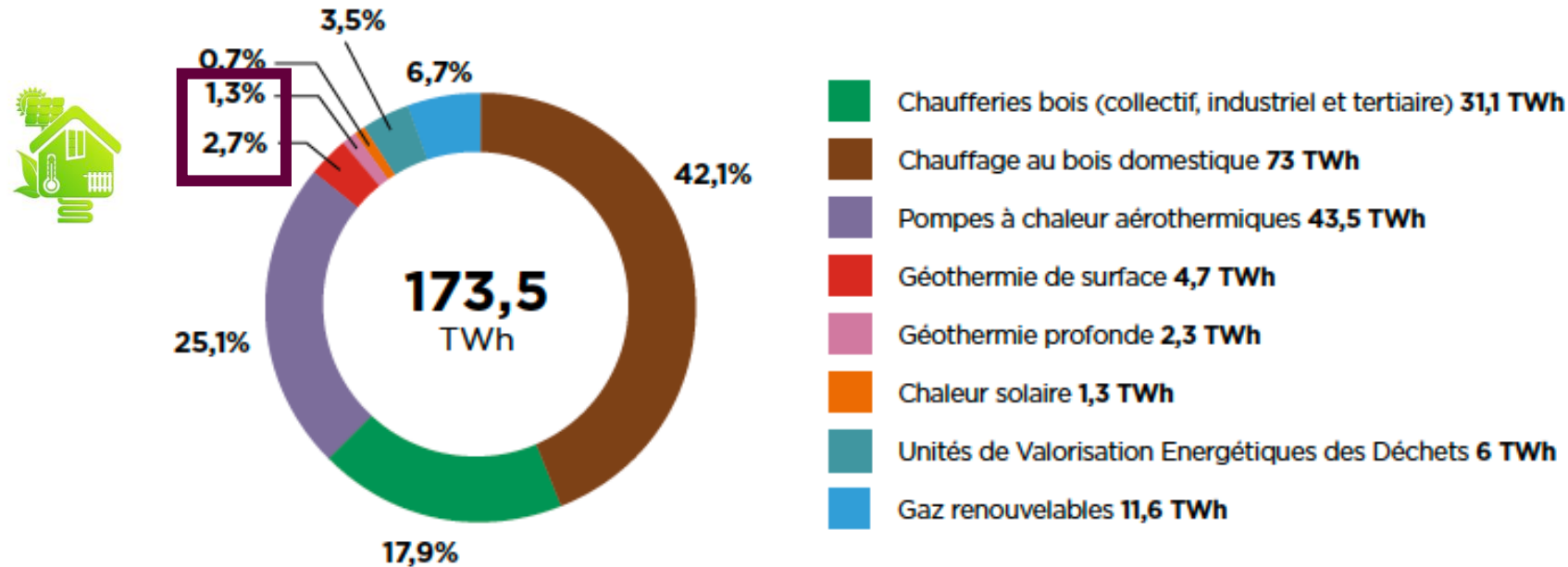


Margo & Grillet, 2022

II. Quelques chiffres clefs énergie, focus sur la chaleur

♦ Part de chaque filière dans la production de chaleur renouvelable en France métropolitaine en 2023

Source : SER

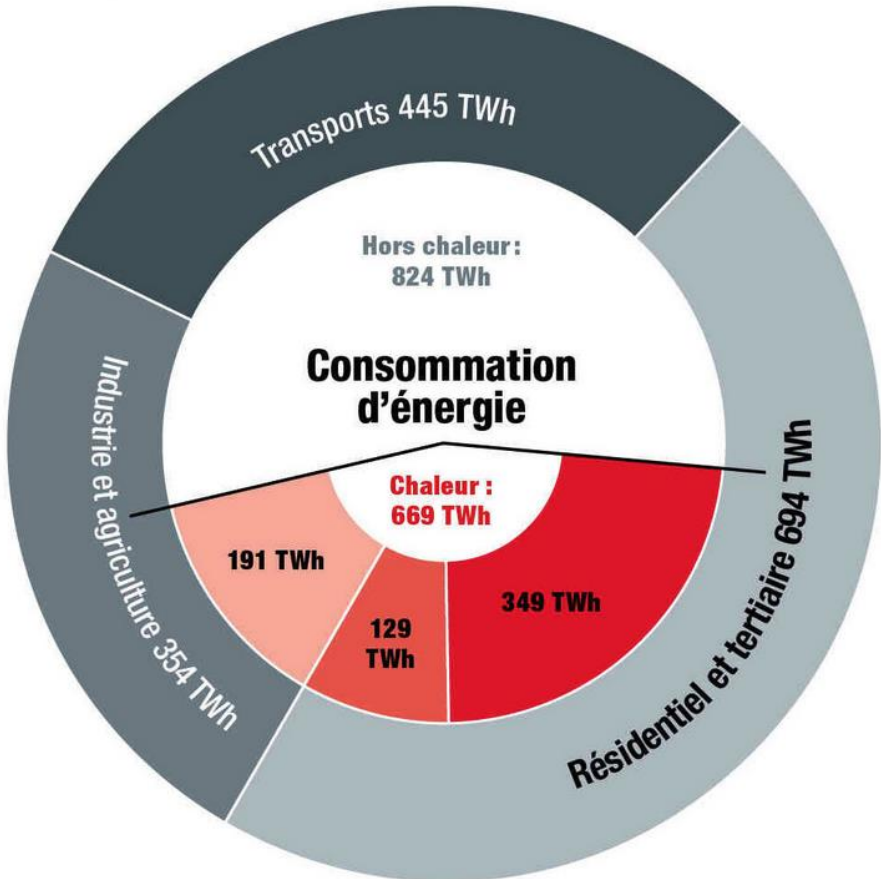


ADEME, Afpg, CIBE, FEDENE, SER, & UNICLIMA. (2024). PANORAMA DE LA CHALEUR RENOUVELABLE ET DE RÉCUPÉRATION ÉDITION 2024

Part des usages chaleur par secteur dans la consommation d'énergie finales en France (2022) - 1493kWh

La chaleur est omniprésente

Elle représente environ 45 % de l'énergie consommée en France chaque année, et 69 % de celle utilisée dans le résidentiel et le tertiaire.



PART DE LA CHALEUR
DANS LA CONSOMMATION
D'ÉNERGIE

- Résidentiel
- Tertiaire
- Industrie et agriculture



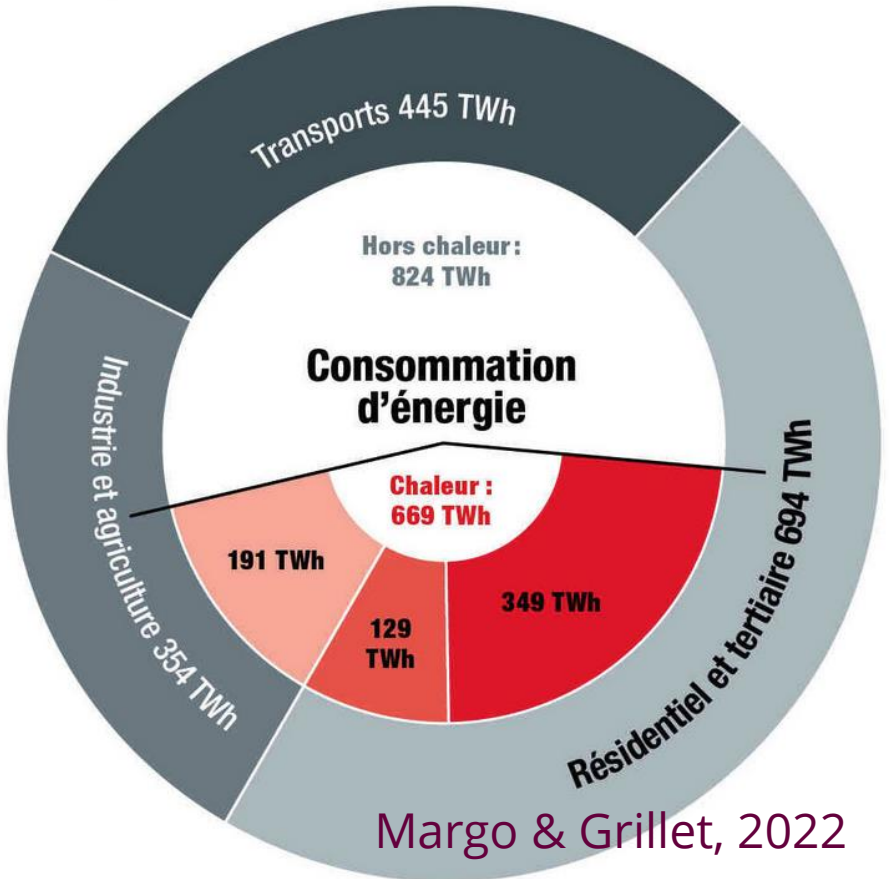
7 kWh, 0,90% de la consommation de chaleur

Margo & Grillet, 2022

Part des usages chaleur par secteur dans la consommation d'énergie finales en France (2022) - 1493kWh

La chaleur est omniprésente

Elle représente environ 45 % de l'énergie consommée en France chaque année, et 69 % de celle utilisée dans le résidentiel et le tertiaire.



Margo & Grillet, 2022

PART DE LA CHALEUR
DANS LA CONSOMMATION
D'ÉNERGIE

- Résidentiel
- Tertiaire
- Industrie et agriculture



7 kWh en 2023, 0,90% de la consommation de chaleur

Géothermie: moins de 1% de la consommation de chaleur en France

II. Quelques chiffres clefs énergie, focus sur la chaleur



III. Les Géothermies – Les différentes techniques pour mobiliser la chaleur

- III.1 Géothermie de surface (<200 m, 10-30°C)
- III.2 Géothermie profonde

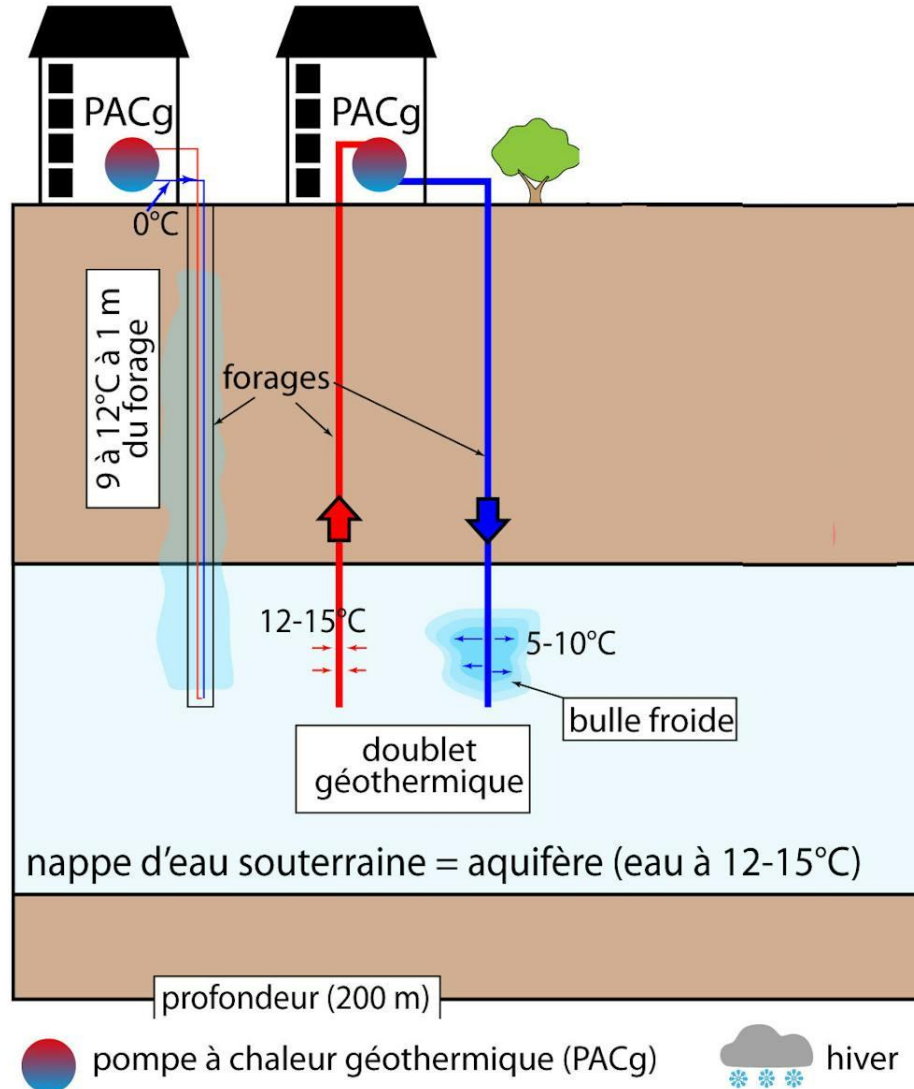
Géothermie de surface «classique»

pour une utilisation directe des calories
pour le chauffage

PAC sur sonde
géothermique
verticale



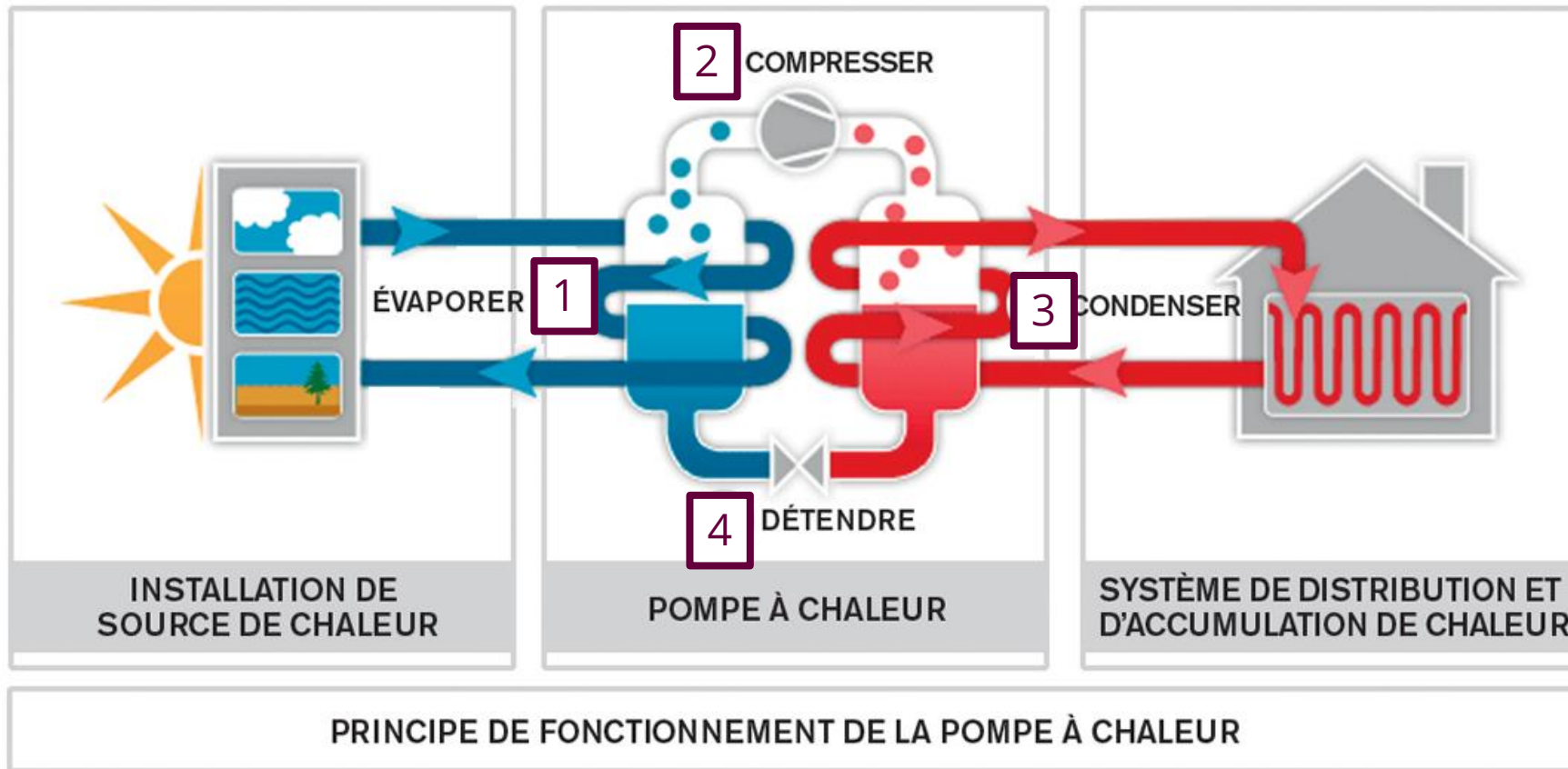
PAC sur nappe



Brigaud, 2025

III. 1 La géothermie de surface (<200 m de profondeur, 10-30°C)

III.1. La géothermie de surface (<200 m de profondeur, 10-30°C)



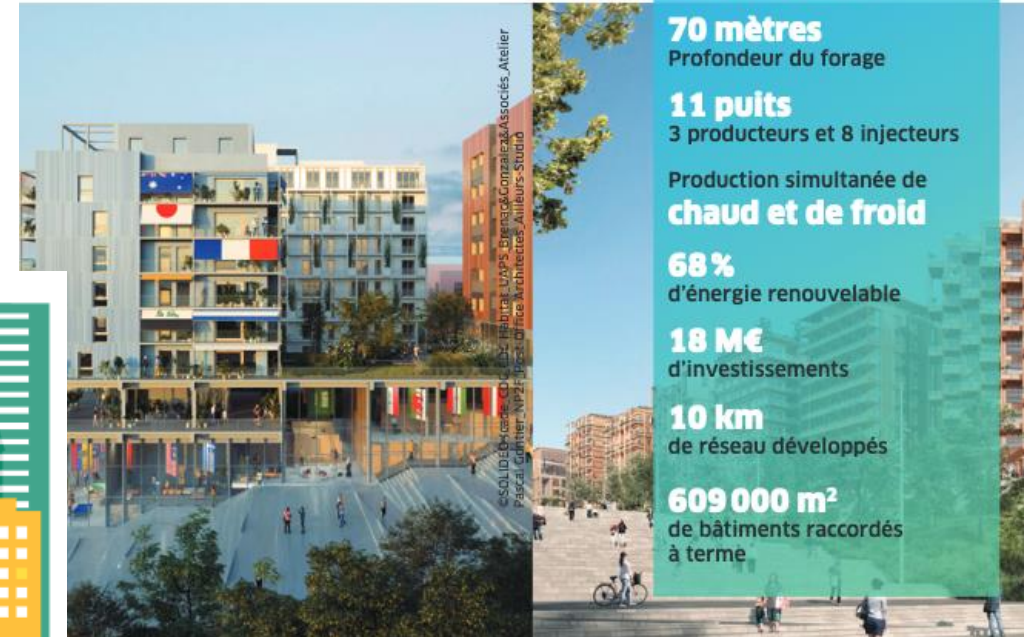
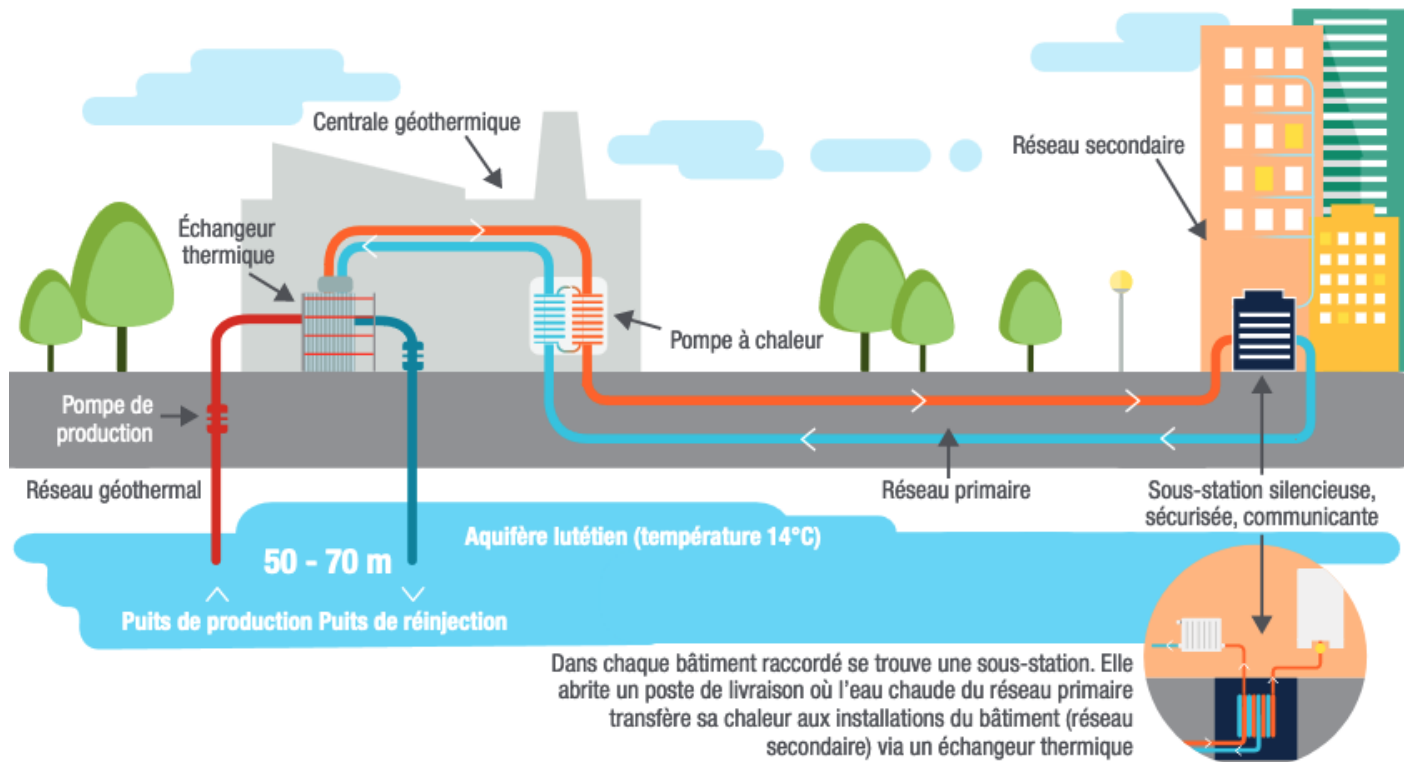
Pompe à chaleur, pour 1kWh électrique qui alimente le moteur de la pompe, la PAC en restitue 4kWh sous forme de chaleur : coef de performance 4

En passif, eau refroidit le circuit de la pompe à chaleur, coef perf de 50 ! évite îlot de chaleur en été

- 1- liquide frigorigène s'évapore à basse pression au contact de la source de chaleur (capteur horizontal, verticale ou forage sur nappe), absorbant ses calories
- 2- Un compresseur augmente la pression du gaz et donc sa température. Ce gaz transfère sa chaleur à l'intérieur de l'habitat
- 3- La vapeur du fluide frigorigène à haute pression est condensée à haute température par dissipation de sa chaleur dans l'émetteur (plancher chauffant, radiateurs, ventilo-convecteur), gaz retourne à l'état liquide
- 4- le fluide frigorigène liquide est détendu depuis une forte pression à une pression plus faible, chute de température

Géothermie de surface sur nappe

quartier Pleyel et du Village des olympique



III.2. La géothermie profonde

- Basse température (200 m à 2000 m, 30-100°C)
- Géothermie profonde haute température, haute enthalpie (température > 100°C)

Notion de doublet

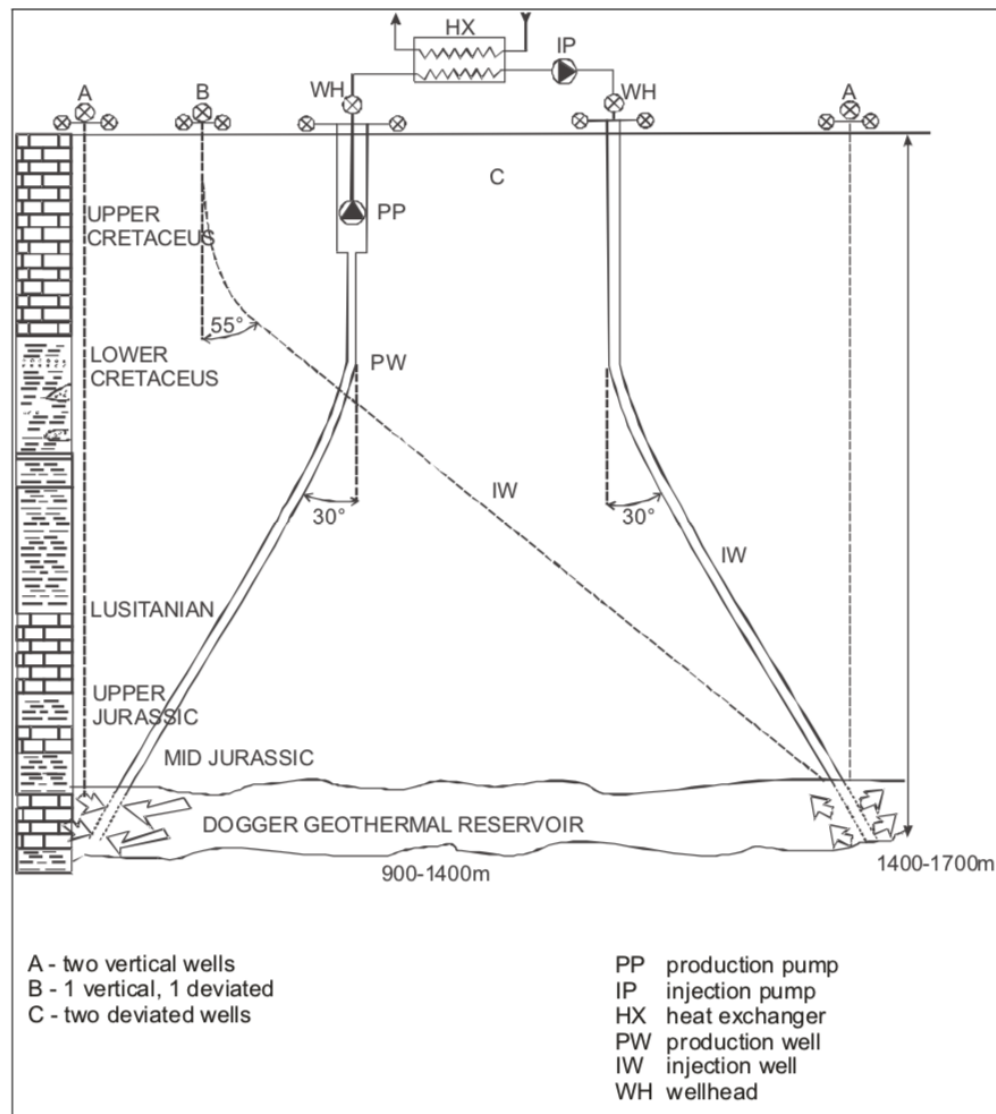


Figure I-3 – Schéma d'un doublet géothermique classique dans le réservoir du Dogger (Ungemach and Antics, 2006).

Historique dans le bassin de Paris
1^{er} doublet à Melun l'Almont
En 1969

In Thomas, 2022

Usage direct de la chaleur

Schéma d'une installation-type de géothermie associée à un réseau de chaleur

- Le concept de doublet géothermique

- un puits de pompage
- un puits de réinjection
- des échangeurs pour prélever les calories
- un réseau de distribution
- Puissance max délivrée: 10 MW
- Eau entre 60-80°C
- Energie géothermale annuelle produite par un doublet Dogger: 40 GWh
- 46 fonctionnent en Ile-de-France (1.7 TWh/an)
- Un réseau de chaleur / doublet géothermique chauffe environ 5000 logements (230 000 logements)
- 6-7% de la population d'Ile-de-France chauffés par géothermie
- Géothermie couvre 60 à 95% de la centrale

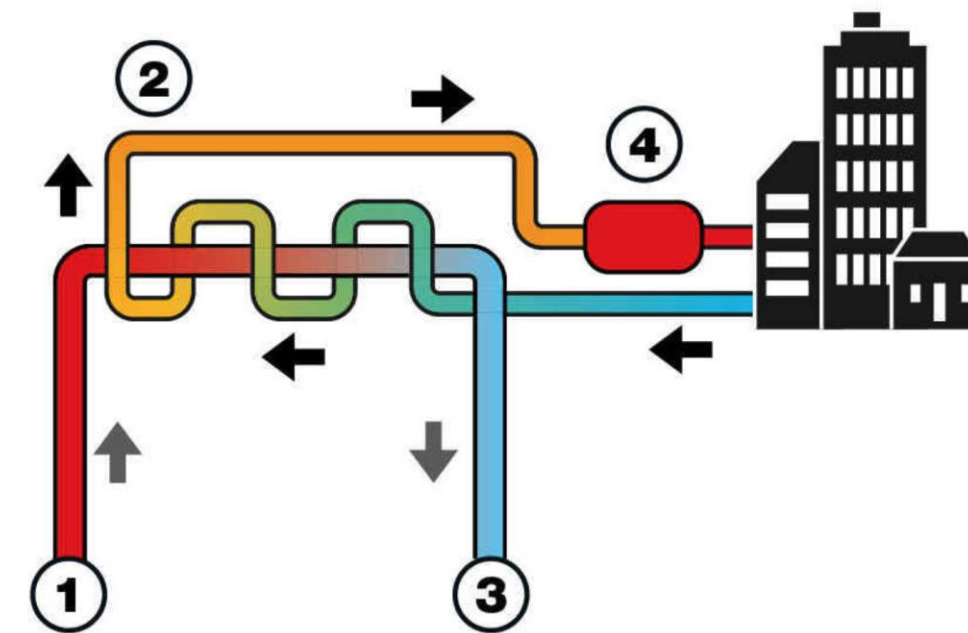


Schéma explicatif de la géothermie profonde

1. De l'eau chaude est puisée des profondeurs...
- 2... elle réchauffe l'eau du réseau...
- 3... avant d'être renvoyée dans le sous-sol.
4. Un peu de chaleur est ajoutée si besoin est.

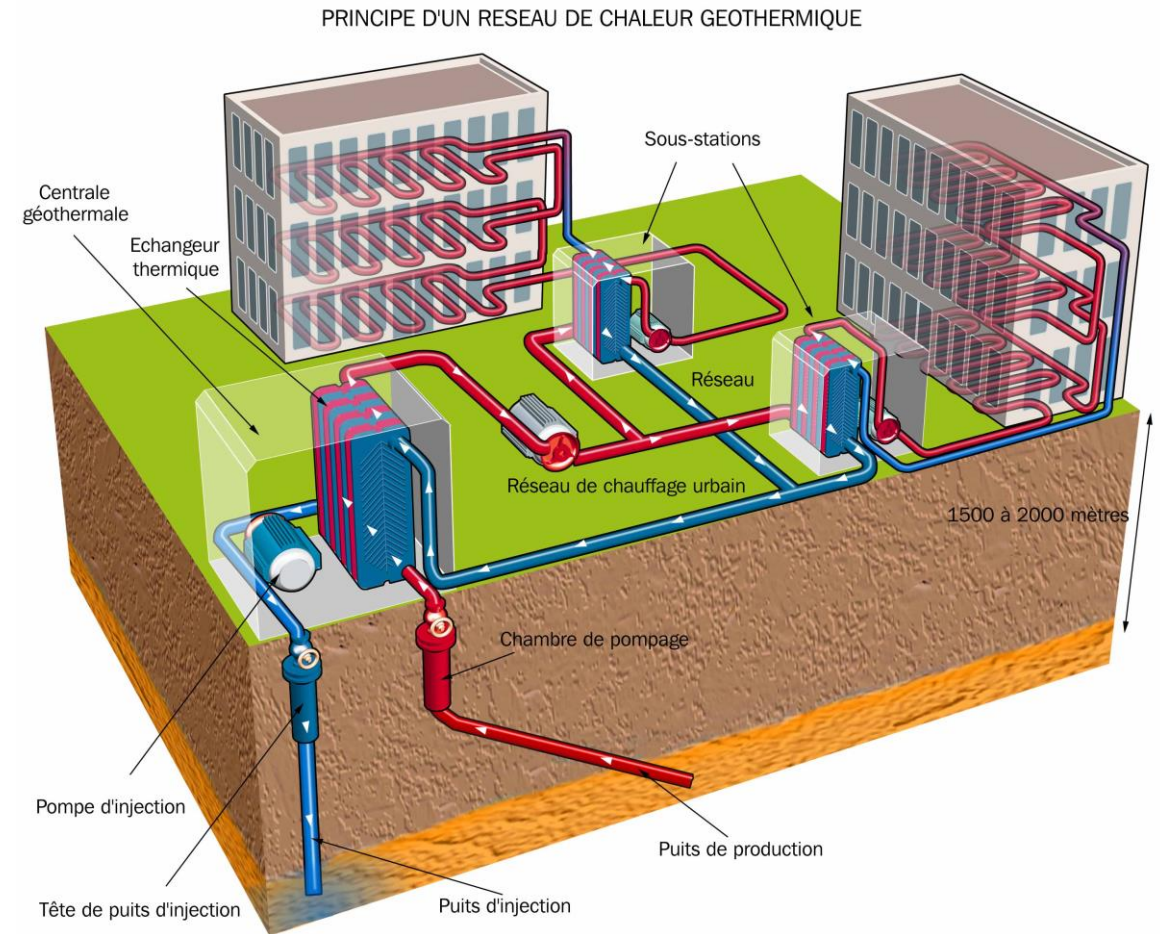
Source S&V 2024

Usage direct de la chaleur

Schéma d'une installation-type de géothermie associée à un réseau de chaleur

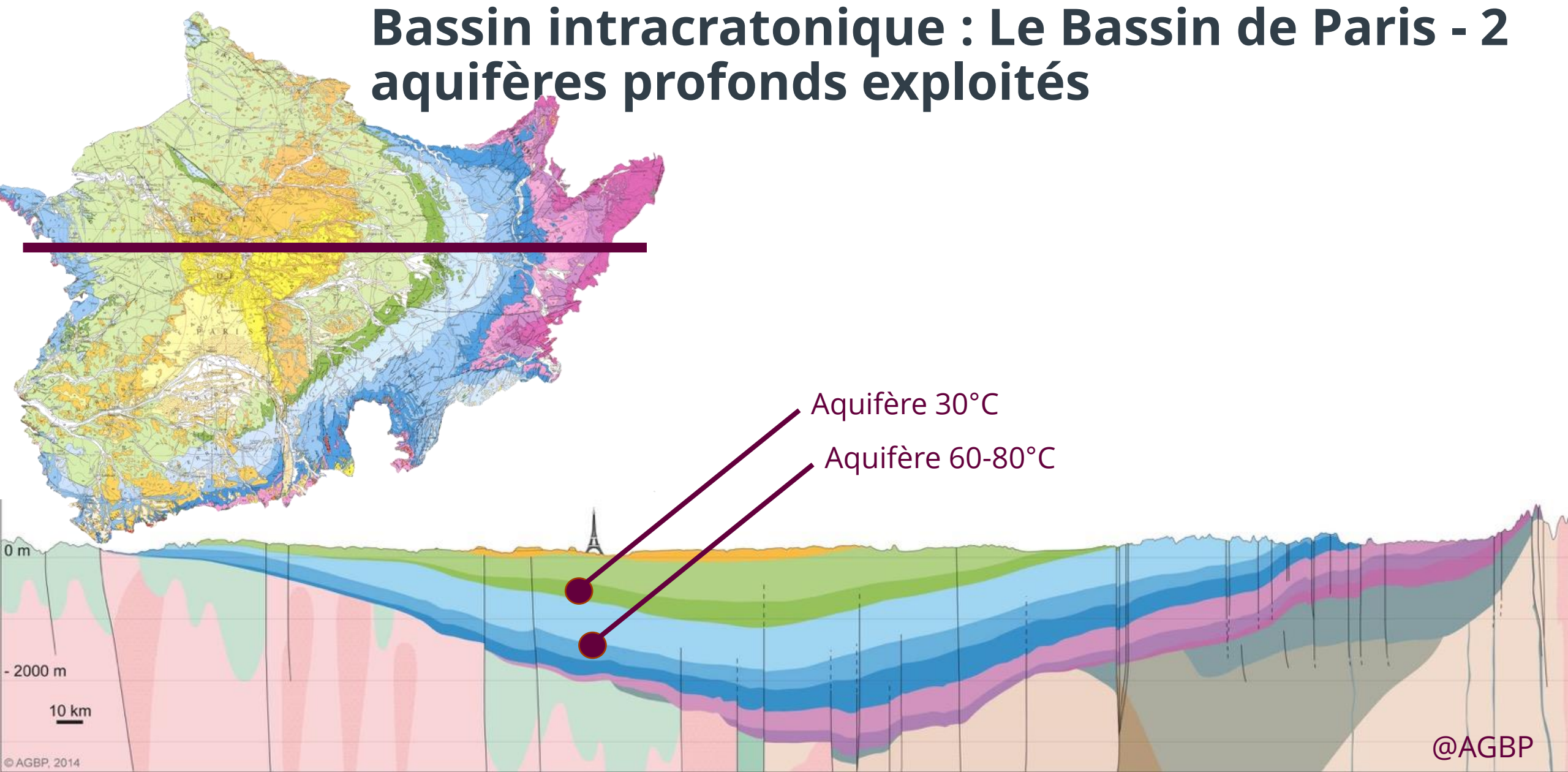
- Le concept de doublet géothermique

- un puits de pompage
- un puits de réinjection
- des échangeurs pour prélever les calories
- un réseau de distribution
- Puissance max délivrée: 10 MW
- Eau entre 60-80°C
- Energie géothermale annuelle produite par un doublet Dogger: 40 GWh
- 49 fonctionnent en Ile-de-France (1.7 TWh/an)
- Un réseau de chaleur / doublet géothermique chauffe environ 5000 logements (230 000 logements)
- 6-7% de la population d'Ile-de-France chauffés par géothermie
- Géothermie couvre 60 à 95% de la centrale



Source BRGM

Bassin intracratonique : Le Bassin de Paris - 2 aquifères profonds exploités



Bassin intracratonique : Le Bassin de Paris - 2 aquifères profonds exploités

Usage direct de la chaleur (état 2018)

● Opérations géothermales pour la production de chaleur (en fonctionnement)

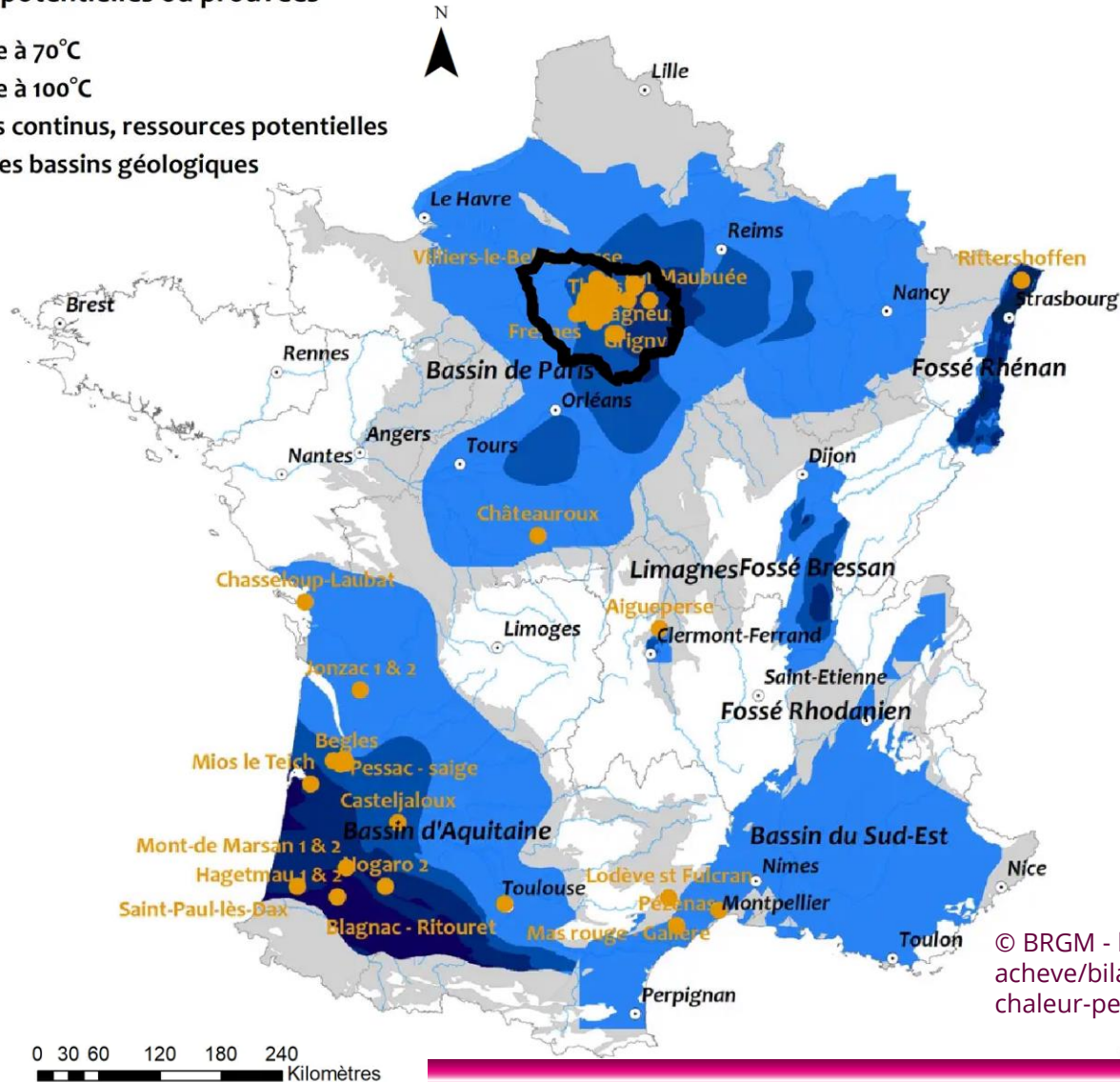
Ressources potentielles ou prouvées

■ supérieure à 70°C

■ supérieure à 100°C

■ Réservoirs continus, ressources potentielles

■ Emprise des bassins géologiques



- 55 opérations en Île-de-France (Afpg, 2023)
- 49 visent les Calcaires du Jurassique Moyen (55° - 85°C)

© BRGM - <https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/bilan-filiere-geothermie-profonde-production-chaleur-periode-2007-2018>

Bassin de Paris

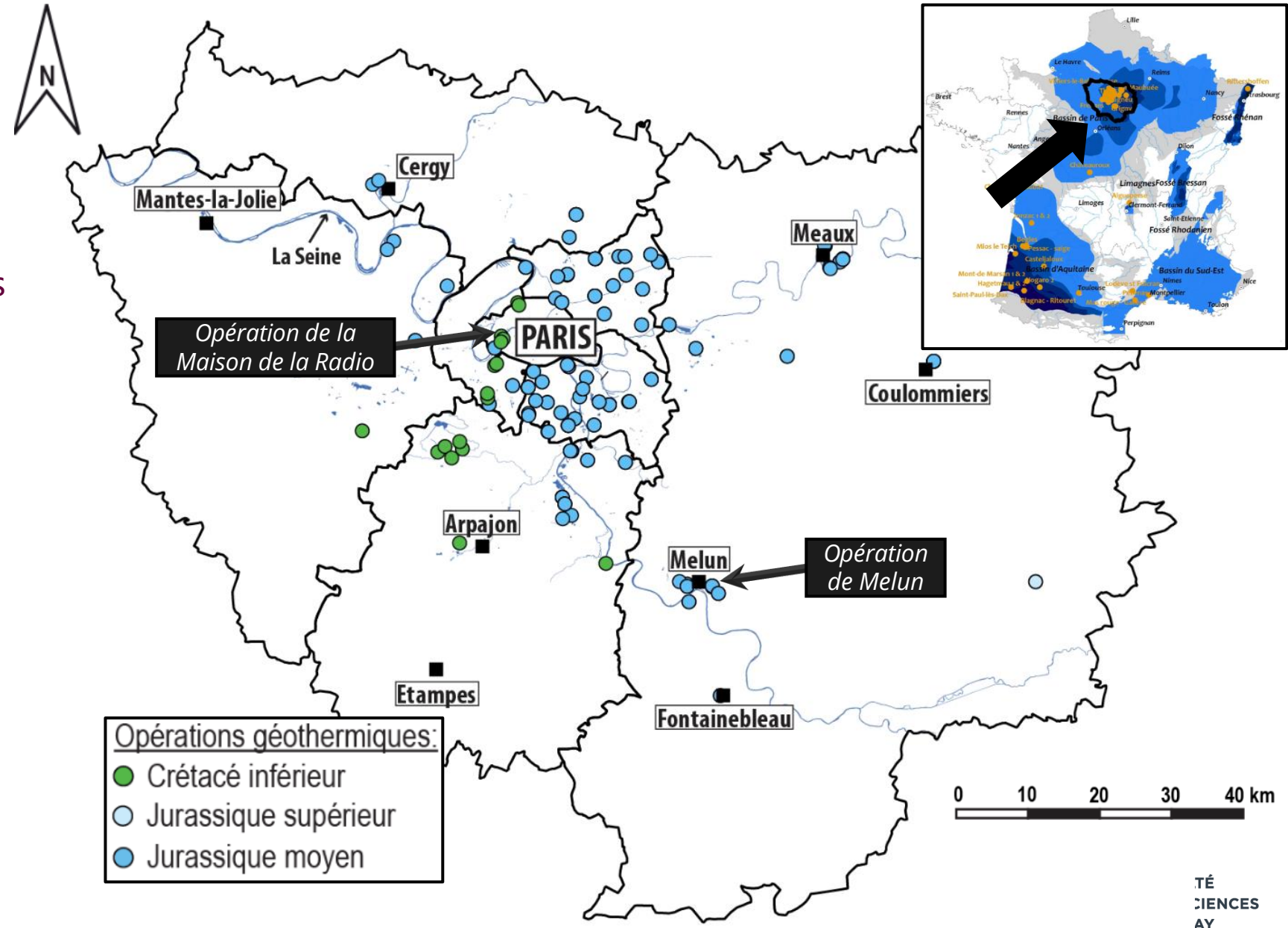
La géothermie en Ile-de-France

En **Ile-de-France**, ces ressources sont exploitées dans 2 aquifères géothermiques :

- Les sables du **Crétacé inférieur** depuis 1960
- Les calcaires du **Jurassique moyen (Dogger)** depuis 1969

Housse and Maget (1976); Maget (1981); Coudert and Jaudin (1988); Rojas et al. (1989); Ungemach and Antics (2006); Lopez et al. (2010); Boissavy and Grières (2014)

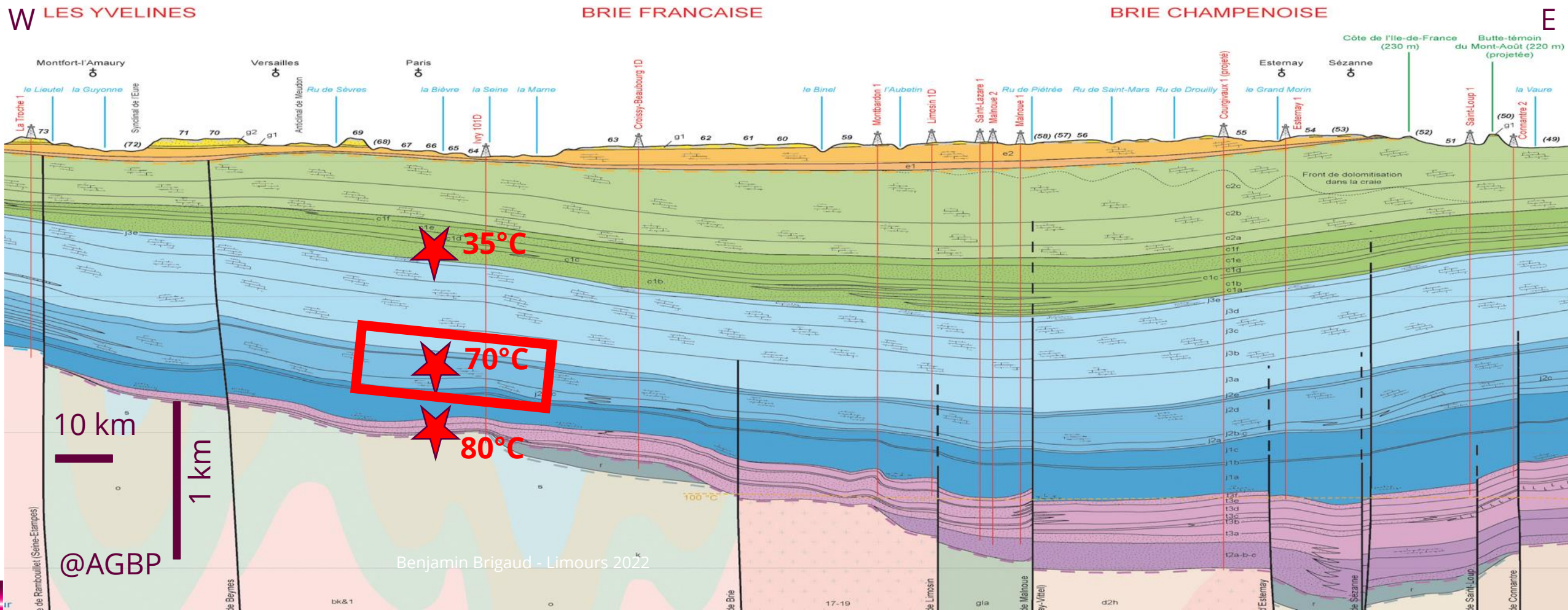
Catinat, 2023



Le bassin de Paris - 2 aquifères profonds exploités

Calcaires du Jurassique moyen (aussi dénommés « Dogger »)

- 55-80 °C
- ~1500 m de profondeur

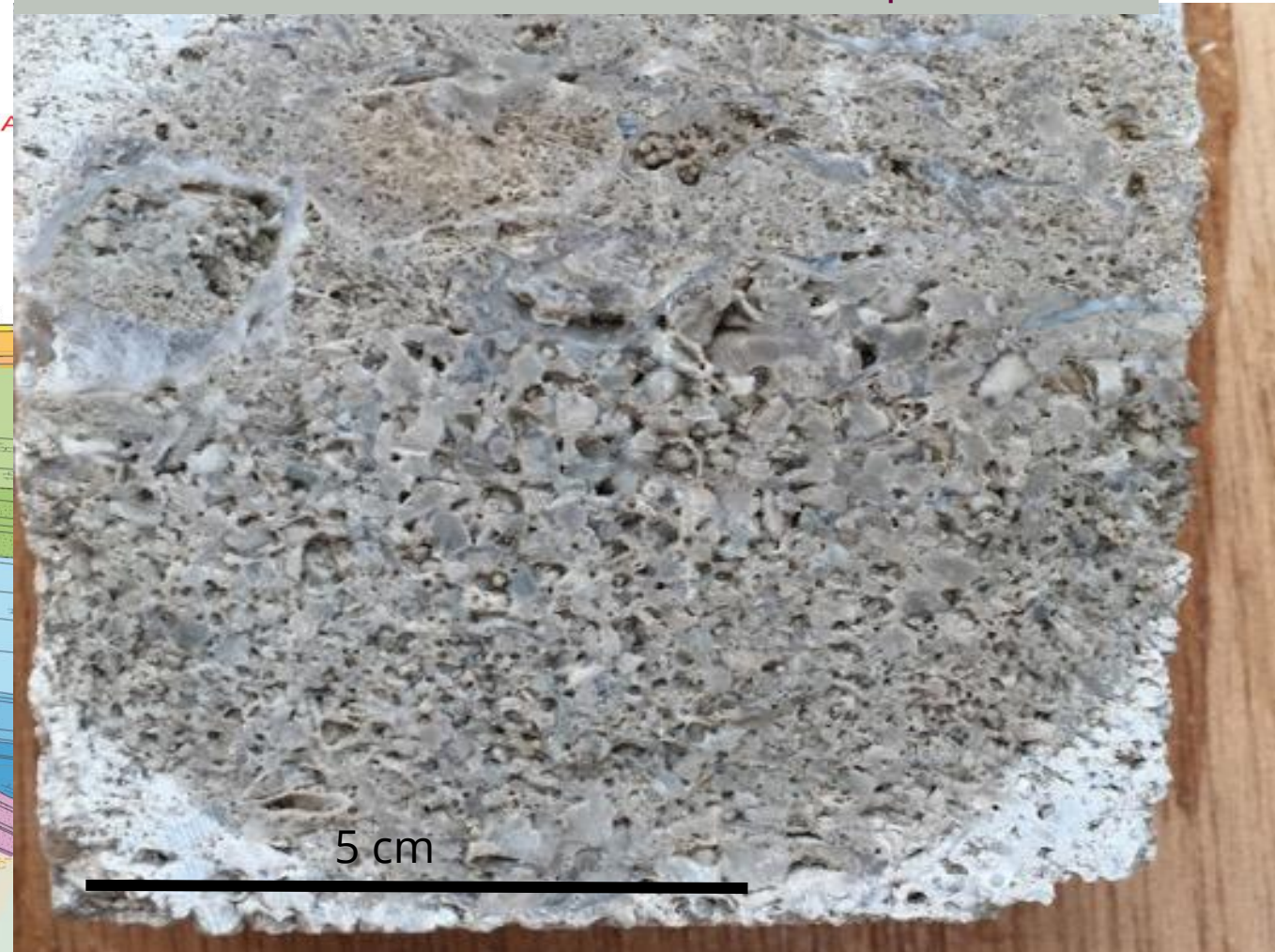
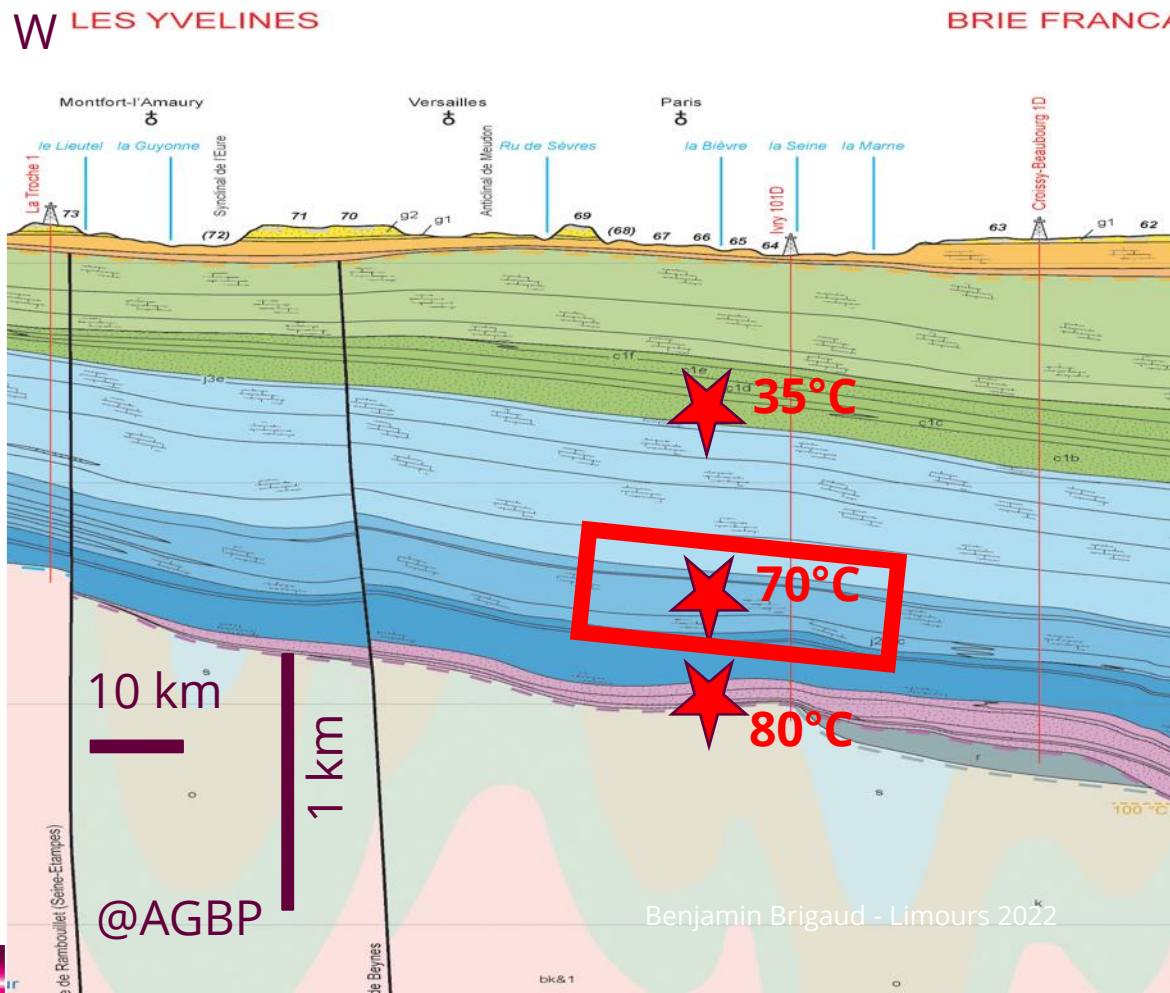


Le bassin de Paris - 2 aquifères profonds exploités

Calcaires du Jurassique moyen (aussi dénommés « Dogger »): un calcaire pouvant être très poreux et perméable

- 55-80 °C
- ~1500 m de profondeur

Carotte de Vers-Saint-Denis – 1700 m de profondeur

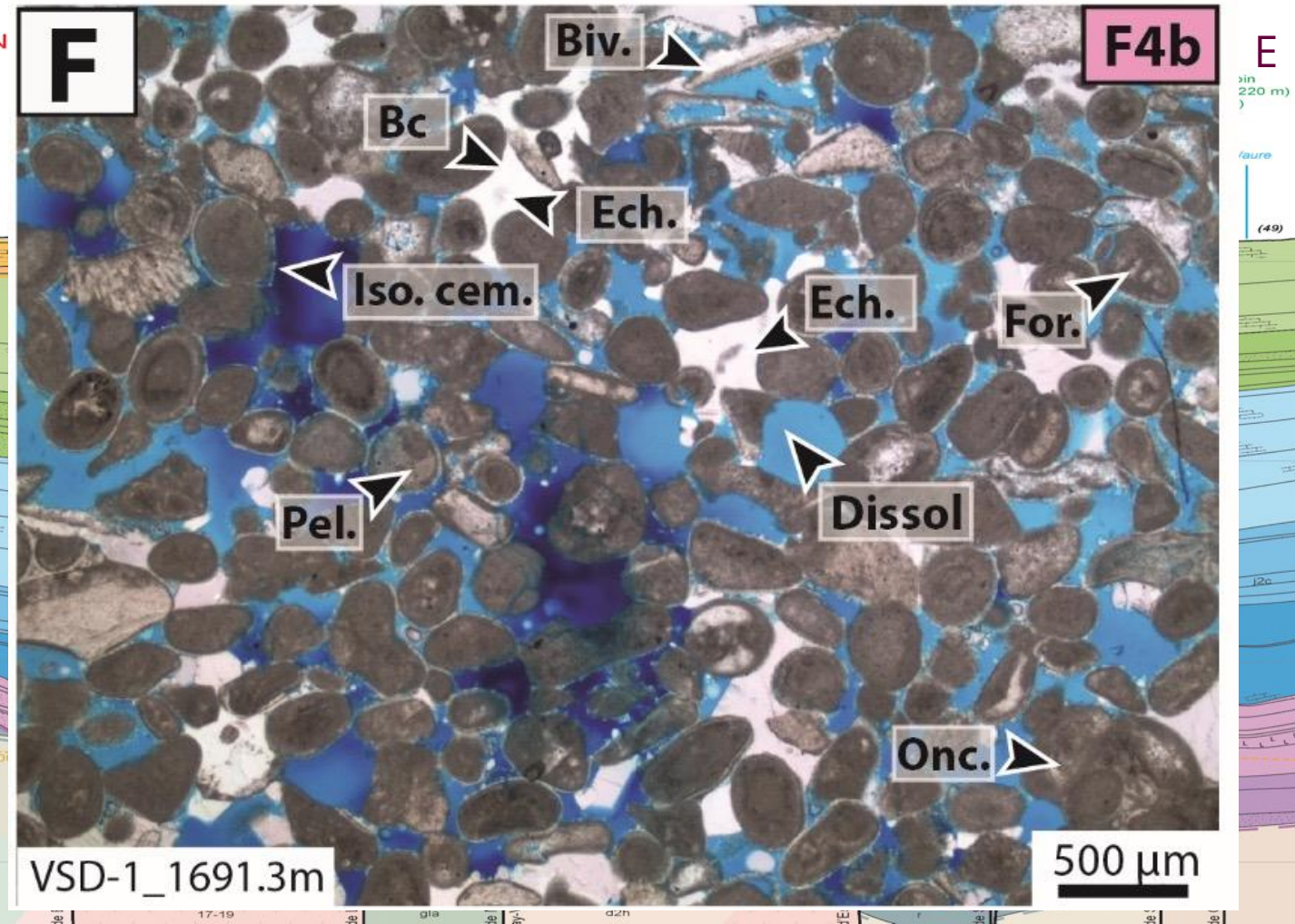
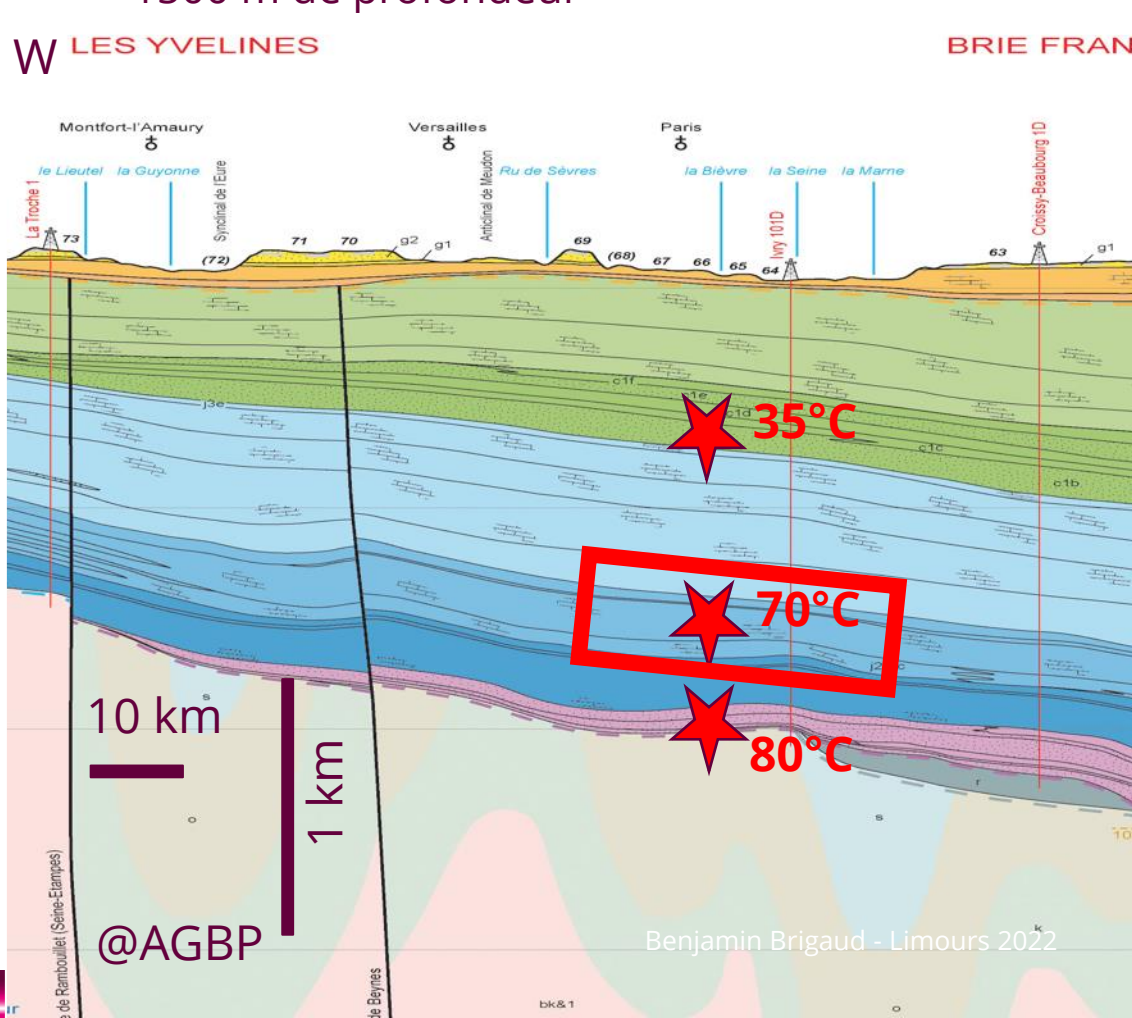


Le bassin de Paris - 2 aquifères profonds exploités

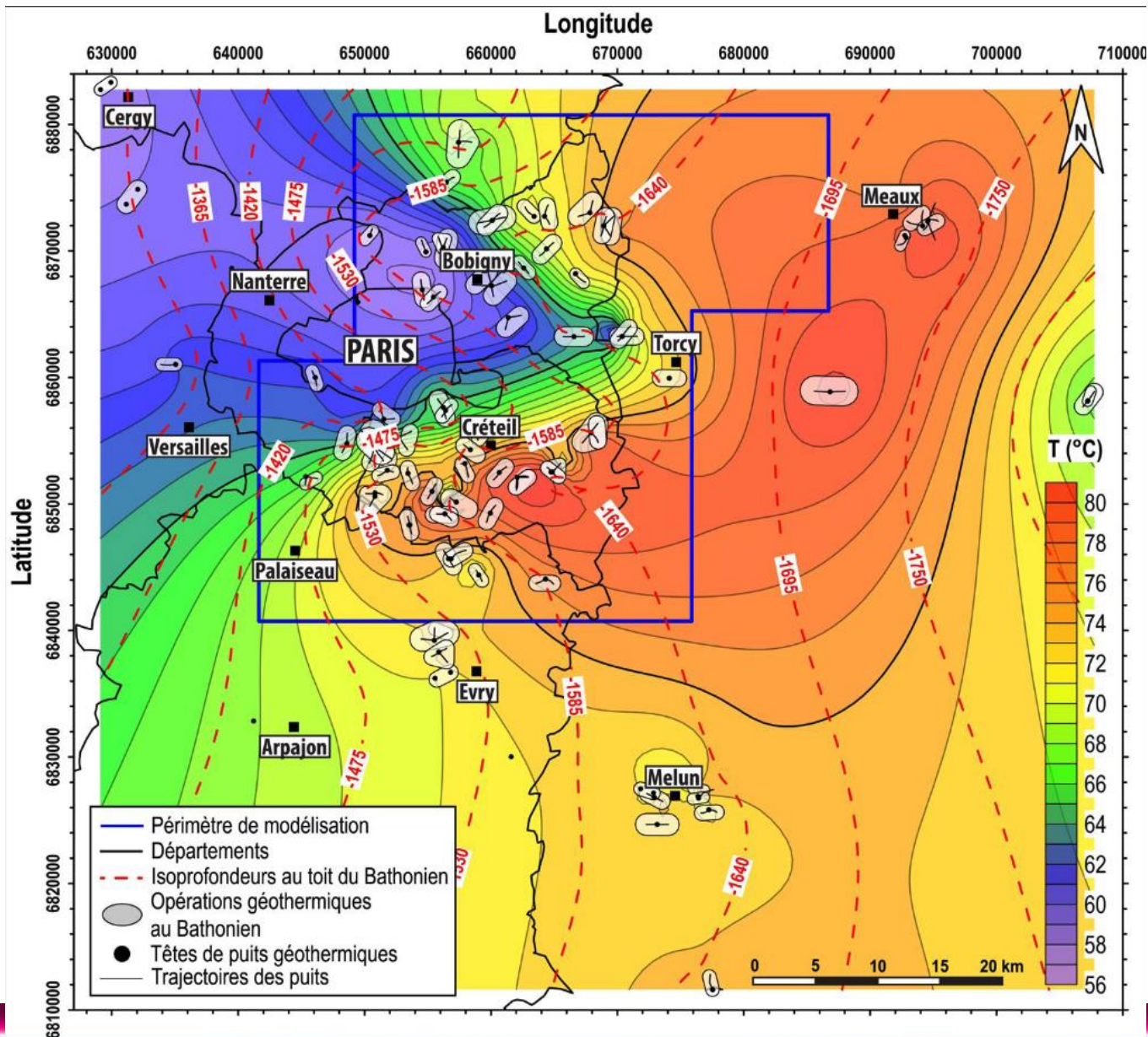
Calcaires du Jurassique moyen (aussi dénommés « Dogger »): un calcaire pouvant être très poreux et perméable

- 55-80 °C
- ~1500 m de profondeur

Carotte de Vers-Saint-Denis – 1700 m de profondeur

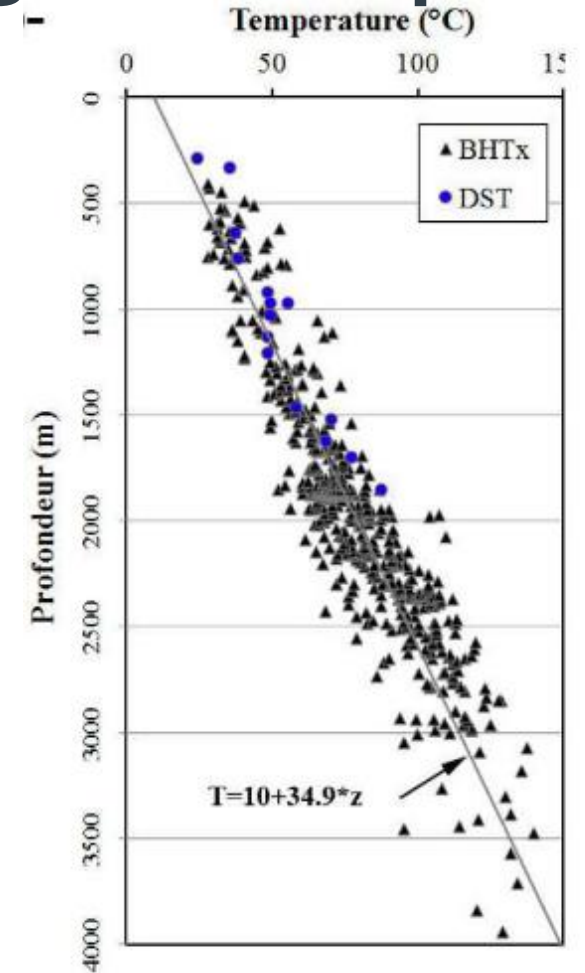
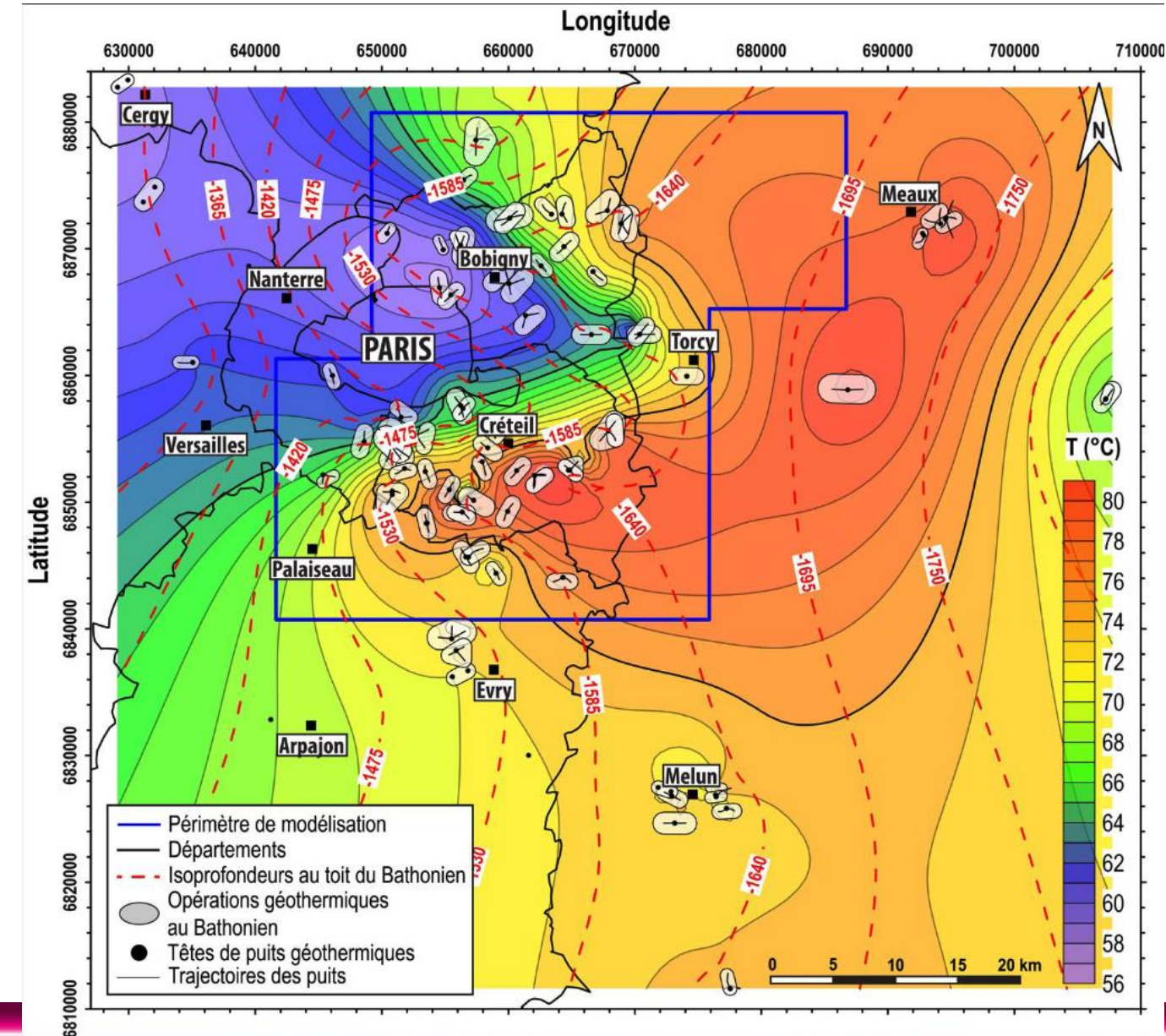


Température du réservoir



Catinat, 2023

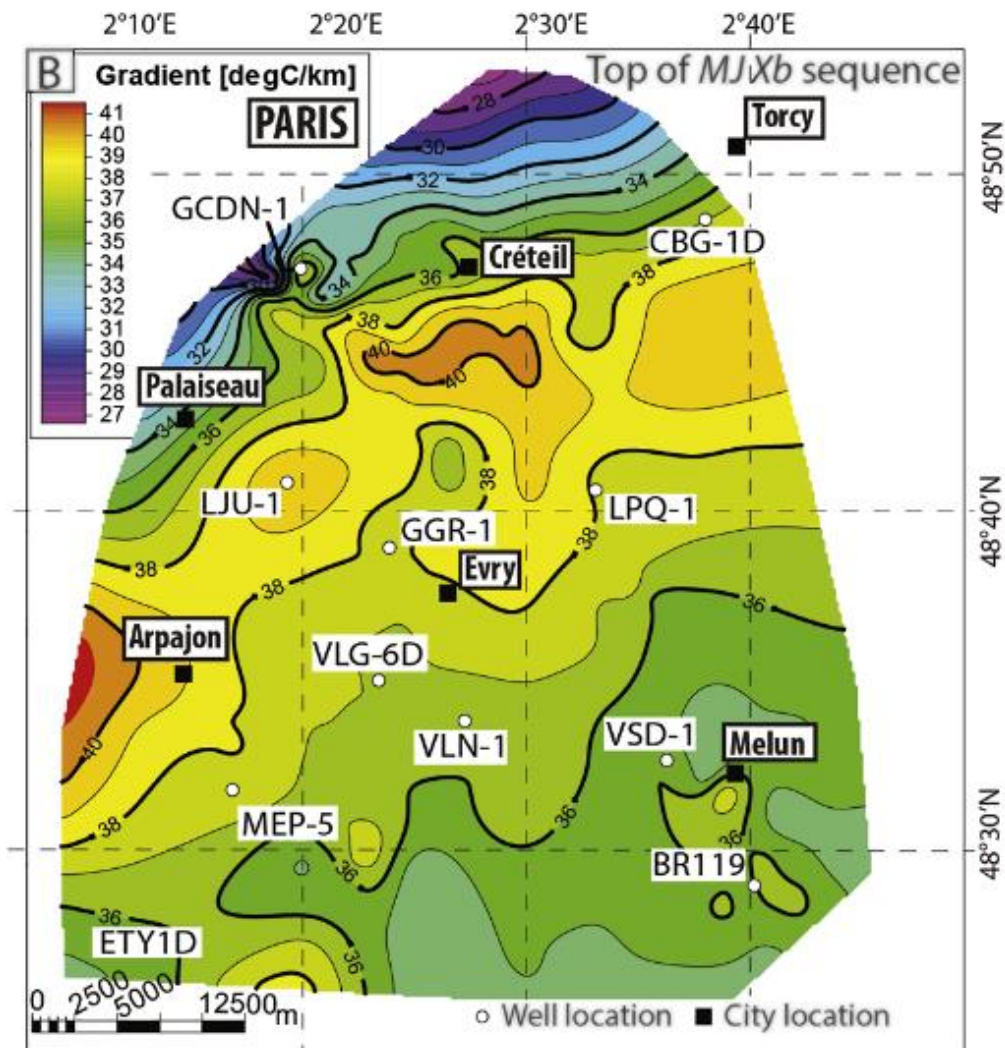
Température du réservoir et gradient géothermique



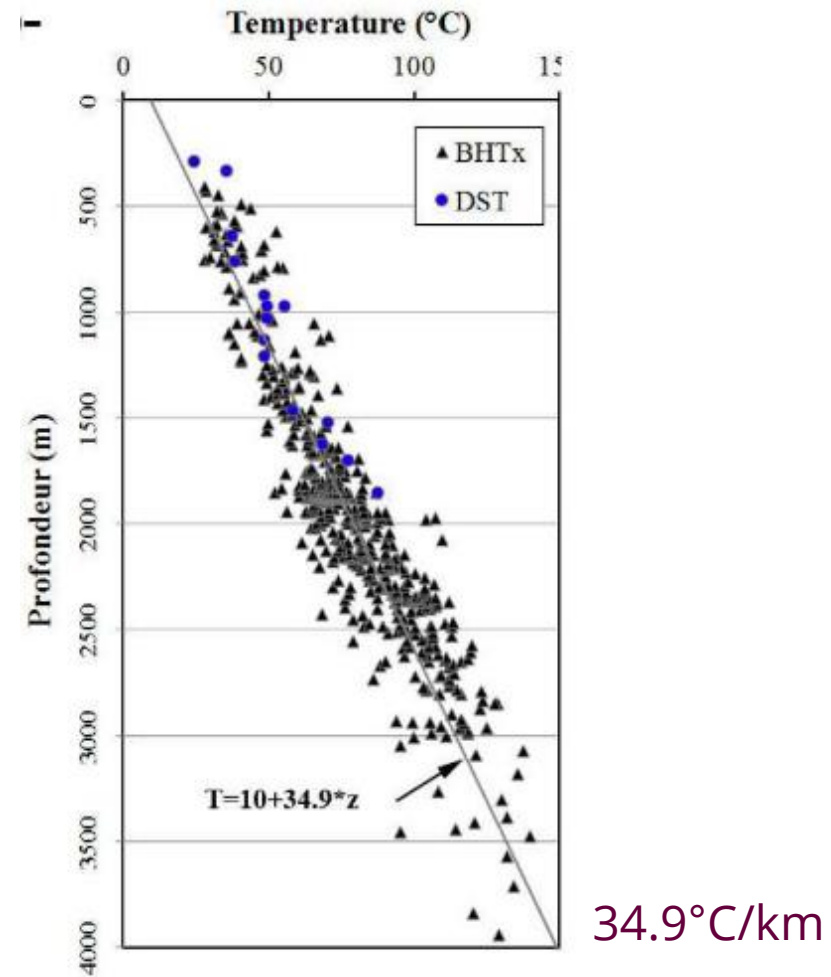
Bonté et al. (2013)

Catinat, 2023

Bassin de Paris: Gradient géothermique



Thomas et al. 2023



Bonté et al. (2013)

L'implantation – les centrales



Ris Orangis



Cachan



IV. Les défis de la géothermie pour régler les problèmes rencontrés et les risques associés

IV.1 Risques sur les installations

Blue Lagoon with Svartsengi plant, Iceland (Picture: Vestman, (c) CC BY 2.0)





Lava flow over Grindavik road at the intersection to the Blue Lagoon, Iceland (source: Icelandic Road Authority/ Vegagardin via Facebook (<https://www.facebook.com/Vegagerdin>))

- Blue Lagoon with Svartsengi plant, Iceland





**Lava hitting a hot water pipeline
and flowing onto the road leading to
the Blue Lagoon, in Grindavik,
Iceland (Marco Di Marco/AP)**

<https://www.irisht Examiner.com>

IV.2 Risques de sismicité induite : Nord de Strasbourg, test de mise en production, fin 2020 (magnitude 3.5, arrêt de la ré-injection)

ÉNERGIES • ÉNERGIES FOSSILES

Partage    

Strasbourg de nouveau réveillé par un séisme « induit », provoqué par l'activité humaine

La secousse d'une magnitude de 3,9, la plus forte de ces derniers mois, survient après l'arrêt définitif d'un projet de géothermie profonde, à l'origine d'une série de séismes cet hiver.

Le Monde avec AFP •

Publié le 26 juin 2021 à 08h54 - Mis à jour le 29 juin 2021 à 13h03 •  Lecture 2 min.

PLANÈTE • ÉNERGIES RENOUVELABLES

Partage  

Des experts pointent la responsabilité de Fonroche Géothermie dans les événements sismiques de 2019 et 2020 en Alsace

Le comité de chercheurs, mis en place par la préfecture en février 2021, estime que la « mise en pression en continu » dans l'un des deux puits de l'entreprise, ainsi que « le cumul des volumes injectés » a bien entraîné l'instabilité des failles à proximité du site.

Par Rémi Barroux

Publié le 07 mai 2022 à 14h00 •  Lecture 2 min.

 Article réservé aux abonnés



Cette photo de 18 novembre 2020 montre le puits géothermique de Fonroche Géothermie en Alsace. FREDERICK PLANI / L'AS



PLANÈTE • SCIENCES

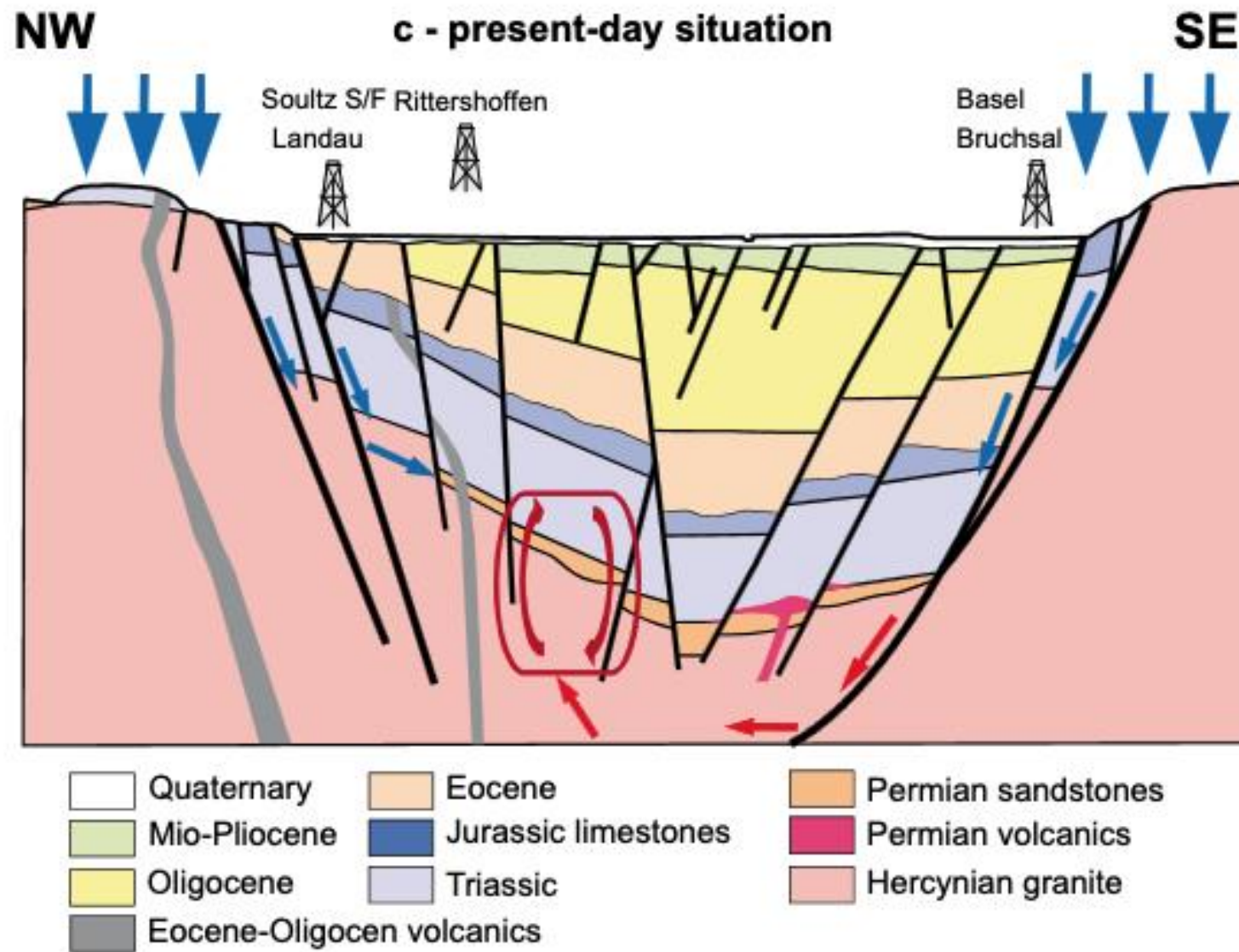
Partage    

Géothermie à Strasbourg : la préfecture annonce deux « écarts » commis par l'exploitant

La préfecture du Bas-Rhin a présenté mercredi les conclusions d'une enquête administrative diligentée après des séismes provoqués par l'activité d'une centrale géothermique. L'exploitant conteste ces conclusions.

Le Monde avec AFP •

Publié le 30 décembre 2020 à 22h06 - Mis à jour le 31 décembre 2020 à 01h13 •  Lecture 2 min.



IV.3 Risques géologique d'échec

Puits sec !

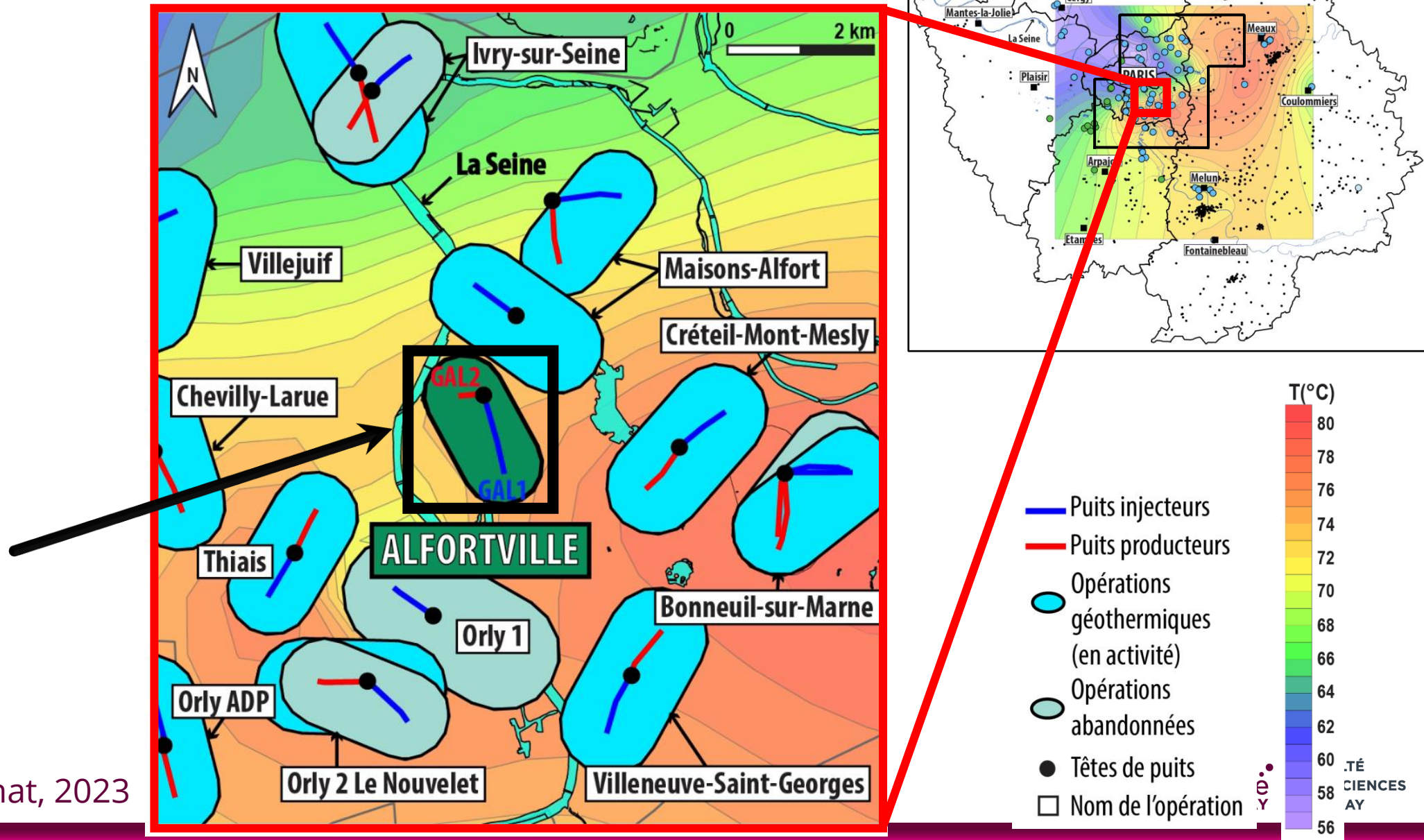
- Expérience récente à Grigny, puits Grigny-2

III.4 Problèmes d'exploitation

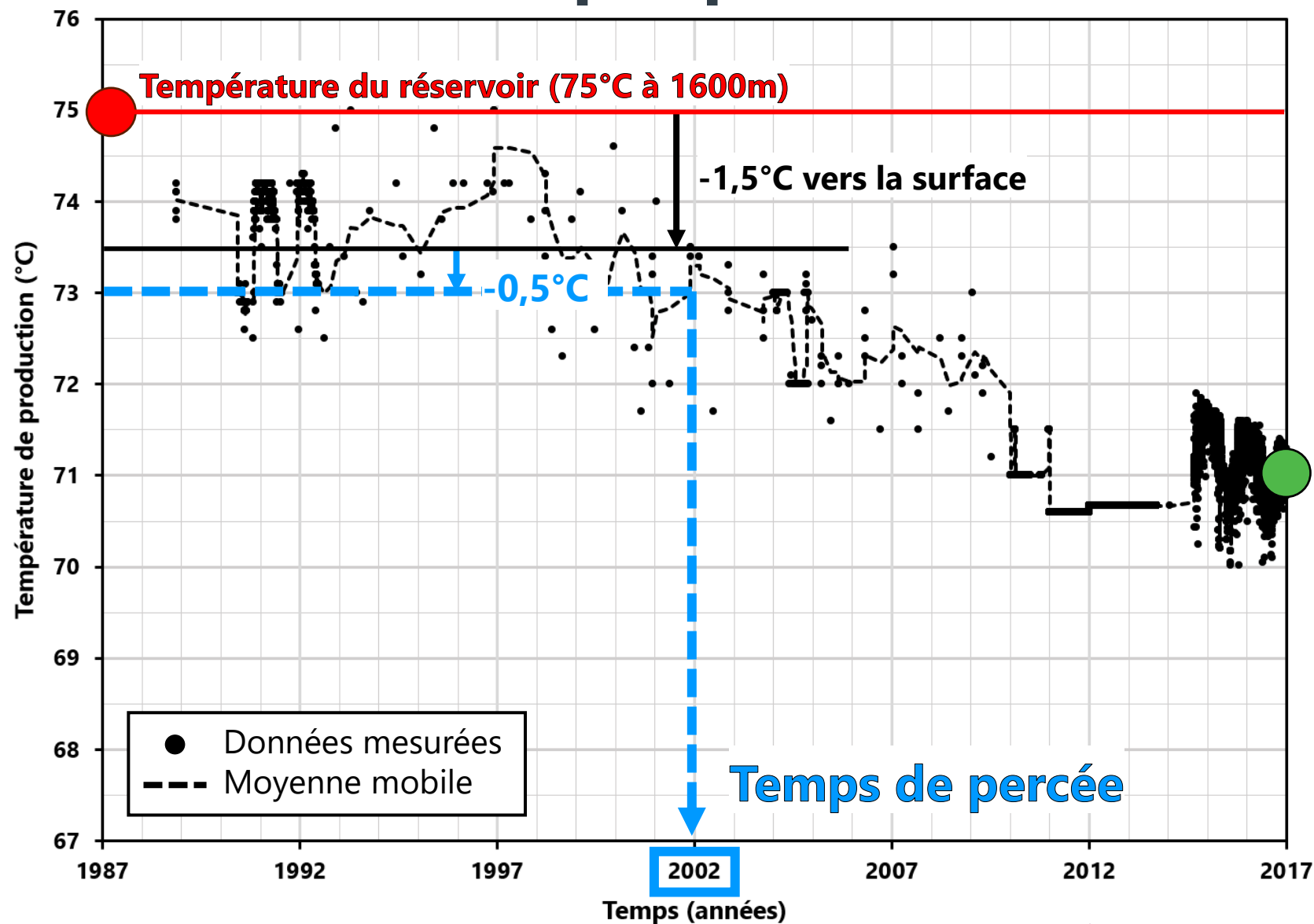
Percée thermique précoce !

- Le puits producteur se refroidit trop rapidement

Percée thermique précoce !



Percée thermique précoce !



Catinat, 2023

Données d'exploitation

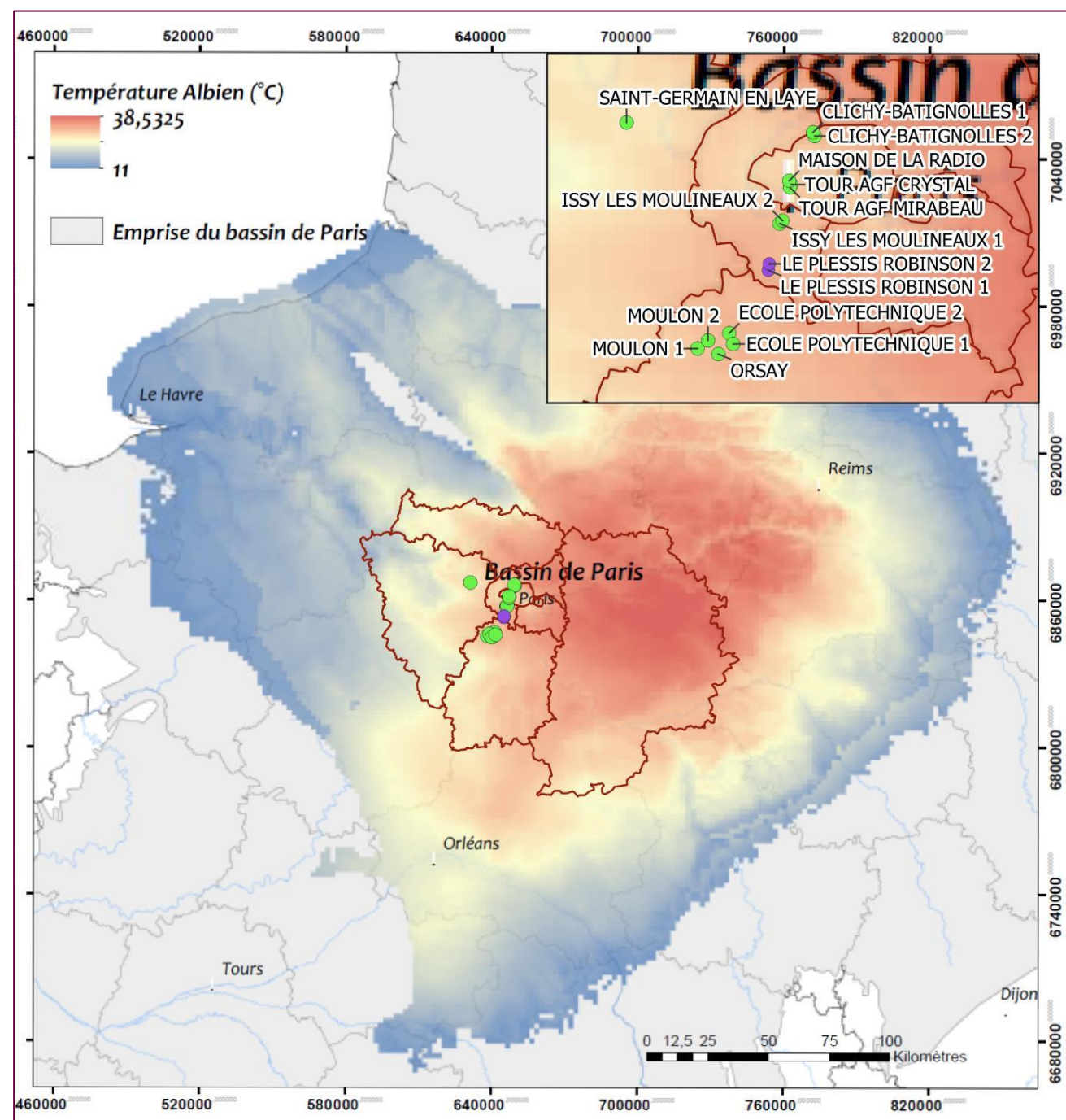
- Percée thermique observée : ~ **15 ans** après la mise en service du doublet
- Température à 30 ans : **71 °C** soit ~ **72,5 °C** (+1,5°C) dans le réservoir

Ces deux valeurs sont utilisées pour valider les résultats de simulations

Perte d'injectivité

- Met en péril les systèmes

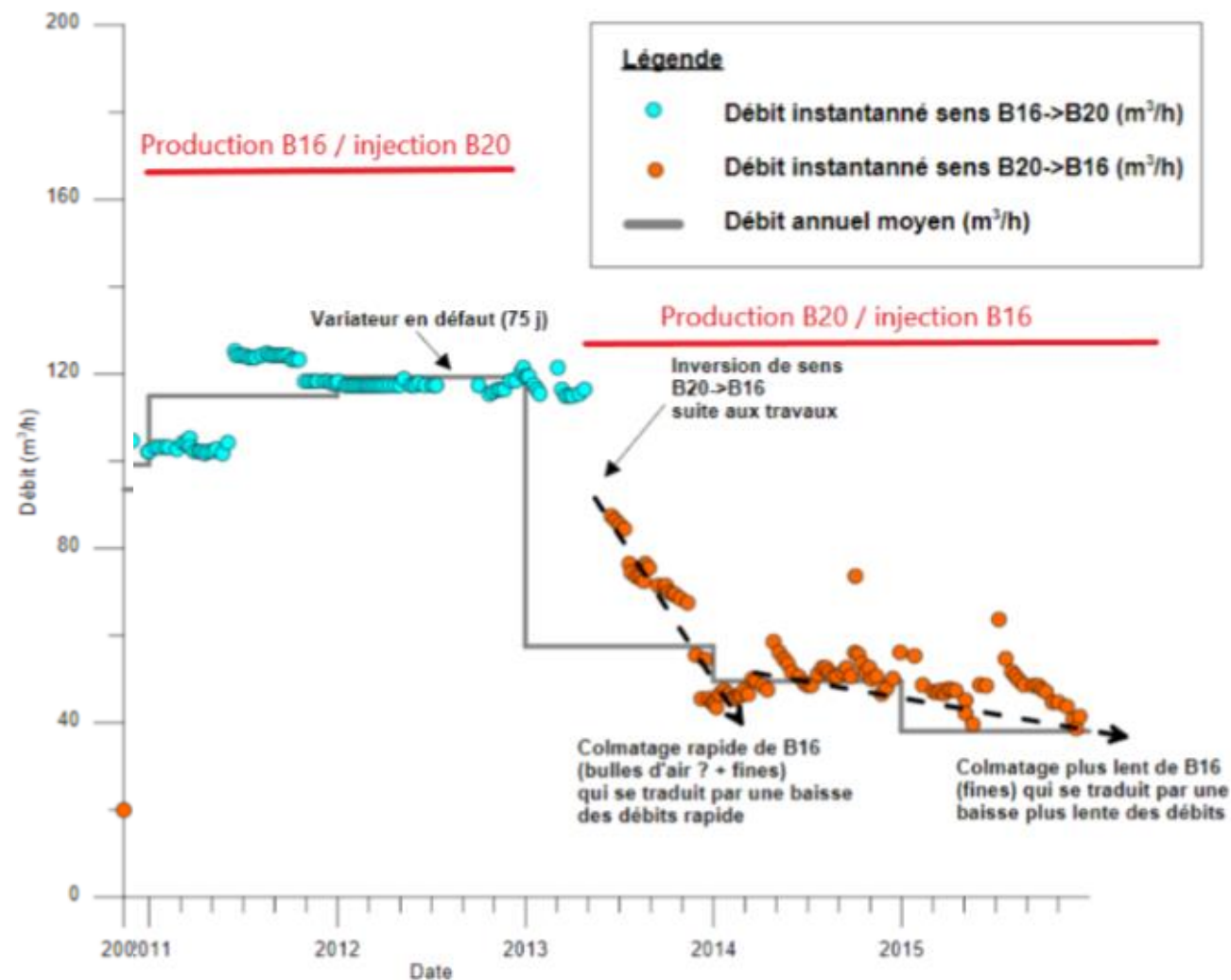
Mas, 2024



Perte d'injectivité

- Met en péril les systèmes

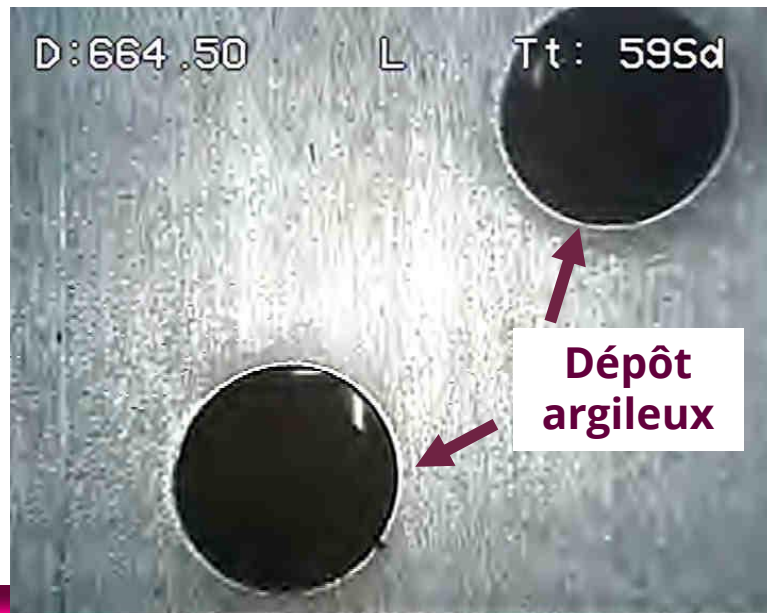
Tours AGF - Paris



Maurel et al., 2020

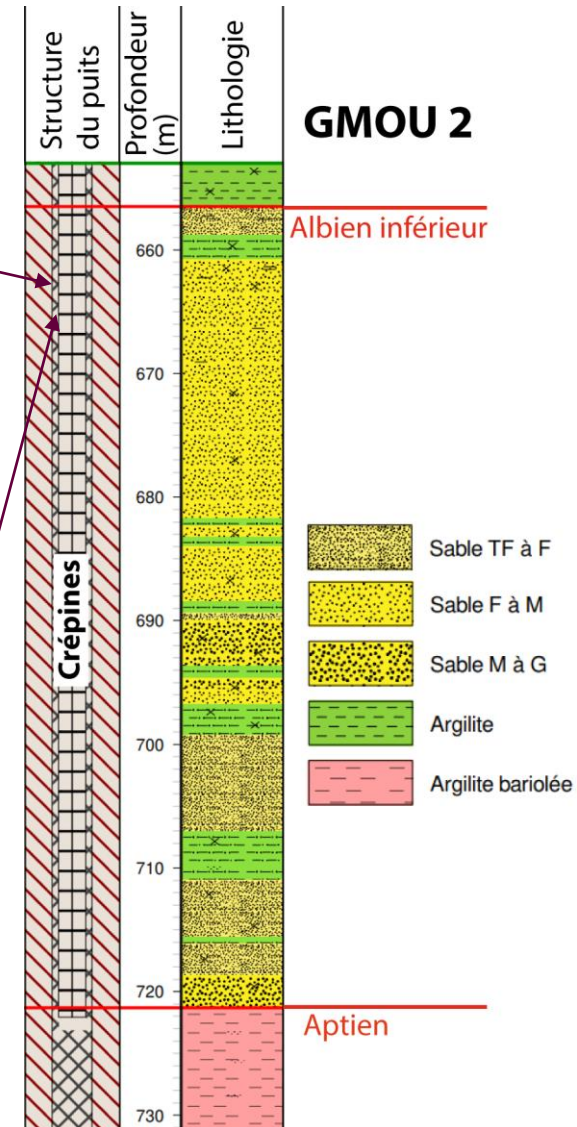
Colmatage des crépines – puits Plateau de Saclay

Représentation homogène d'un réservoir hétérogène



Crépine avec
20% de
dépôts
argileux

Crépine
bouchée

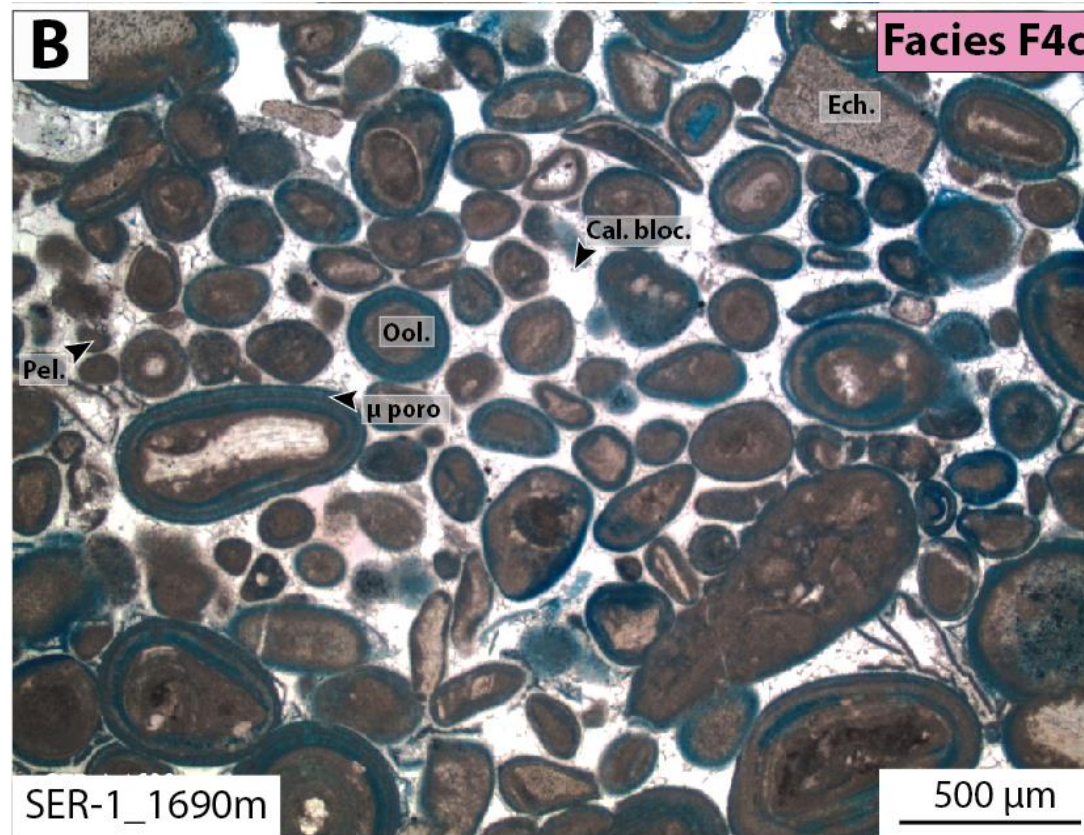
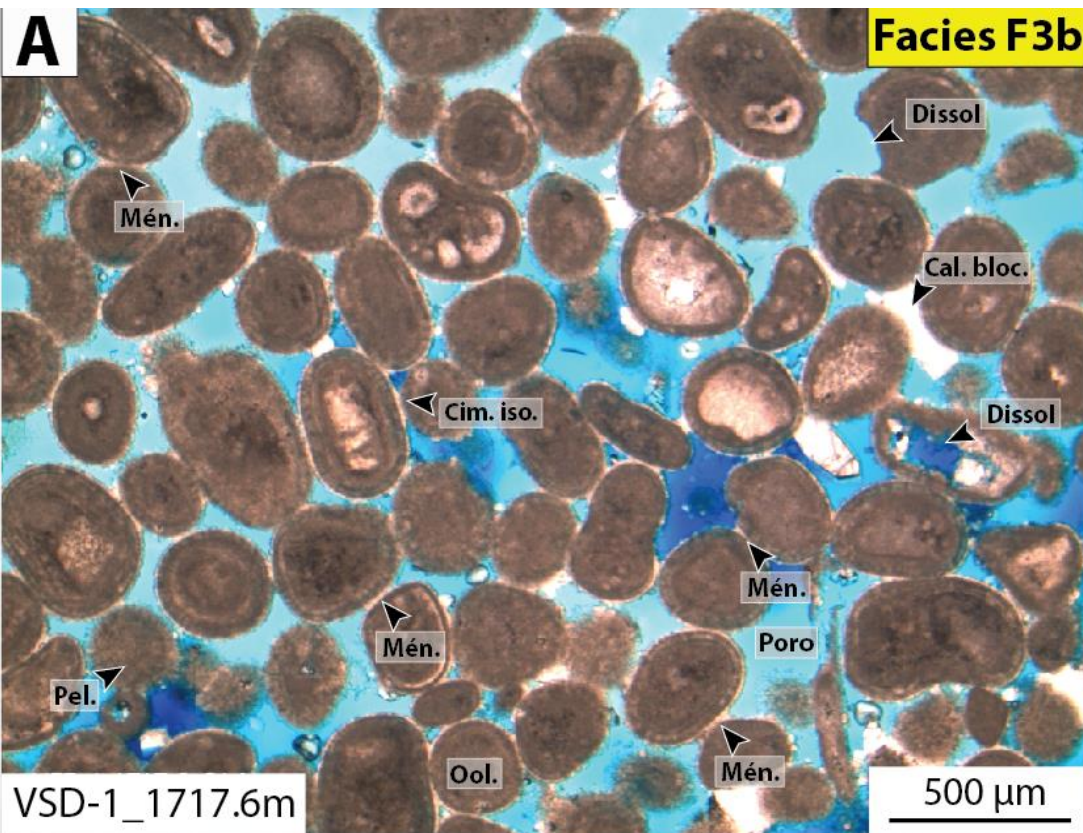


Etude de la Société des Diagraphies
et Perforations pour Geofluid

V. La Recherche & Développement en géothermie

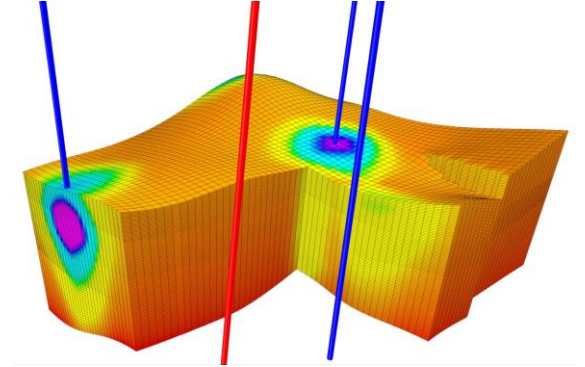
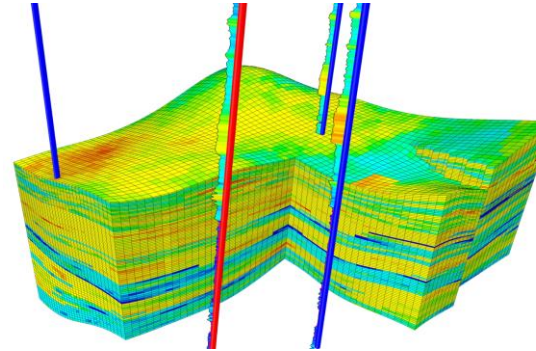
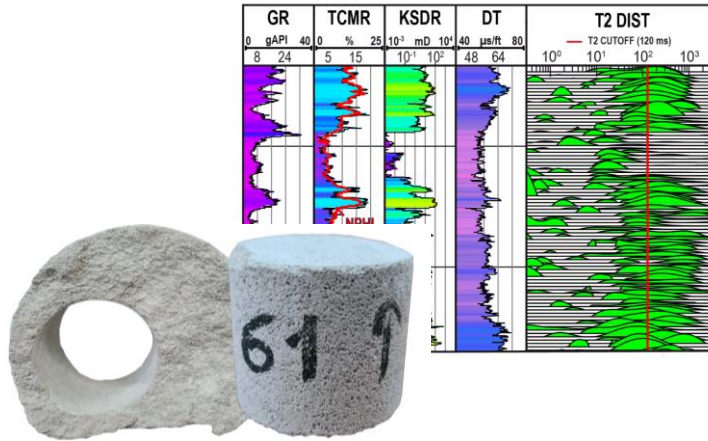
V. 1 Problématiques et enjeux

Prédire l'hétérogénéité du réservoir



IV.2 Quelques exemples de travaux universitaires

Démarche scientifique



Étape n°1

Caractériser les hétérogénéités sédimentologiques et pétrophysiques du réservoir



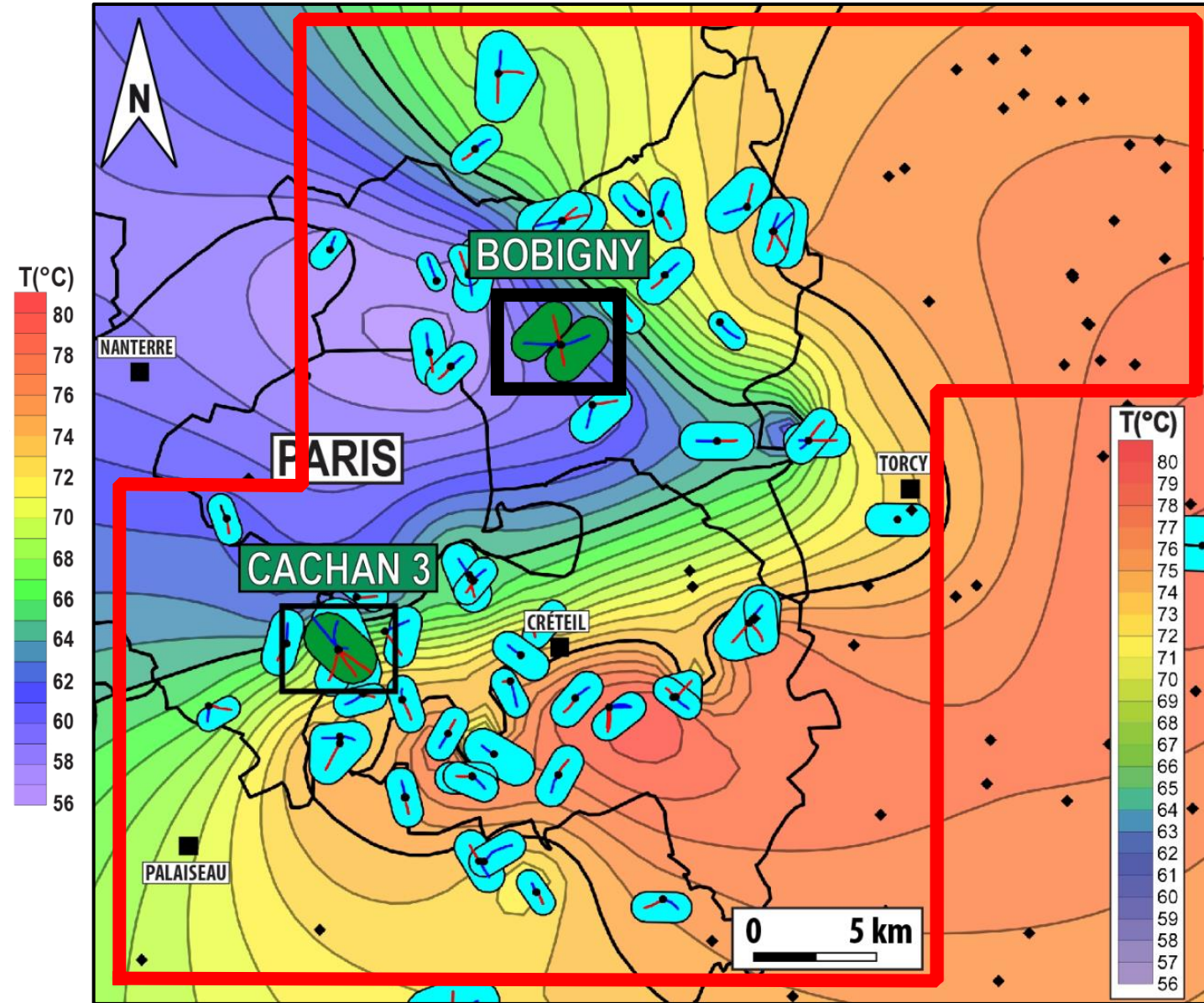
Étape n°2

Spatialiser les hétérogénéités par l'élaboration de modèles numériques 3D

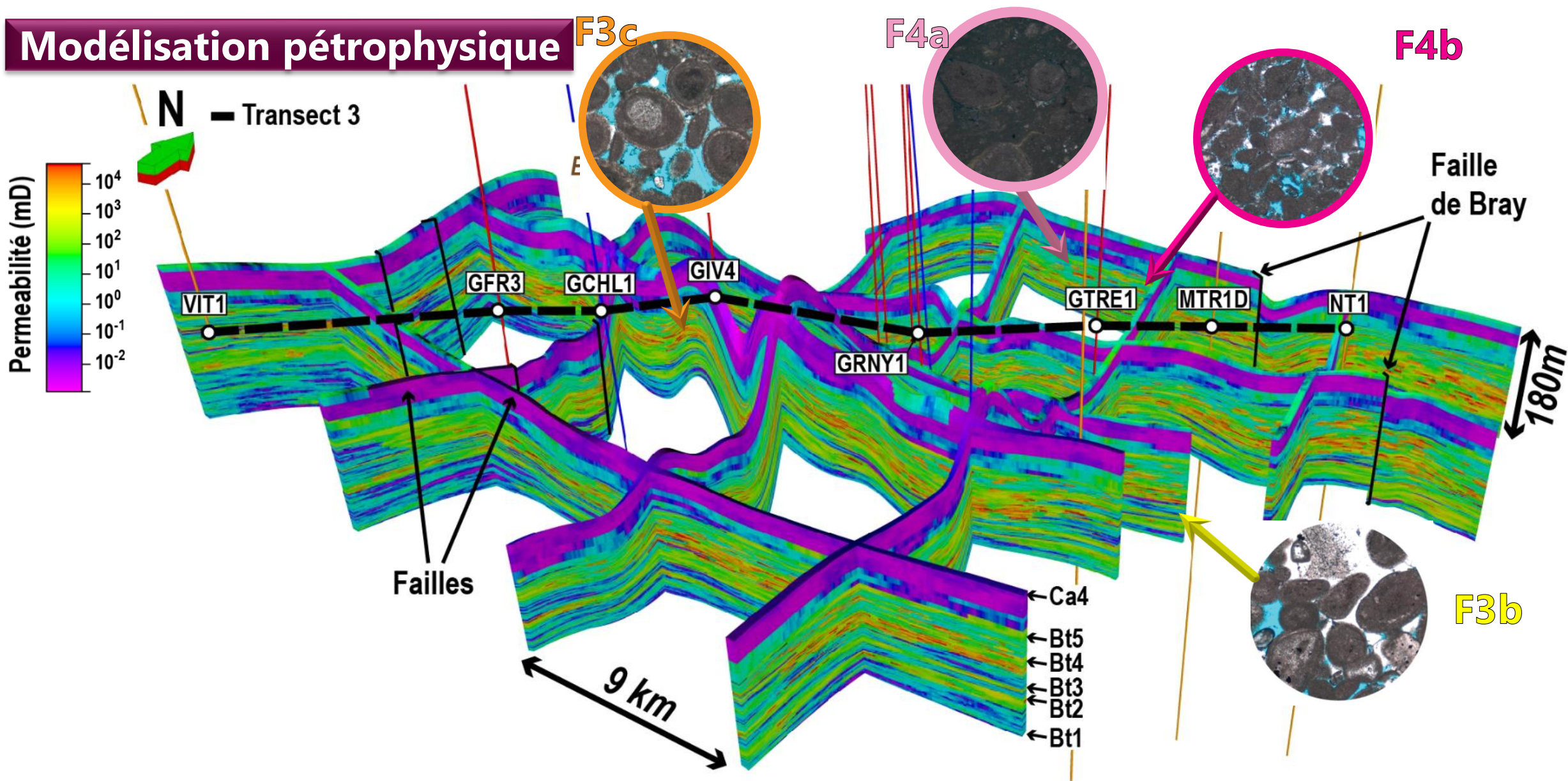


Étape n°3

Évaluer l'impact des hétérogénéités sur les temps de percée thermique en effectuant des simulations



Modélisation pétrophysique



Opération Bobigny-Drancy

2 doublets réalisés en 2020 :

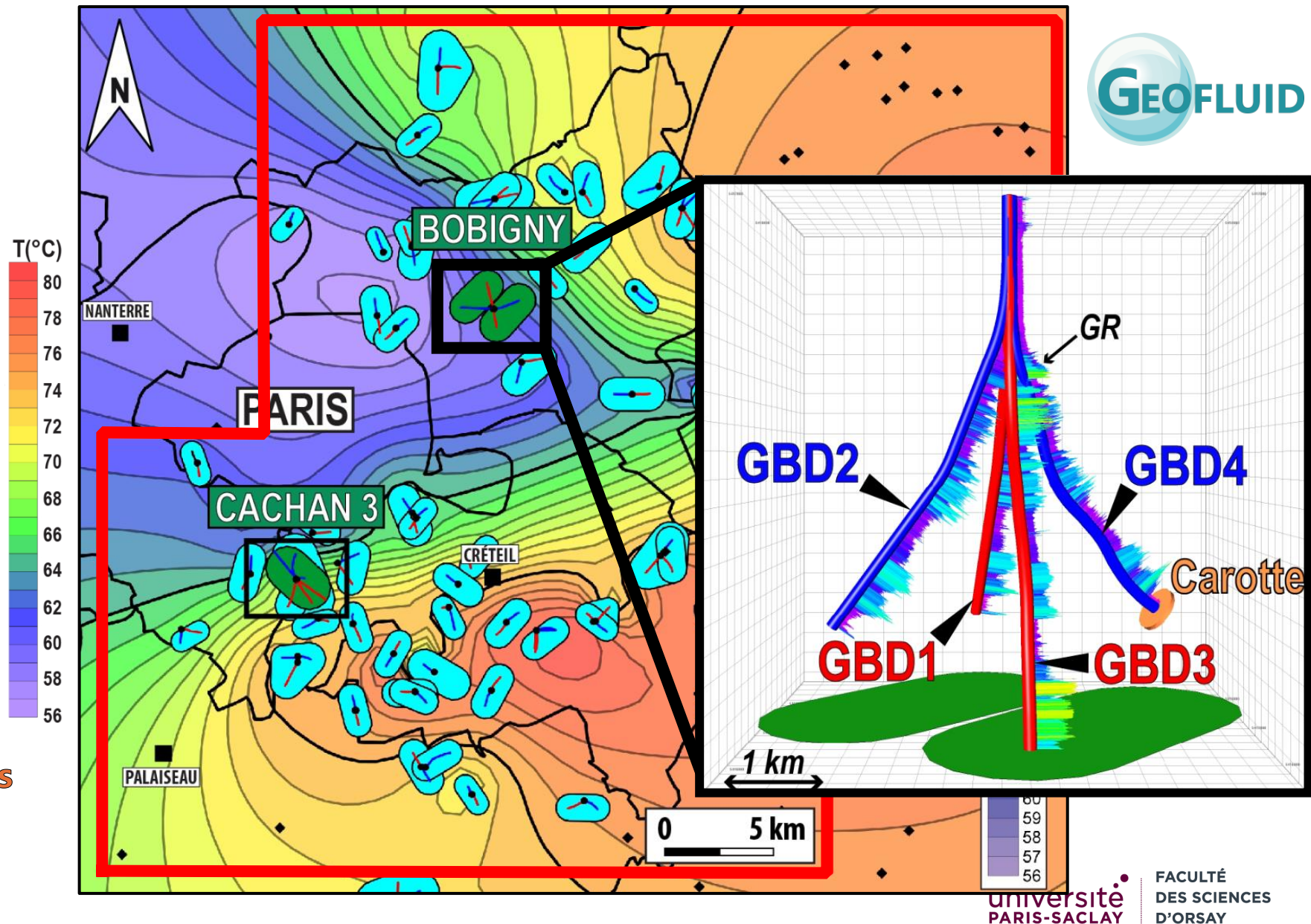
- Puits **GBD1** et **GBD2**
- Puits **GBD3** et **GBD4**

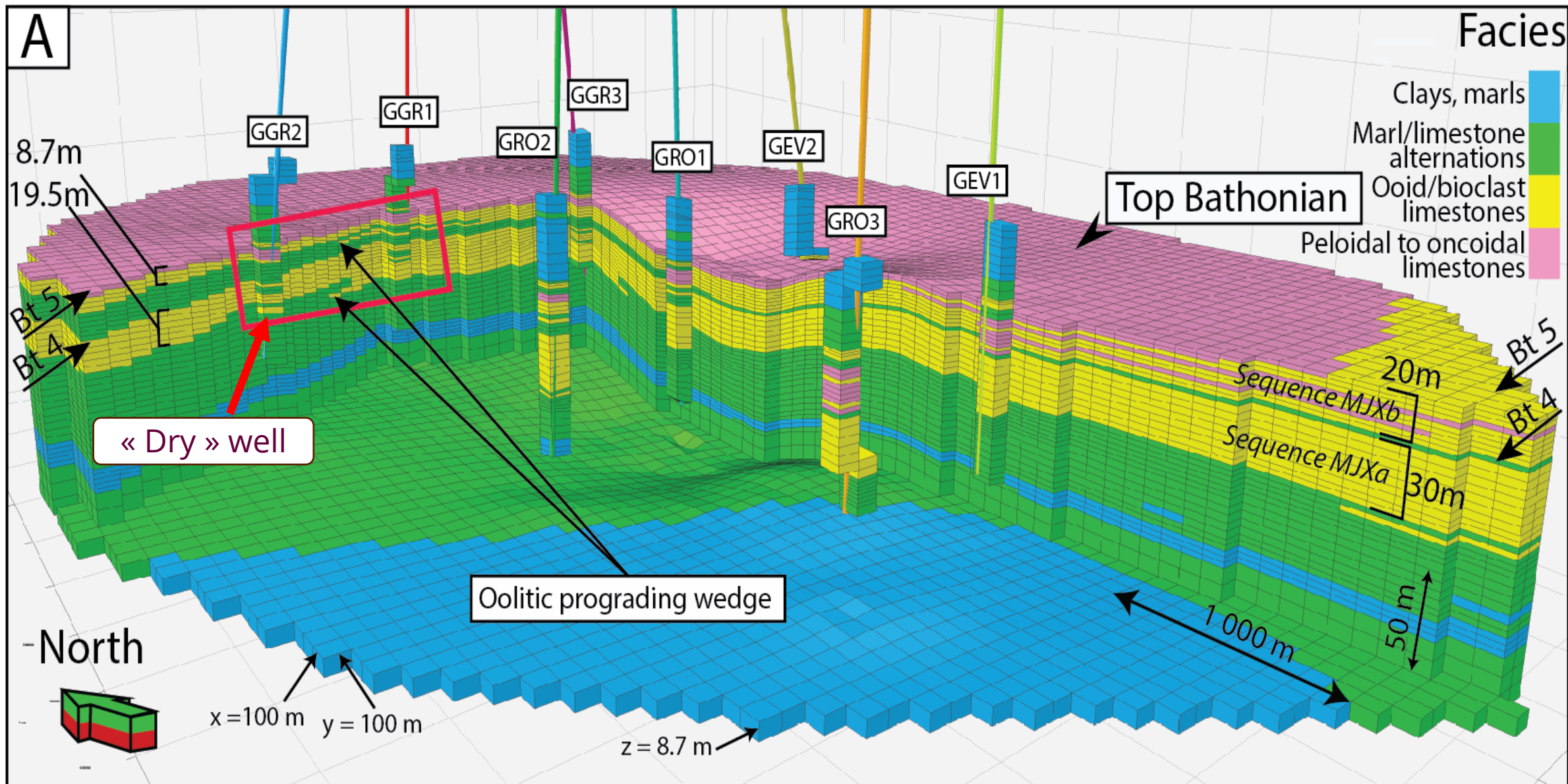
Puits
GBD1/GBD3

Puits
GBD4

Diagraphies
RMN
déployées

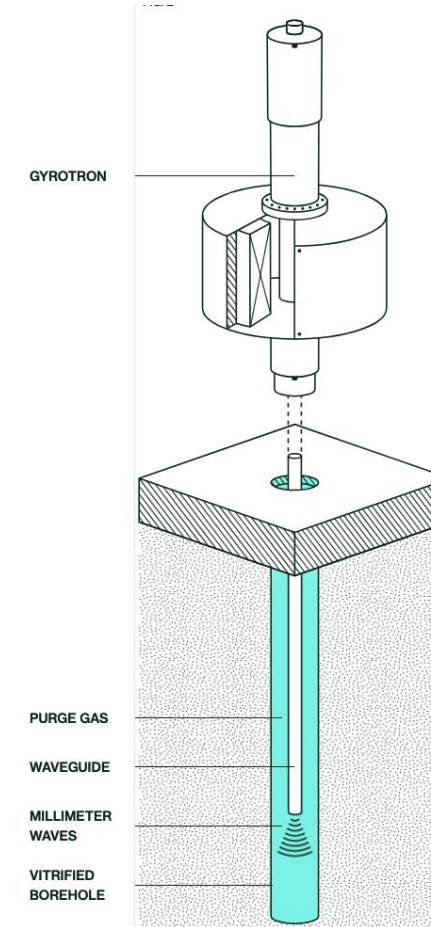
36 m de carottes
étudiées



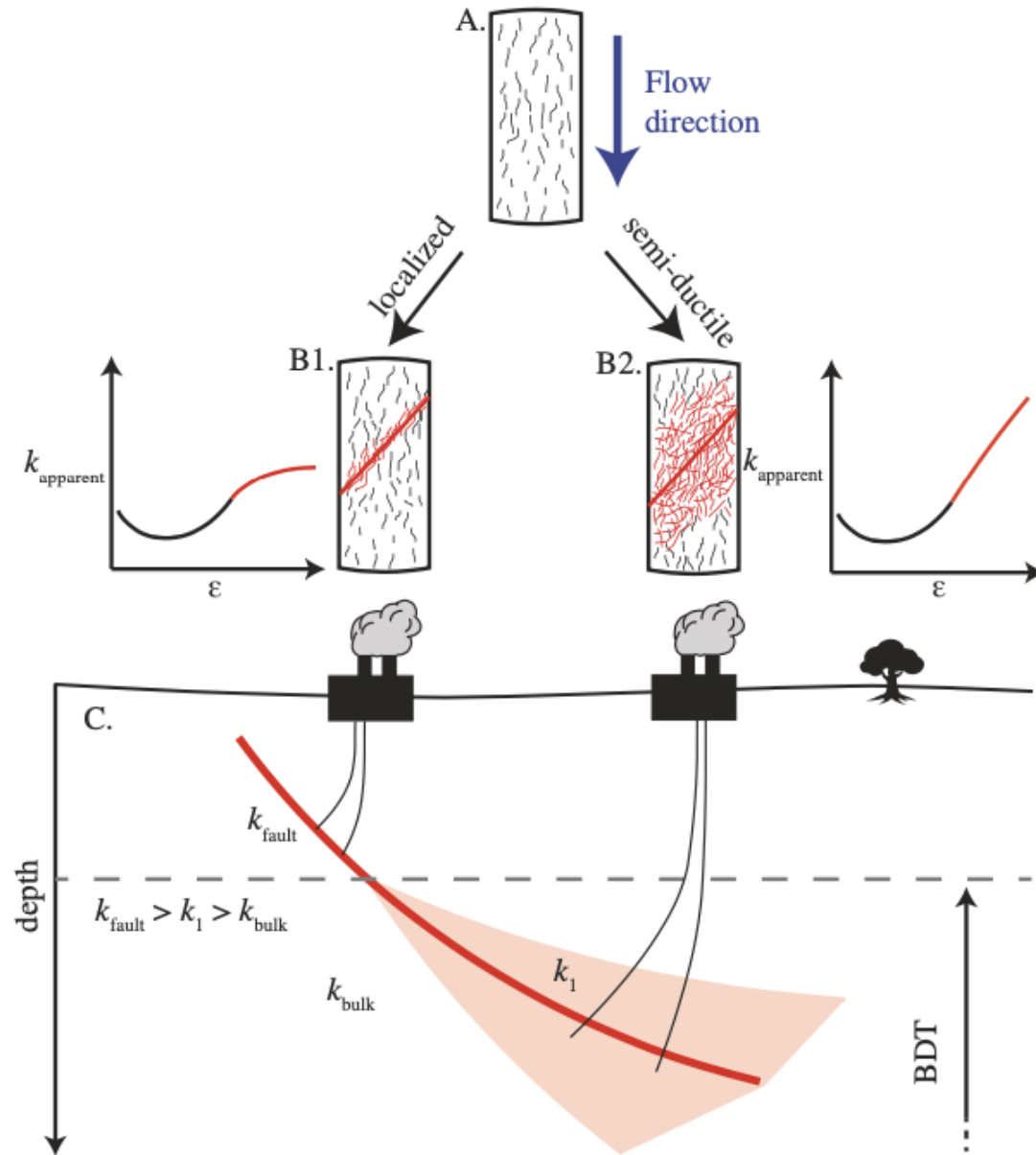


Quaise energy

- Exemple des projets USA :
Start-up américaine Quaise energy (MIT) s'est donnée objectif de forer jusqu'à 20 km : $20 \times 30 = 600^\circ\text{C}$ (max 12 km en Russie), avec nouvelle technologie de forage qui fait fondre la roche en bombardant des ondes millimétriques à puissance de x10 MW



Est-ce possible de forer et rendre perméable une roche ductile?



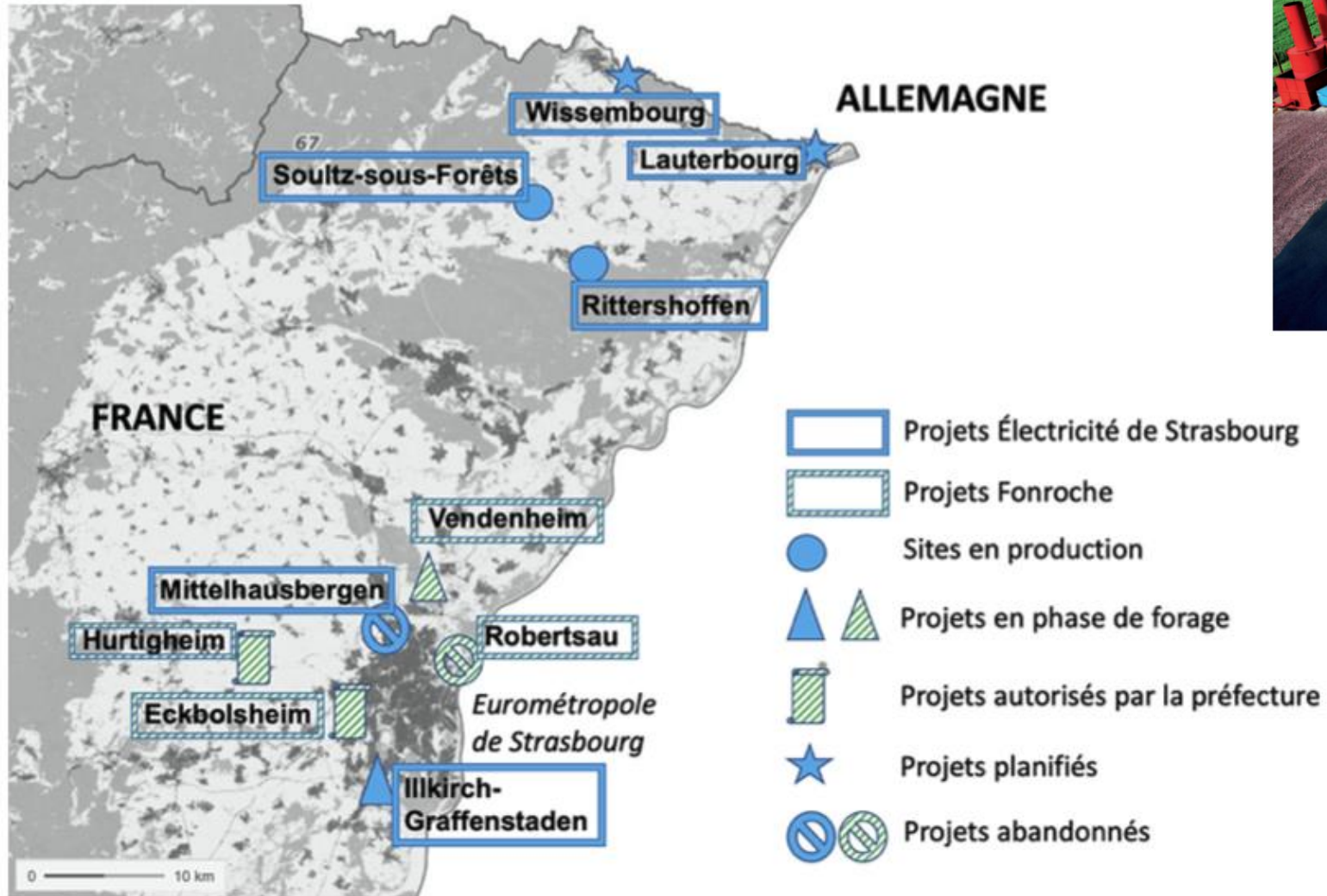
Meyer et al., 2024

Forer la chambre magmatique d'un volcan

- Islande : projet Kmt Krafla : New scientist - Krafla - 900°C
- Krafla caldeira 8km de diamètre, sur la dorsale/rift médio-océanique, fissure 80 km long, 10 km large, plein de fracture de 350 m de long, max 4km, 100m de profondeur, top chambre magmatique à 3km, base à 7km dernière éruption 1984 (avant 1975), magma très fluide, forage 800m, fluide qui se réchauffent, vapeur 250°C, gradient 30°C/100m
- Centrale actuellement fonctionnelle – électricité

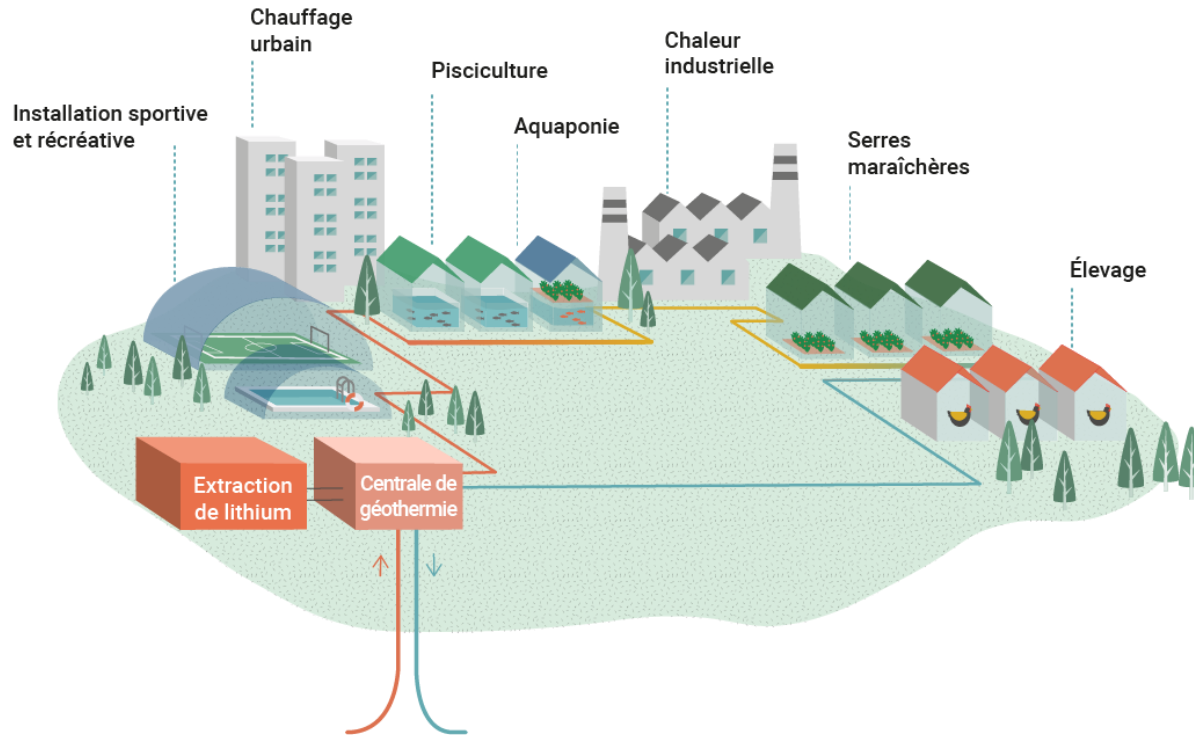


Le fossé rhénan

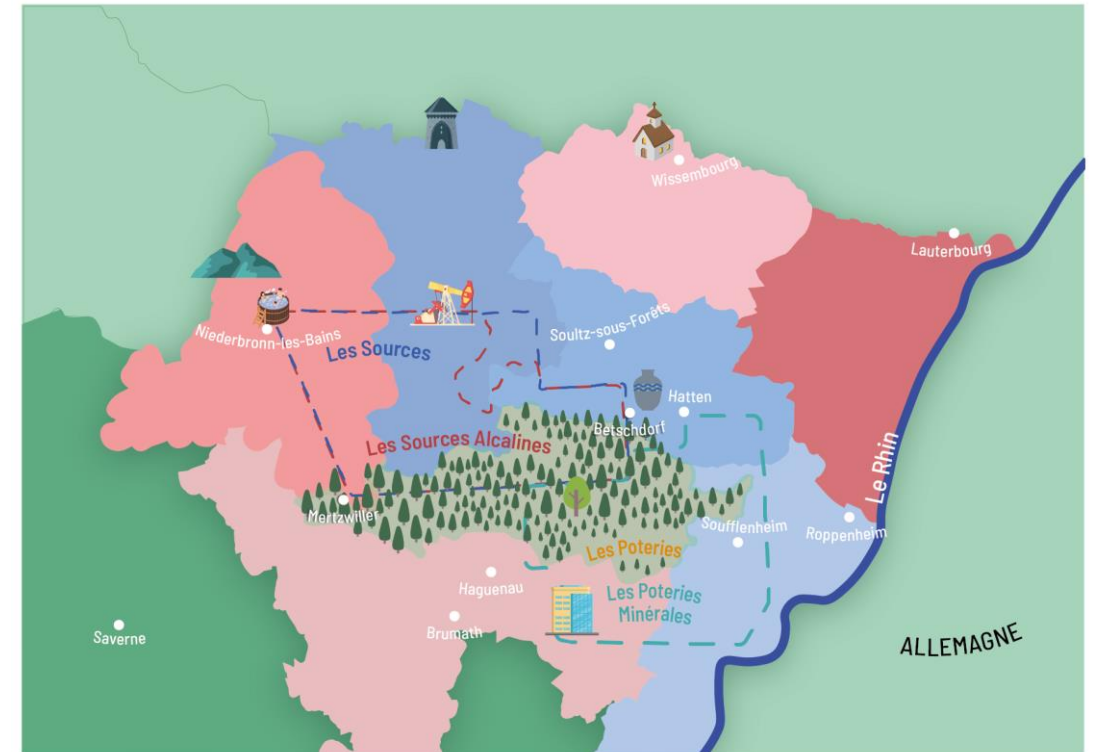


110-200°C

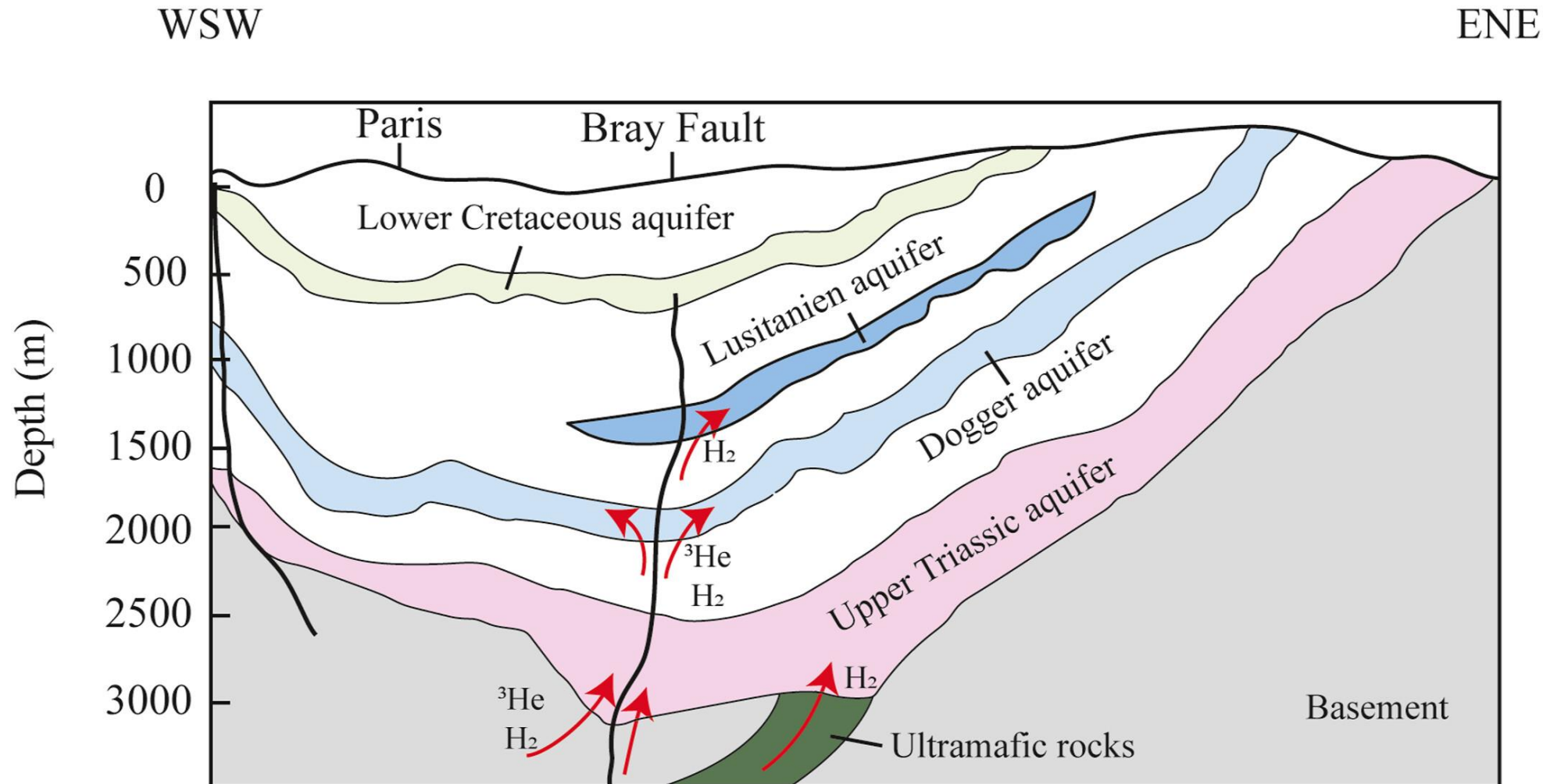
Co-génération d'hélium (He) et d'hydrogène (H₂) : exemple dans le Dogger du Bassin de Paris



- Soultz-sous-forêt 5km 148°C, mise en service 2016 conso annuelle de 3330 foyer + 170mg/l de Li
- Rittershoffen chaleur 170°C, 190 mg/l

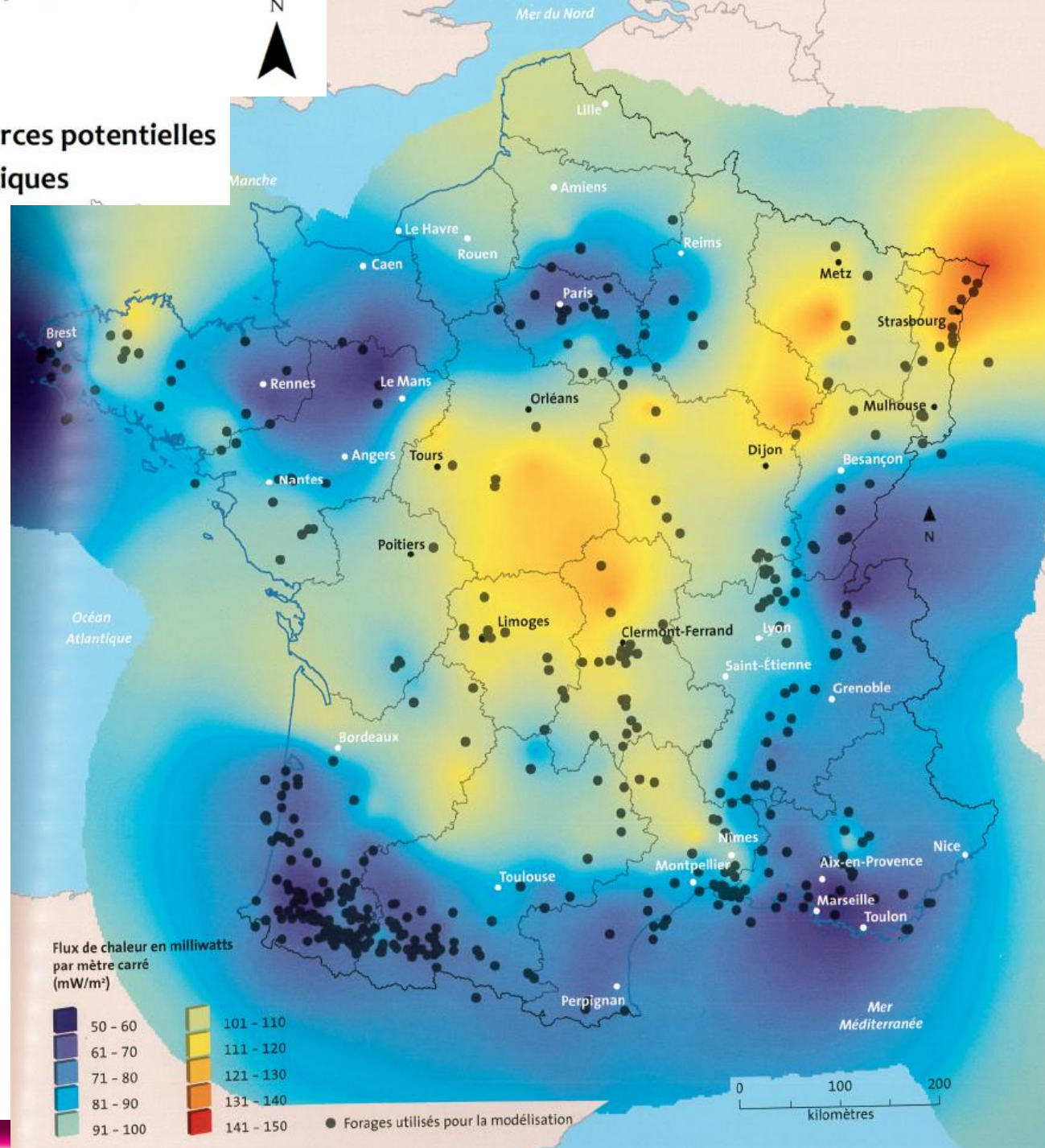


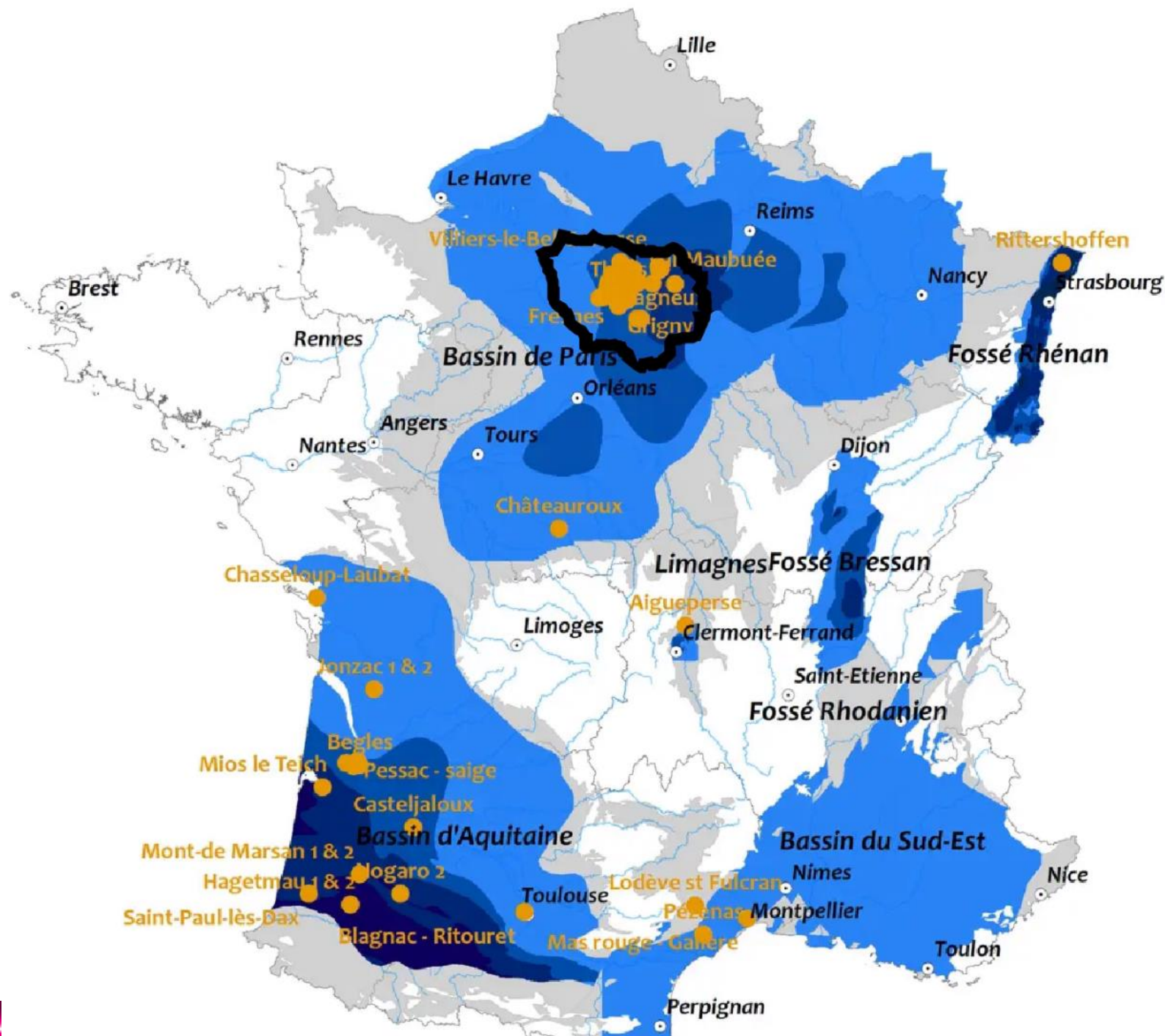
Cogénération He et H₂ : exemple dans le Dogger du Bassin de Paris



Lefreuvre et al., 2024

- supérieure à 70°C
- supérieure à 100°C
- Réservoirs continus, ressources potentielles
- Emprise des bassins géologiques







GEOTHERMIES



Fond de carte

OpenStreetMap



INSTALLATIONS DE GÉOTHERMIE PROFONDE



Installations de géothermie profonde

EXEMPLES D'OPÉRATIONS DE GÉOTHERMIE DE SURFACE



Exemples d'opérations de géothermie de surface

INSTALLATIONS SUR ÉCHANGEURS OUVERTS (NAPPE)



Installation réalisée



Installation déclarée

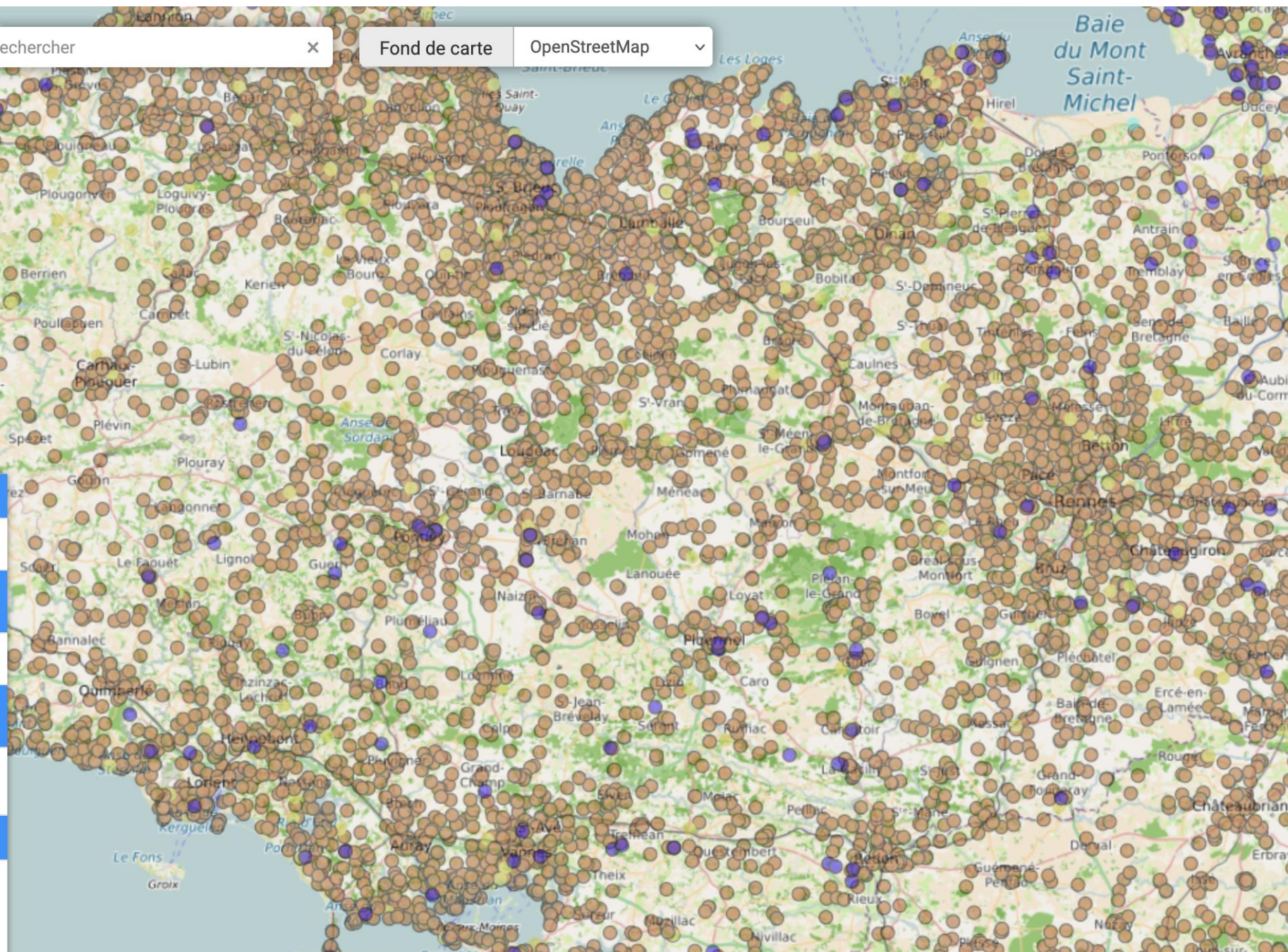
INSTALLATIONS SUR ÉCHANGEURS FERMÉS (SONDE)

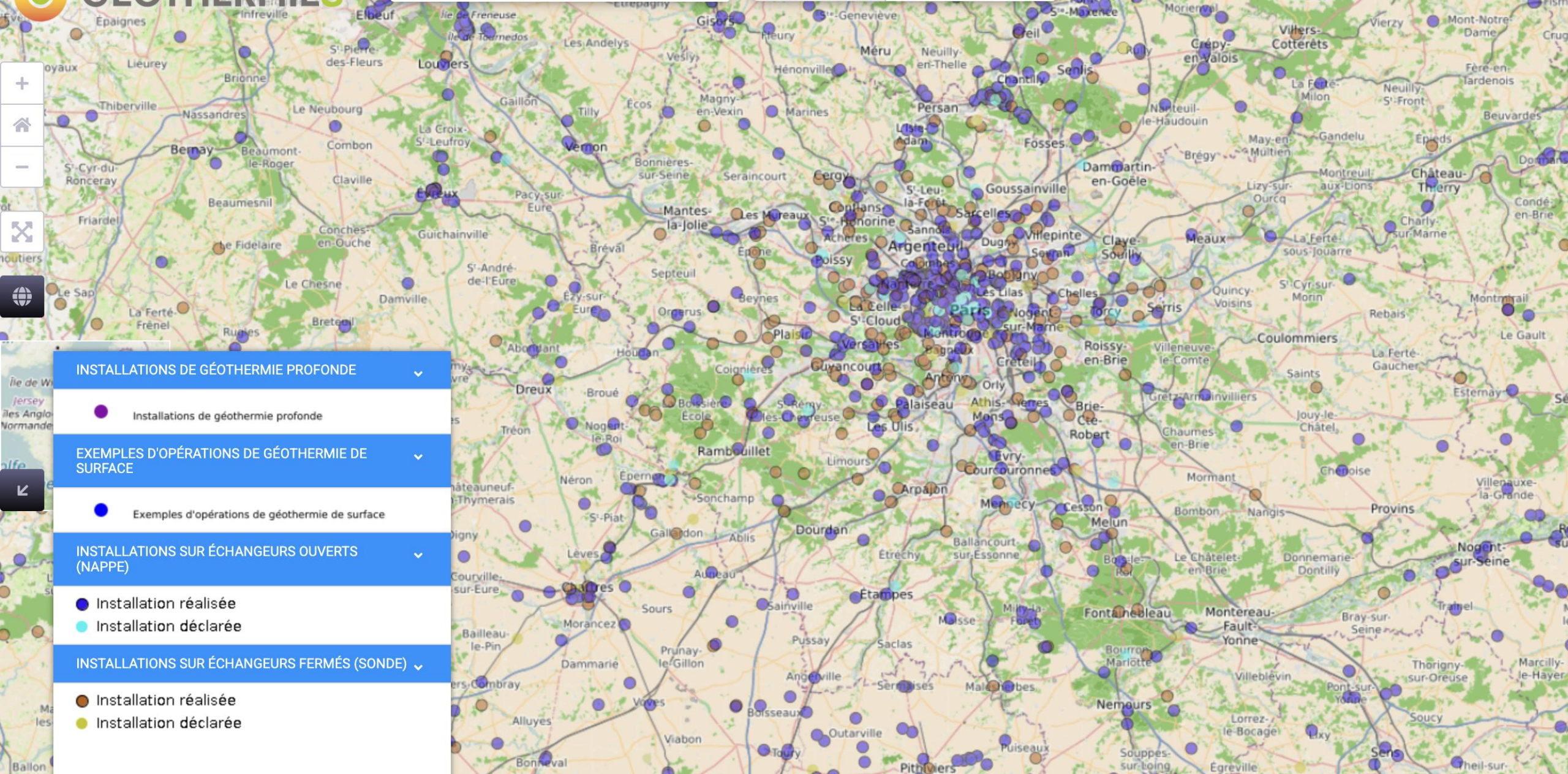


Installation réalisée

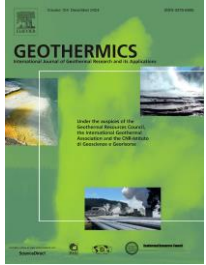


Installation déclarée





Bibliographie



Publications dans Geothermics

Catinat, M., Brigaud, B., Fleury, M., Thomas, H., Antics, M., Ungemach, P., 2023. Characterizing facies and porosity-permeability heterogeneity in a geothermal carbonate reservoir with the use of NMR-wireline logging data. Geothermics 115, 102821. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102821>

Catinat, M., Fleury, M., Brigaud, B., Antics, M., Ungemach, P., 2023. Estimating permeability in a limestone geothermal reservoir from NMR laboratory experiments. Geothermics, 111, 102707 <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102707>

Thomas, H., Brigaud, B., Blaise, T., Zordan, E., Zeyen, H., Catinat, M., Andrieu, S., Mouche, E., Fleury, M., 2023. Upscaling of geological properties in a world-class carbonate geothermal system in France: From core scale to 3D regional reservoir dimensions. Geothermics, 112, 102719 <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102719>



THE CONVERSATION

. La géothermie, enjeu majeur pour la neutralité carbone des zones urbaines. The Conversation, 31-07-2023 <https://doi.org/10.64628/AAK.6h3333gde> Rafrâichir les bâtiments : et si on pensait à la géothermie ? <https://doi.org/10.64628/AAK.ehkasxeca>

Emission La Science, CQFD "Géothermie, chaud dessous" sur France Culture <https://radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-science-cqfd/geothermie-chaud-dessous-4901444>

CNRS « Canicules en ville et neutralité carbone : Le potentiel de la géothermie » <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/canicules-en-ville-et-neutralite-carbone-le-potentiel-de-la-geothermie>

« La résonance magnétique nucléaire pour mesurer la perméabilité des réservoirs géothermiques » <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-resonance-magnetique-nucleaire-pour-mesurer-la-permeabilite-des-reservoirs>

Journée porte ouverte pour le grand public « Géothermie », parvis de la mairie de Versailles, projet Géoscan, février 2024 <https://www.geothermies.fr/geoscan-idf>; article de presse : https://actu.fr/ile-de-france/versailles_78646/un-drole-de-camion-va-sonder-les-yvelines-a-la-recherche-de-sources-de-chaaleur-souterraines_60737098.html

Drobinski, P., Badosa, J., Bilger, I., Brigaud, B., Crifo, P., Desnos, A., Giraudet, L.G., Gosselin, M., Guerineau, M., Guillemoles, J.-F., Habets, F., Lévy, J.-P., Mayer, J., Quélin, B., Raymond, F., Suchet, D., Tao, Q., Tantet, A., Viguié, V., 2022. Changement climatique et transition énergétique en région Île-de-France. Groupe régional d'expertise sur le changement climatique et la transition écologique en Île-de-France (GREC Francilien). Les carnets du GREC Francilien. 53 p. <https://hal.science/hal-03871752>

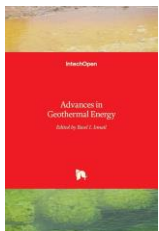
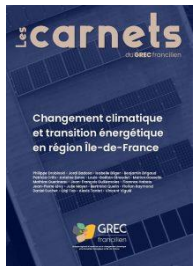
Thèses

Maxime Catinat, Caractérisation multi-échelle des hétérogénéités du réservoir géothermique du Dogger d'Ile-de-France: apport de la résonance magnétique nucléaire et de la modélisation numérique statique et hydrodynamique. Situation actuelle : Ingénieur GEOFLUID <https://theses.fr/2023UPASJ033>

Perrine Mas, Géothermie dans les réservoirs silico-clastiques : Apport de l'étude d'un analogue de terrain (Grès de Roda) pour la modélisation des hétérogénéités sédimentaires du réservoir argilo-sableux de l'Albien du Bassin de Paris. Stratigraphie. Situation actuelle : Chercheuse à l'Univ. Bordeaux. (NNT : 2024UPASJ024). (tel-04785194)

Hadrien Thomas, Influence de la stratigraphie séquentielle et de la diagenèse sur la qualité des modélisations 3D des réservoirs carbonatés : implication pour le développement de la géothermie dans le Bassin de Paris. Situation actuelle : Ingénieur chez PANterra Geoconsultants <https://theses.fr/2022UPASJ017>

Ismail, B. (2016): Advances in Geothermal Energy, ISBN: 978-953-51-2241-8, 174pp. <http://www.intechopen.com/books/advances-in-geothermal-energy> (OAPress) https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Geothermal_2016.pdf <https://www.worldenergy.org>

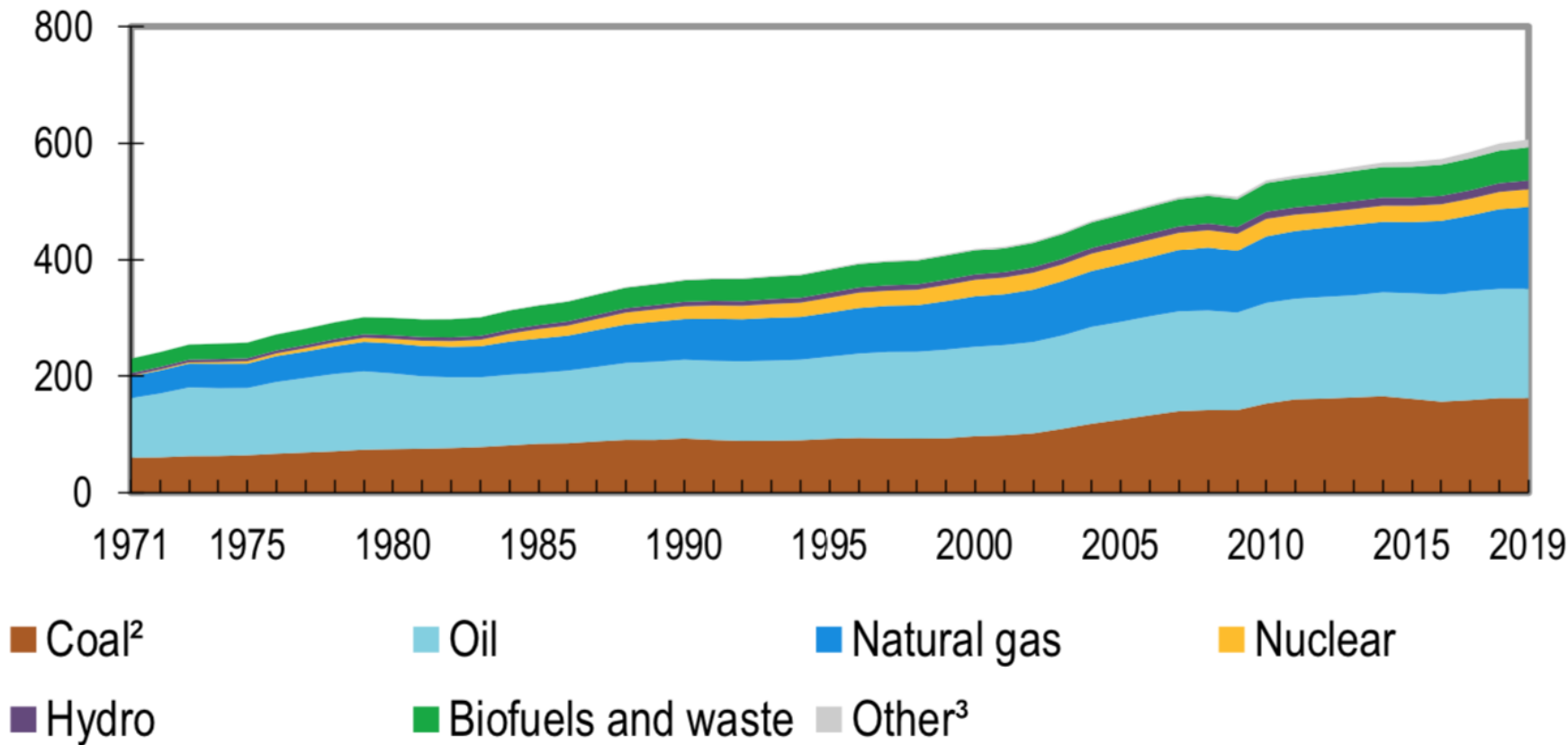


Back-up

Production énergétique mondiale

EJ → exajoule = 10^{18} joules

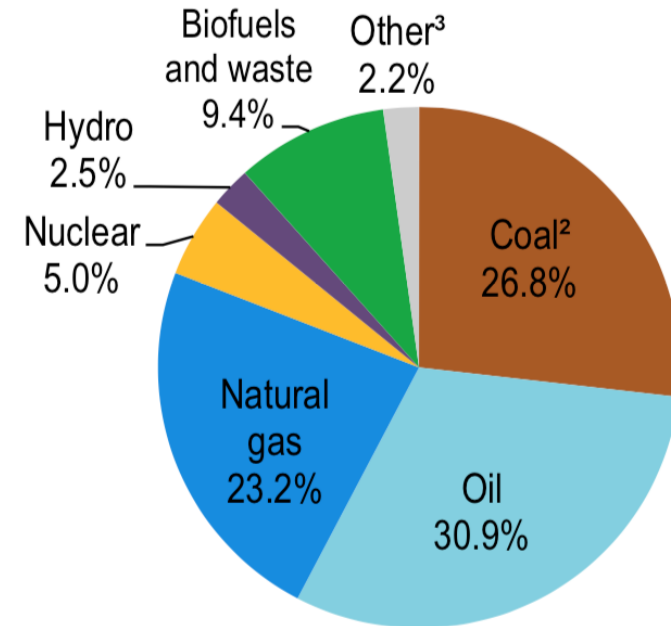
World¹ total energy supply by source, 1971-2019 (EJ)



IEA (2021) Key World Energy Statistics

³Géothermie, solaire, vent, marée, bois chauffage

2019



Environ 80% combustible fossile

606 EJ

Production énergétique mondiale géothermie pour un usage direct de la chaleur

TJ → terajoule = 10¹² joules

0.17% de la production annuelle mondiale énergétique

Table 1

Summary of direct-use data worldwide by region and continent, 2019.

Region/Continent (#countries/regions)	MWt	TJ/year	GWh/year	Capacity Factor
Africa (11)	198	3730	1036	0.597
Americas (17)	23,330	180,414	50,115	0.245
Central America and Caribbean (5)	9	195	54	0.687
North America (4)	22,700	171,510	47,642	0.24
South America (8)	621	8709	2419	0.445
Asia (18)	49,079	545,019	151,394	0.352
Commonwealth of Independent States (5)	2121	15,907	4419	0.238
Europe (34)	32,386	264,843	73,568	0.259
Central and Eastern Europe (17)	3439	28,098	7805	0.259
Western and Northern Europe (17)	28,947	236,745	65,762	0.259
Oceania (3)	613	10,974	3048	0.568
Total (88)	107,727	1,020,887	283,580	0.300

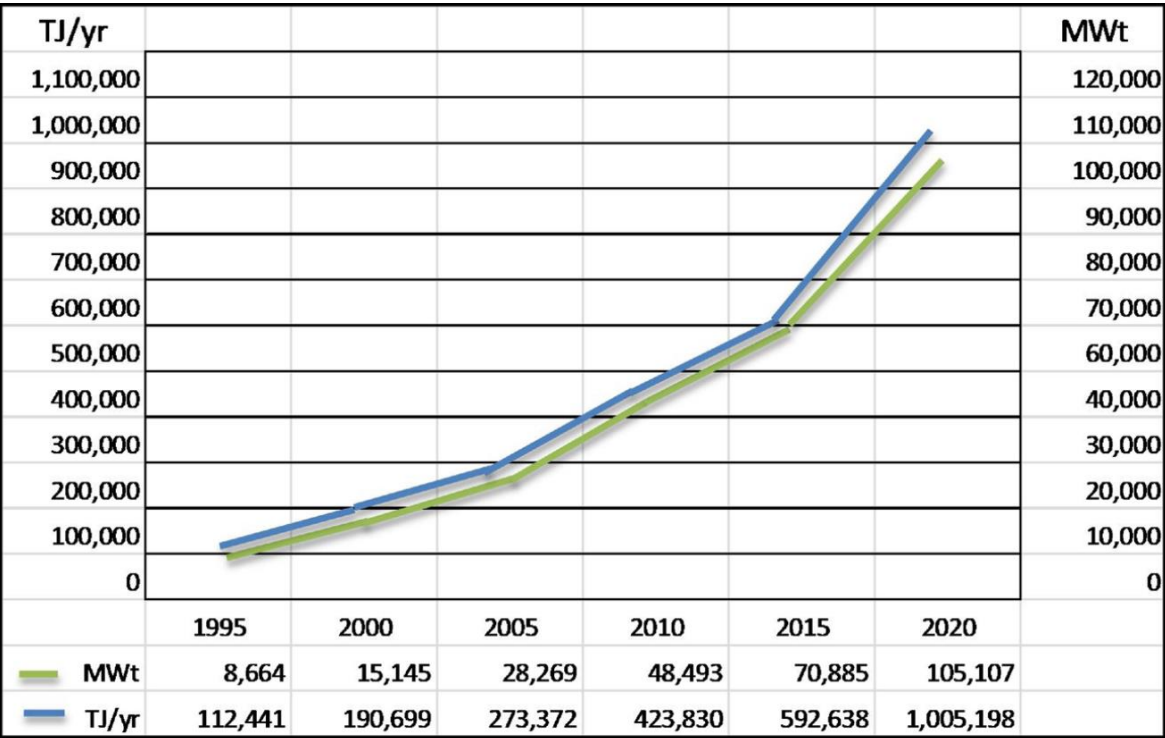
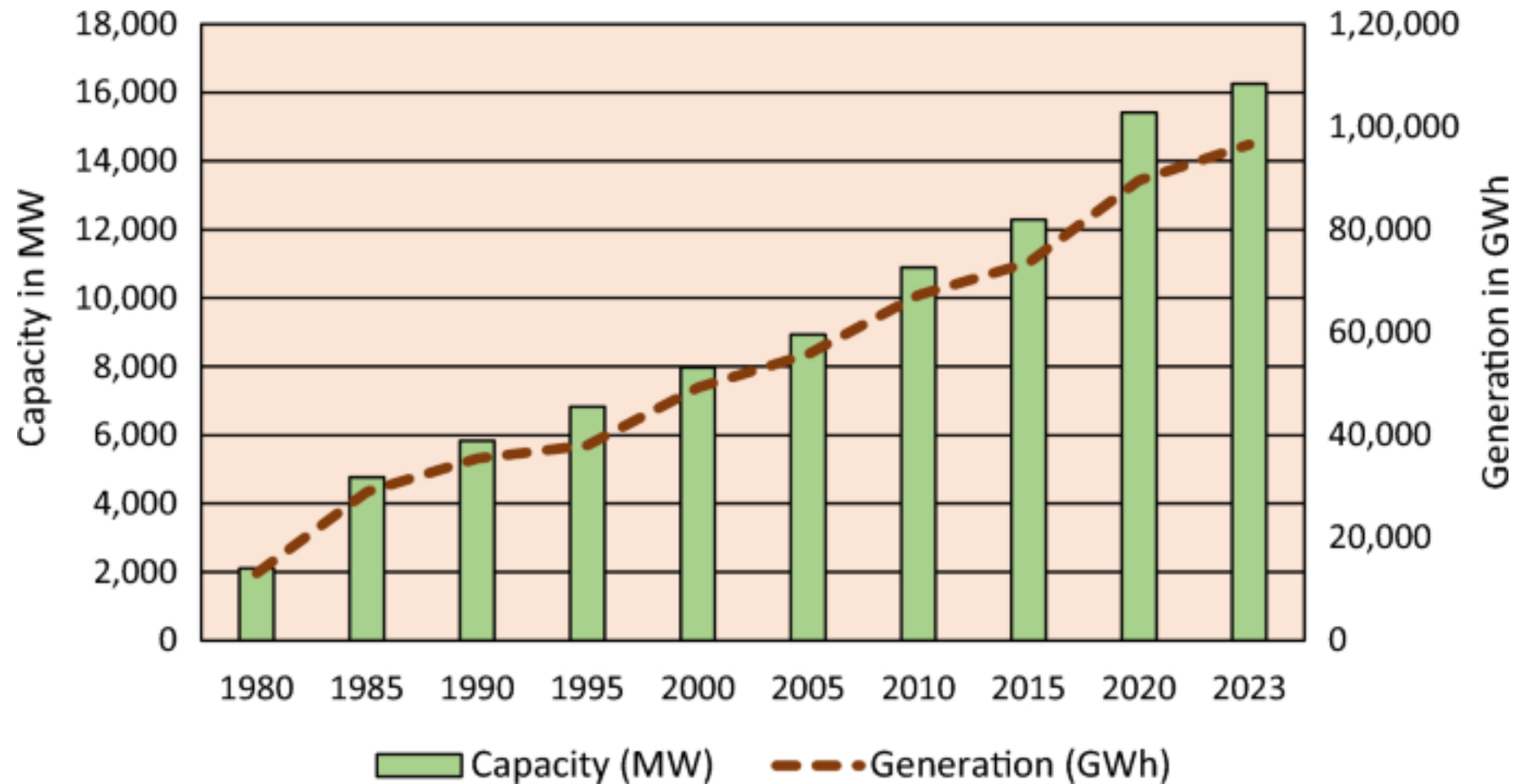


Fig. 1. The installed direct-use geothermal capacity and annual utilization from 1995-2020.

- 58.8% pour alimenter pompe à chaleur
- 18% pour les thermes et piscines
- 16% pour réseaux de chaleur
- 0.4% pour l'agriculture
- 0.2% pour fonte de neige

Production énergétique mondiale géothermie pour la production d'électricité

0.05% de la production annuelle mondiale énergétique



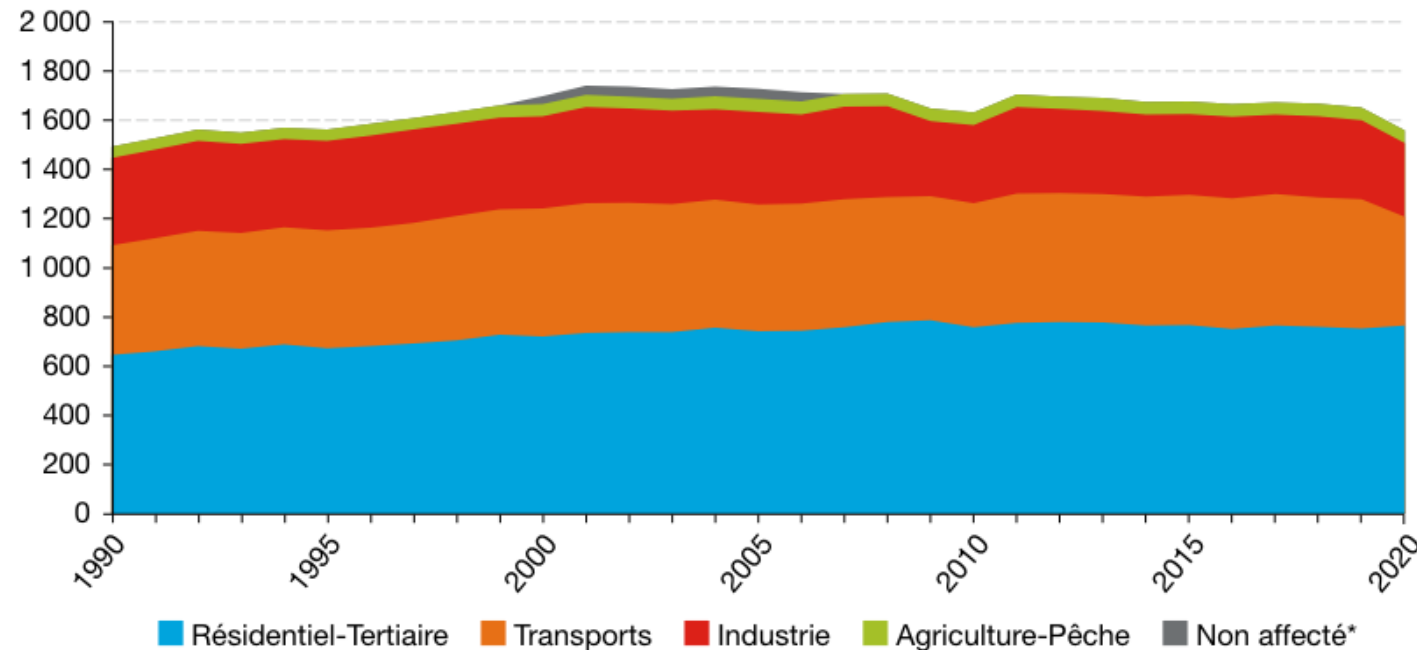
100 000 GWh
= 10^{14} GWh
= 3.6×10^{17} J

Quelle est la part d'énergie consommée (sur le total) pour se chauffer en France ?

CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR

TOTAL : 1 562 TWh en 2020 (données corrigées des variations climatiques)

En TWh (données corrigées des variations climatiques)



* La répartition de la chaleur par secteur consommateur n'est pas disponible entre 2000 et 2006.

Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.

Source : SDES, Bilan énergétique de la France