

# La géothermie de la maison individuelle à la production industrielle d'électricité

Assemblée Générale de la Société Géologique  
d'ArdècheSGA du 23/03/2024  
Alain GADALIA



*Centrale  
géothermique  
de Bouillante  
(Guadeloupe)*



*Aéroport de Paris-Orly: chantier en 2010*

*Utilisation directe des  
eaux thermales - Blue  
Lagoon, Myvatn  
(Islande)*



# Parties 1, 2 & 3

## ➤ 1 - Généralités

- Energie et puissance: les unités
- La chaleur de la Terre
- Gradients et différentes géothermies

## ➤ 2 - La géothermie de très basse température

- La pompe à chaleur géothermique
- Les différents capteurs
- Développements récents
- Les installations en France

## ➤ 3 - L'usage direct

- Différents types d'usage direct
- De la caverne aux réseaux de chaleurs
- Les ressources et réalisations en France
- Cas du Bassin parisien
- Exemples de réalisations en milieu urbain
- Production de chaleur en France et en Europe

# 1 - Généralités

## Energie & puissance: les unités

### Energie / travail

L'unité internationale d'énergie (travail) est le Joule (J).

### Puissance

Quantité d'**énergie** pouvant être fournie **par unité de temps**.

Unité internationale de puissance: le Watt = 1 Joule / seconde.

Distinction entre  $W_{th}$  et  $W_e$ .

### Joule / kiloWatt.heure

Kilowatt.heure : travail accompli par une puissance de 1 kiloWatt pendant 1 heure.

1 kWh = 3 600 J = 3,6 kJ.

Kilo: x 1 000

Mega: x 1 000 000

Giga: x 1 000 000 000

Tera: x 1 000 000 000 000

# La chaleur de la terre

Géothermie: 1) branche de la géophysique qui étudie l'origine et la diffusion de la chaleur du globe; 2) technique de captage de la chaleur de la terre

- ≈ 80 % : **désintégration** des éléments radiogéniques ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$ , surtout  $^{232}\text{Th}$ ,...) de la croûte terrestre et du manteau;

**dans les 5 premiers km** de la croûte terrestre : 46 TW emmagasiné (300 000 fois la consommation mondiale d'énergie )

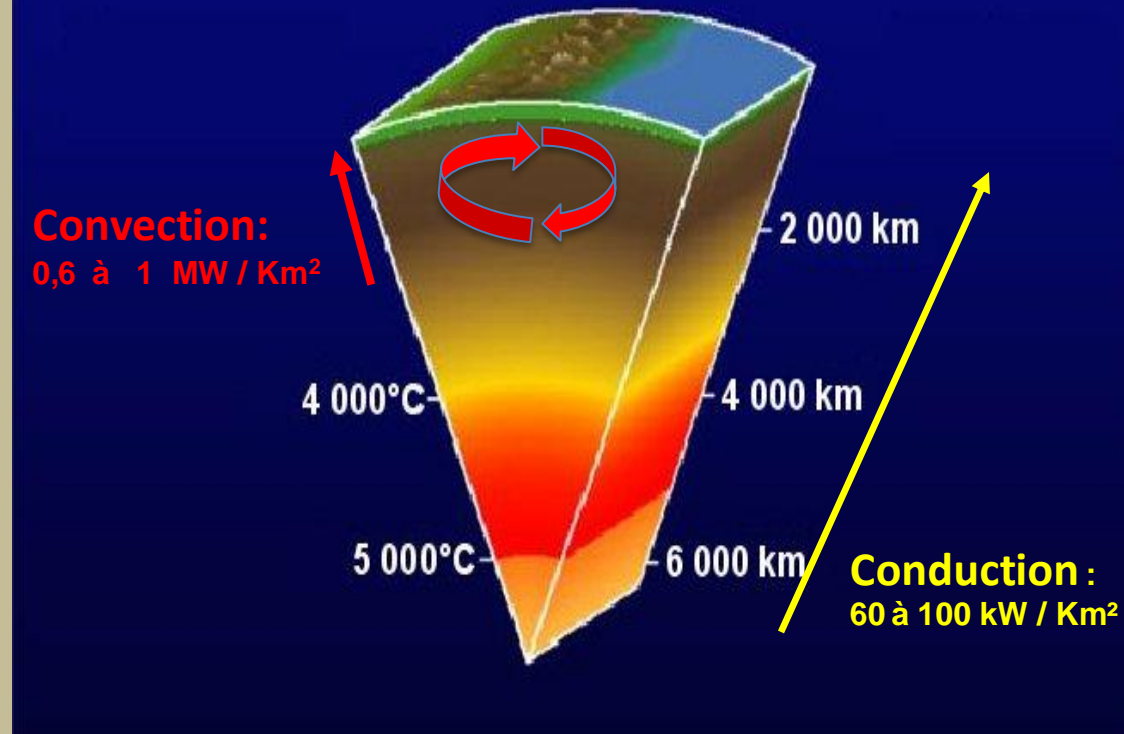
- ≈ 10 % : énergie résiduelle d'accrétion **formation de la planète** (noyau interne ou graine à  $5\,000^\circ\text{C}$ );

=> la terre (interne) se refroidit ( $3\text{-}4^\circ\text{C}$  depuis 65 Ma)

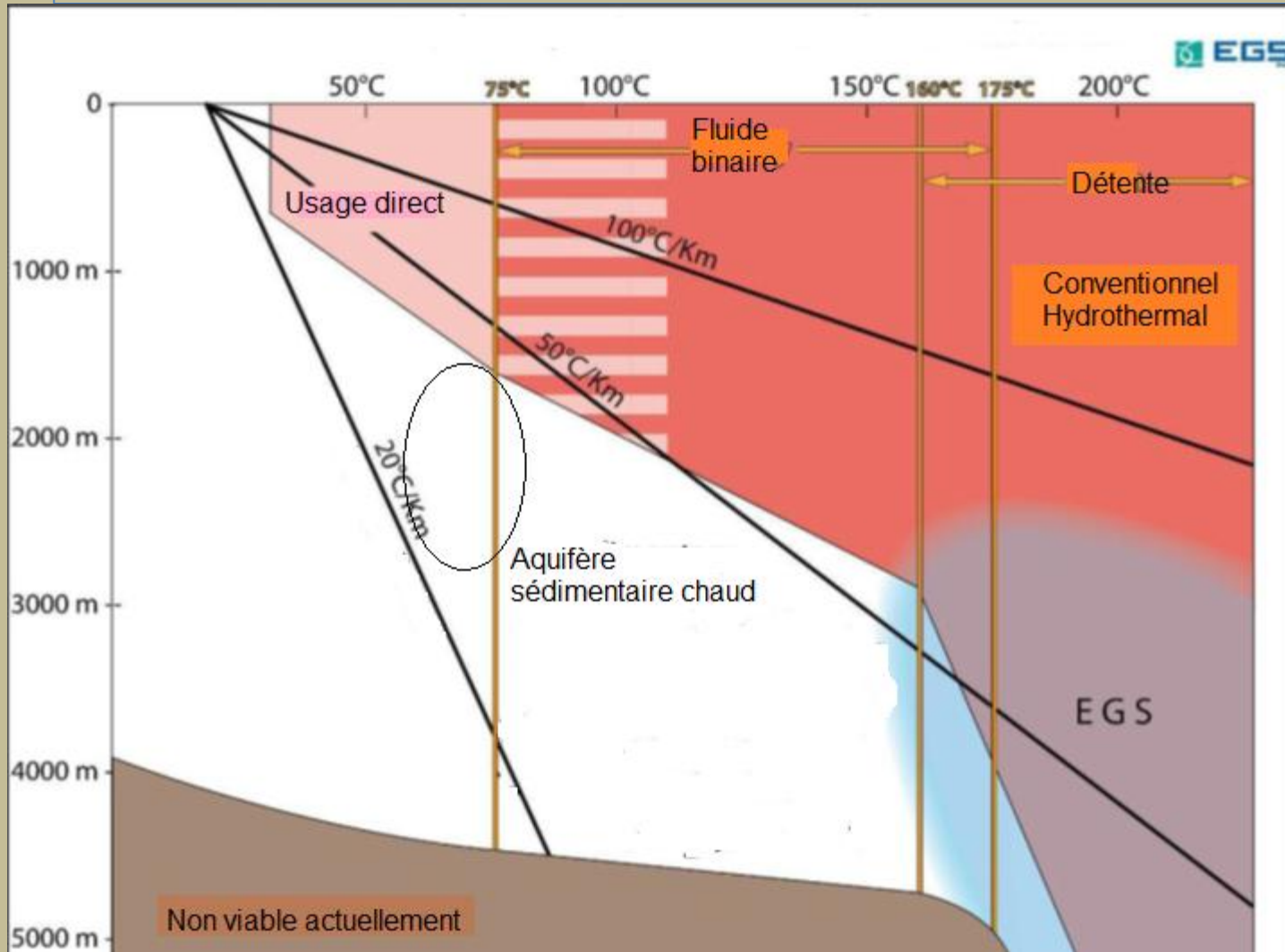
2 phénomènes principaux à l'origine du dégagement de chaleur de la Terre :



**2 modes de dissipation de la chaleur :**



# Gradients et différents types de géothermie

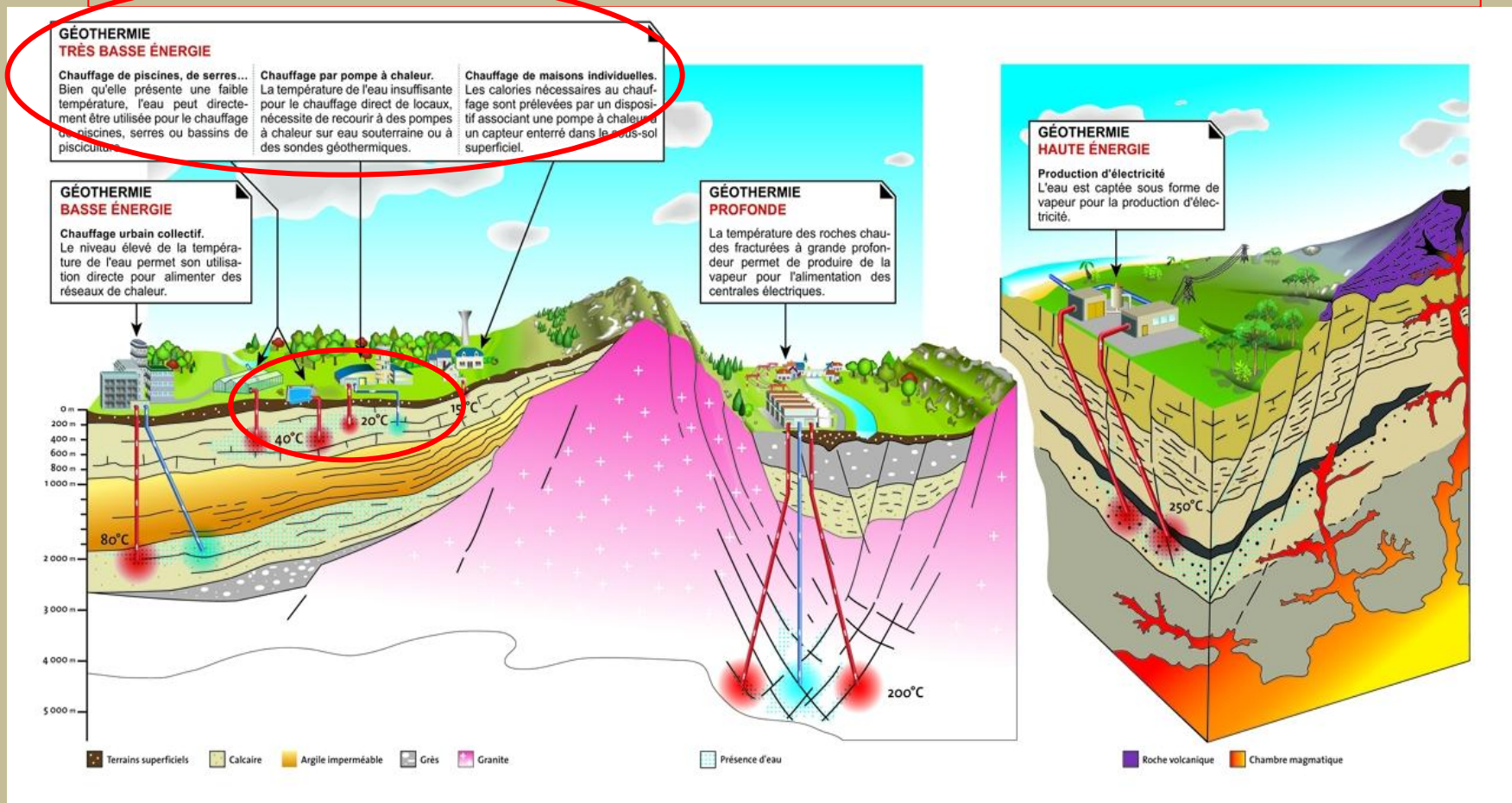


**Flux thermique moyen :**  
87 milliwatts par  $m^2$  (1/10 000<sup>e</sup> de la puissance reçue par le Soleil à la surface de la Terre.

**Gradient moyen:**  $3^\circ\text{C} / 100\text{ m}$  mais peut aller au-delà de  $10^\circ\text{C} / 100\text{ m}$  dans les zones actives ( $30^\circ\text{C} / 100\text{ m}$  à Krafla)

*Relations Température / Profondeur et ressources géothermiques*

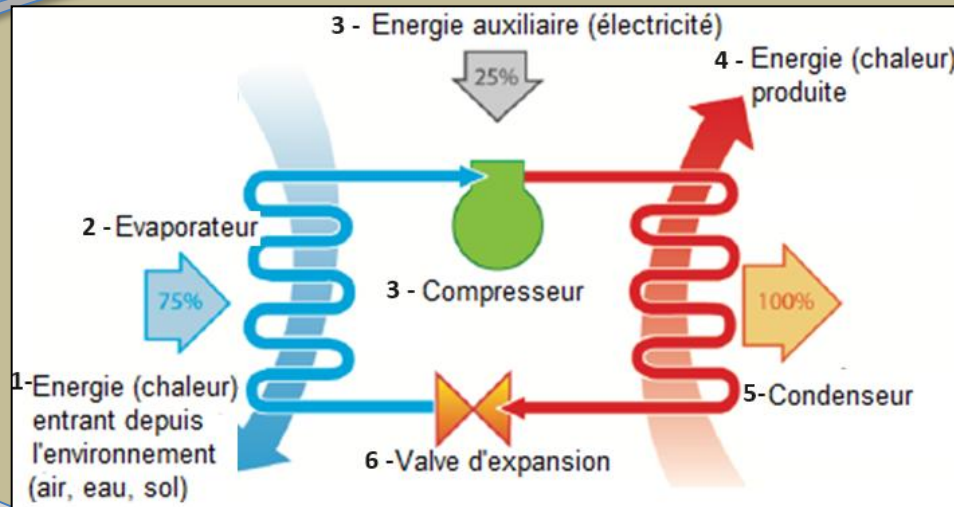
# 2 - Géothermie de surface / de très basse température / de minime importance (GMI)



4,8 TWh produits en France en 2021 par PAC géothermiques (3,3% de la chaleur renouvelable)

# La pompe à chaleur géothermique – 1 -Principe

Dans l'évaporateur, le fluide absorbe la chaleur de l'environnement externe et s'évapore



Après une compression, la vapeur réchauffée fournit de la chaleur et se condense (condenseur)

**COP:** Coefficient de performance.

$\text{COP machine} = \frac{\text{puissance thermique restituée au condenseur}}{\text{puissance électrique consommée par le compresseur}}$

## Fluide frigorigène

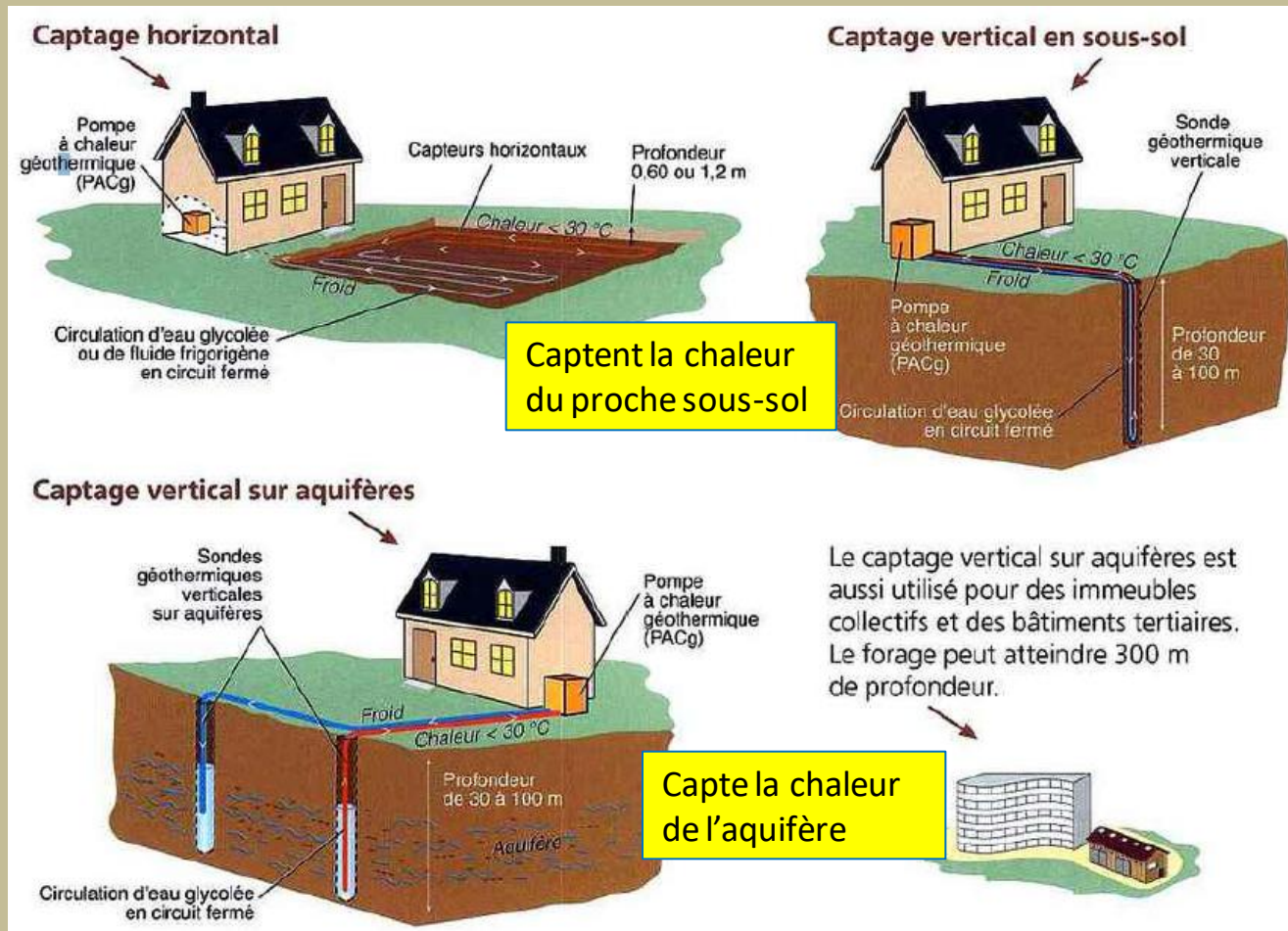
Fluide (ex: eau glycolée), confiné dans la pompe à chaleur, qui assure lors de ses changements de phase (gaz  $\leftrightarrow$  liquide) les transferts de chaleur.

## Enthalpie

Grandeur utilisée pour calculer l'énergie échangée lors d'un changement d'état.

# La pompe à chaleur géothermique –

## 2 - Les différents capteurs souterrains



Température du **proche sous-sol** = moyenne des températures annuelles : En France, à une profondeur  $\approx 1,5 - 3$  m, la température du sol est quasi stable tout au long de l'année et oscille **entre 12 et 14 ° C**.

- Utilisation réversible (chauffage / rafraîchissement)

Géothermie de très basse énergie (proche sous-sol): ressources **valorisables sur 85 à 95% du territoire français**



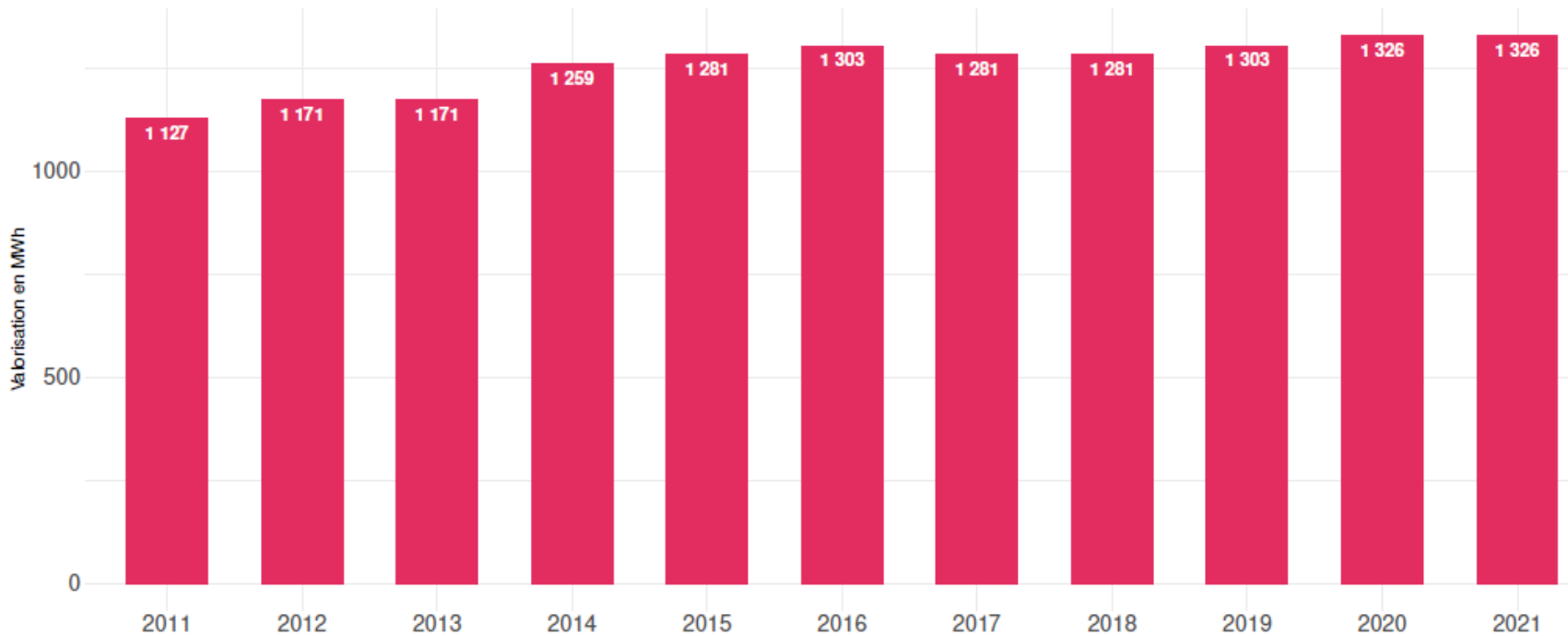
# Développements de la GMI

- **Combiner solaire et stockage géothermique** pour réguler la production d'énergie thermique et mieux faire coïncider l'offre avec la demande saisonnière.
- **Valoriser la chaleur « fatale »** (énergie thermique indirectement produite dans le cadre de processus industriels) des usines d'incinération d'ordures ménagères, des *data centers*, des stations d'épuration, des centrales nucléaires, de stations de métro (Rennes),...
- **Géométrie et disposition des capteurs** souterrains: optimiser le rendement des capteurs et l'espace souterrain disponible (corbeilles, murs,...)
- **Geocooling (ou georoofing): en été**, utiliser le fluide de circulation souterraine (ou circulant sur le toit, la nuit), pour le rafraîchissement sans passer par la PAC.
- **Puits canadien**: extraire l'air extérieur par ventilation et le réchauffer (ou refroidir) par circulation souterraine.

# Les installations en France

Premières PAC en France : années 1980.

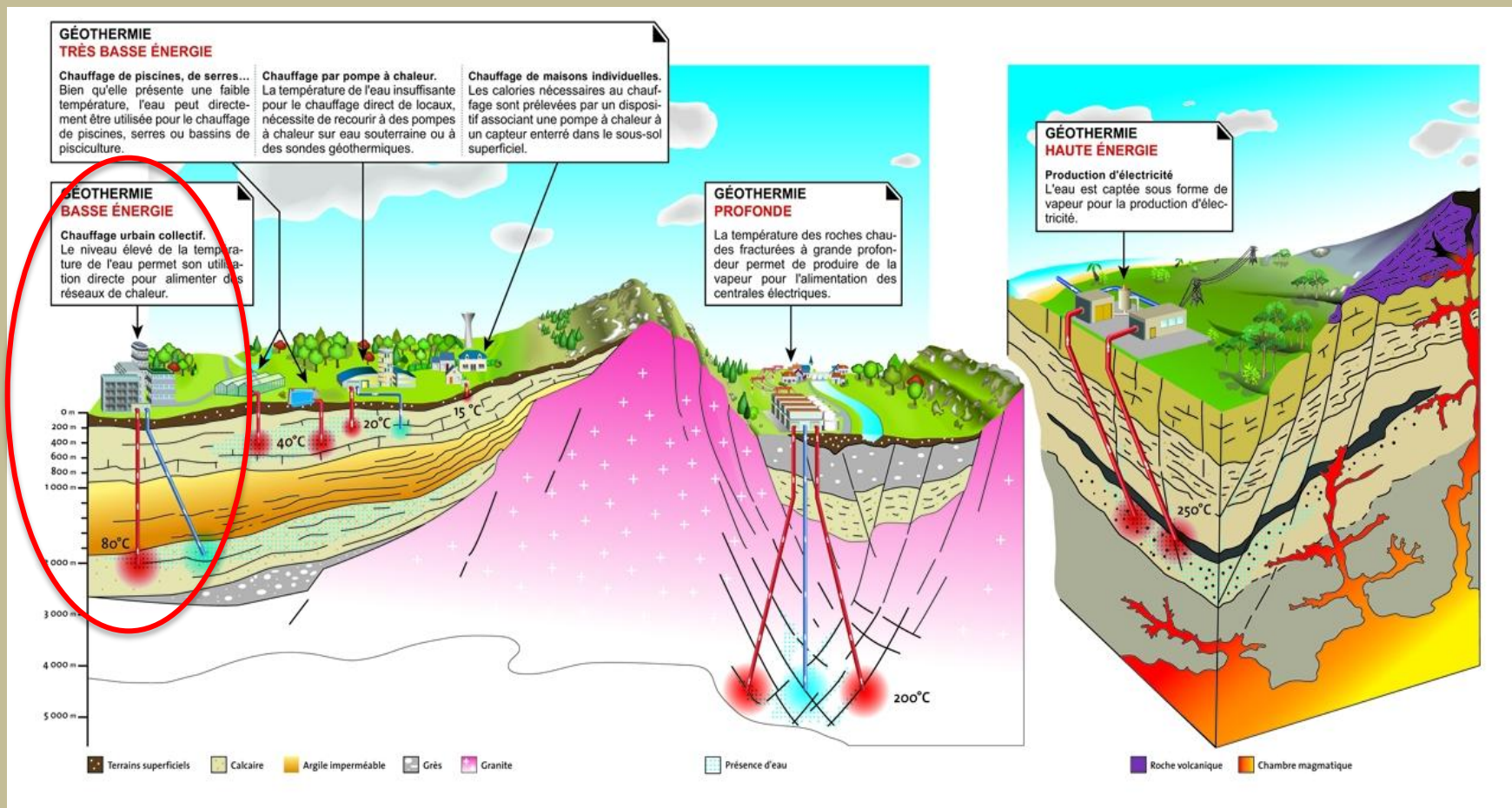
Production estimée des PAC géothermiques (MWh)



**Faible croissance** dans l'habitat individuel mais aussi dans le résidentiel collectif et tertiaire malgré l'avantage en **production de froid** (60 KWh de frigorie pour seulement 1KWh d'électricité consommée).

Plus de **130 000 installations** des maisons individuelles aux réseaux de chaleur (de Boulogne-Billancourt-92 à St-Laurent-de-Neste-65.)

# 3 - Géothermie à usage direct / production de chaleur sur aquifère profond / basse température

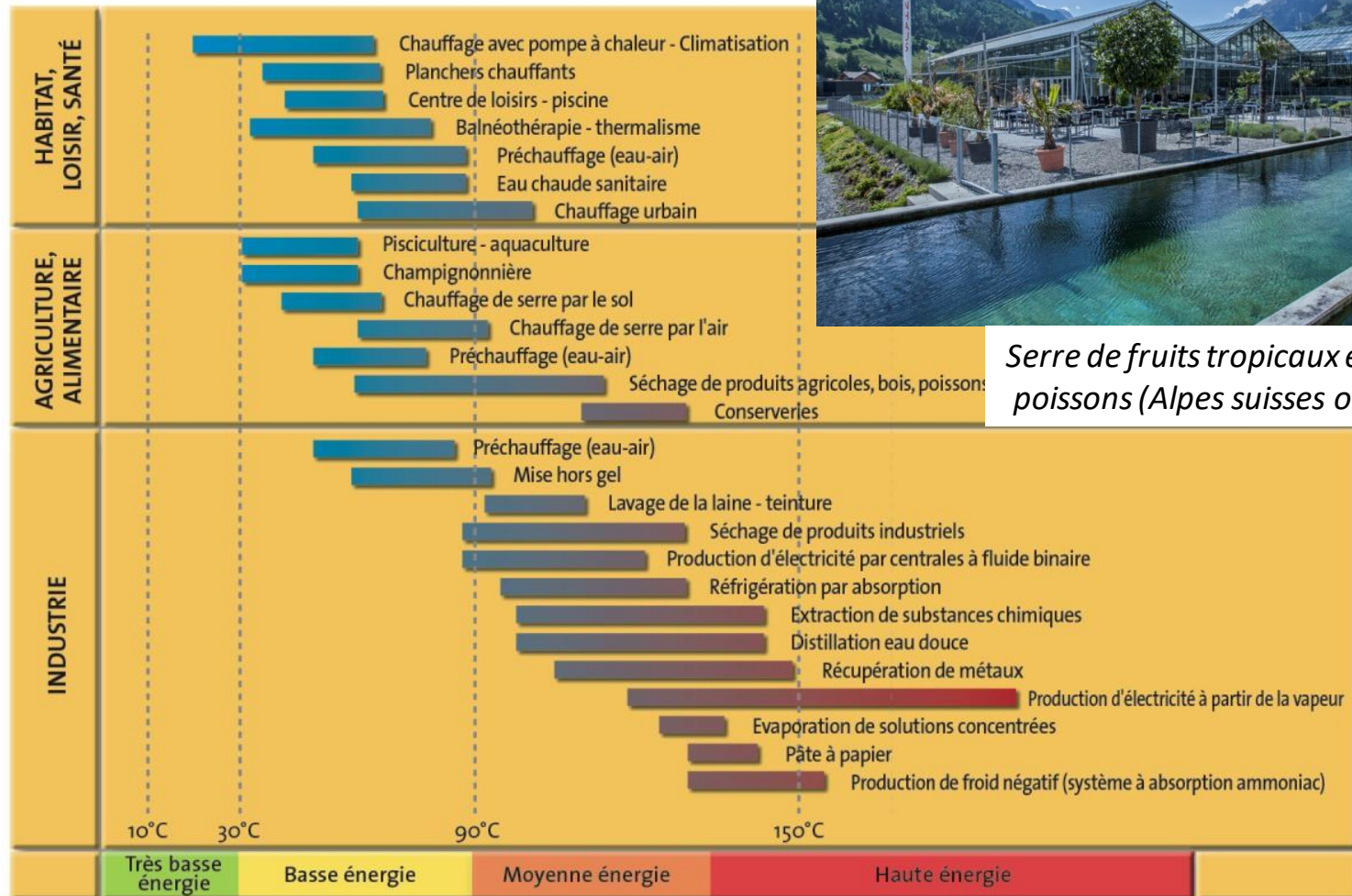


**Chauffage par géothermie : l'équivalent de + de 7 millions de logements dans le monde (dont 200 000 en France)**

# Géothermie – Quels usages directs?



*Serre de fruits tropicaux et élevage de poissons (Alpes suisses occidentales)*





Grotte Chauvet



Vue de la Grande Source. Thermale de 55 degrés qui donne à elle seule 4,500 h. en 24 heures et alimente d'abord une fontaine dont l'eau est employée à toutes sortes d'usages domestiques. C'est avec cette eau que les habitants de la ville chauffent en hiver leurs habitations, qu'ils trempent leur soupe qu'ils préparent leurs aliments sans user de combustibles. Sur 100 maisons agglomérées, 80 environ profitent de cet avantage. Au rez-de-chaussée de chacune d'elles est pratiqué un petit canal en maçonnerie communiquant avec un bassin intérieur recouvert d'une dalle mobile ; l'eau entrant par le canal se repand dans le bassin, chauffe le pave, et va ensuite ailleurs. Chacun peut diminuer le degré de chaleur.

Le Cantal Pittoresque  
1116 Chaudes-Aigues — Source du Parc  
Fontaine de CHAUDES-AIGUES

Source du Parc à Chaudes-Aigues (85 ° C)

# De la caverne aux réseaux de chaleurs

En pleine **période glaciaire** les Néanderthaliens puis les Sapiens d'Europe, ont su profiter de la chaleur de la Terre dans les cavernes.

L'usage des thermes) par les Romains (par exemple à Neyrac) est bien documenté.

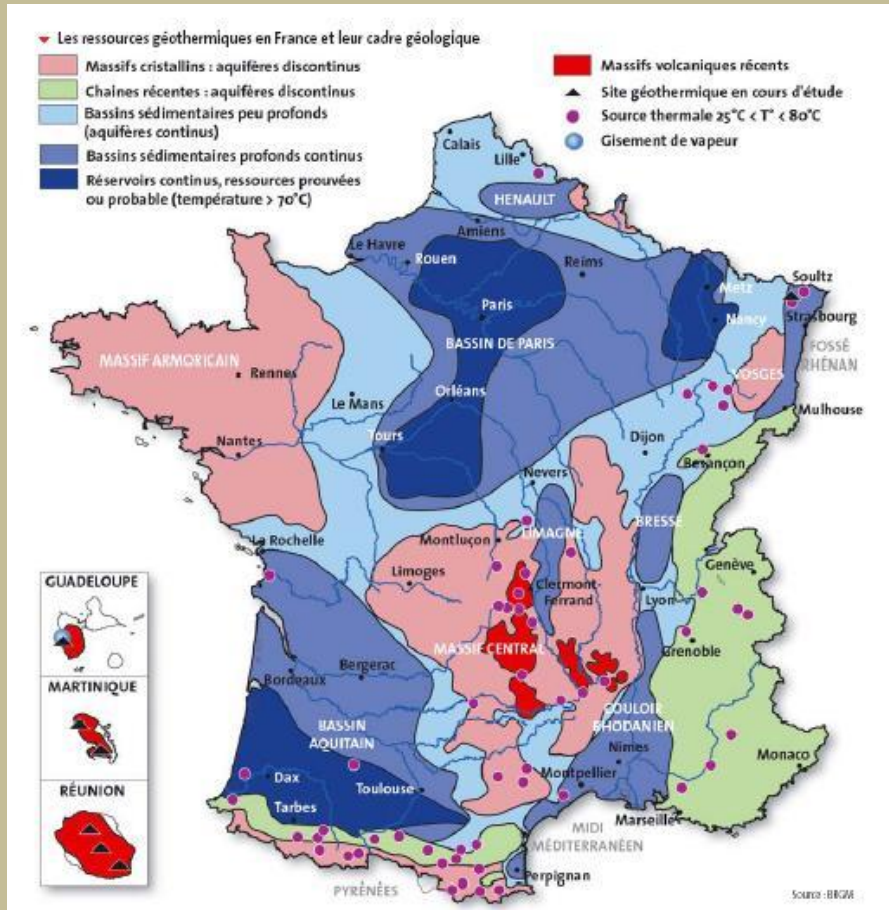
En 1330, à **Chaudes-Aigues** (Cantal) un réseau distribuait l'eau géothermale à plusieurs maisons.

**Premier doublet** géothermique en 1969 installé à Melun-l'Almont (77). 54 ans plus tard, il chauffe 5 000 équivalents logements

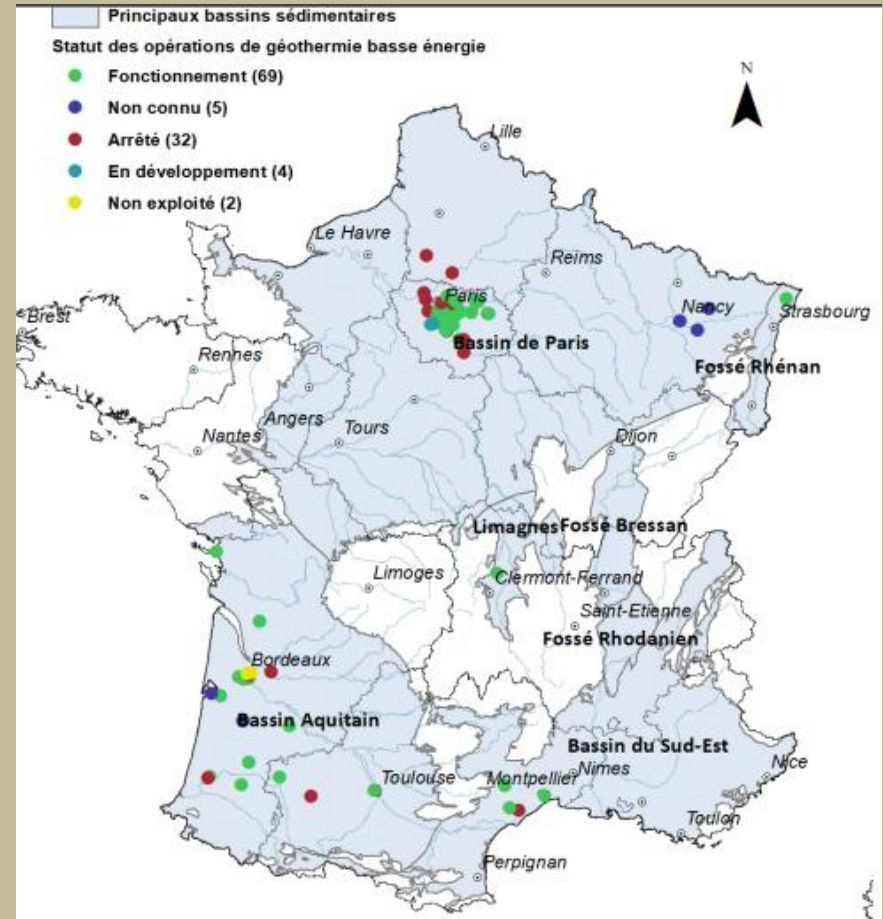
## Doublet

Ensemble de 2 forages, l'un pour la **production**, l'autre pour la **réinjection** dans l'aquifère d'origine. Avantages : i) absence de rejets d'eau très minéralisée dans l'environnement (circuit en **boucle fermée**), ii) **pérennité** du débit hydraulique, iii) **stabilité** des pressions d'exploitation et du sous-sol.

# Ressources et réalisations en France



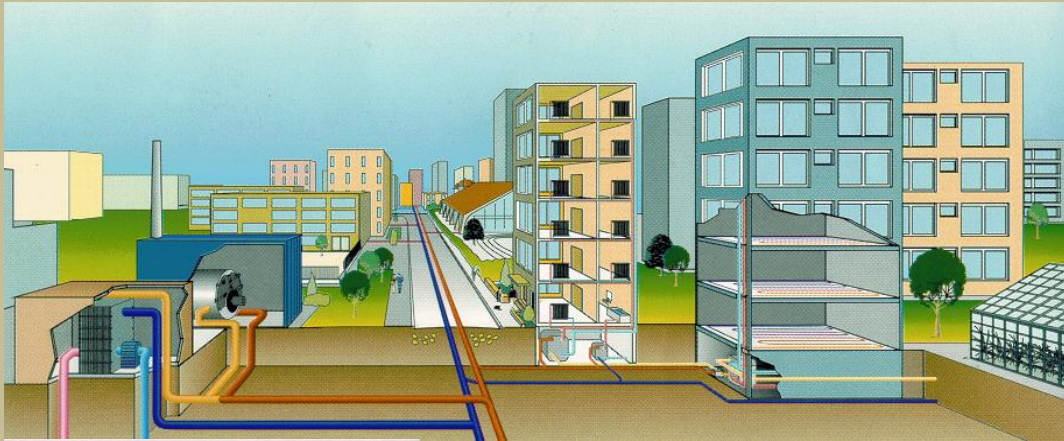
Carte des formations géologiques simplifiées du territoire



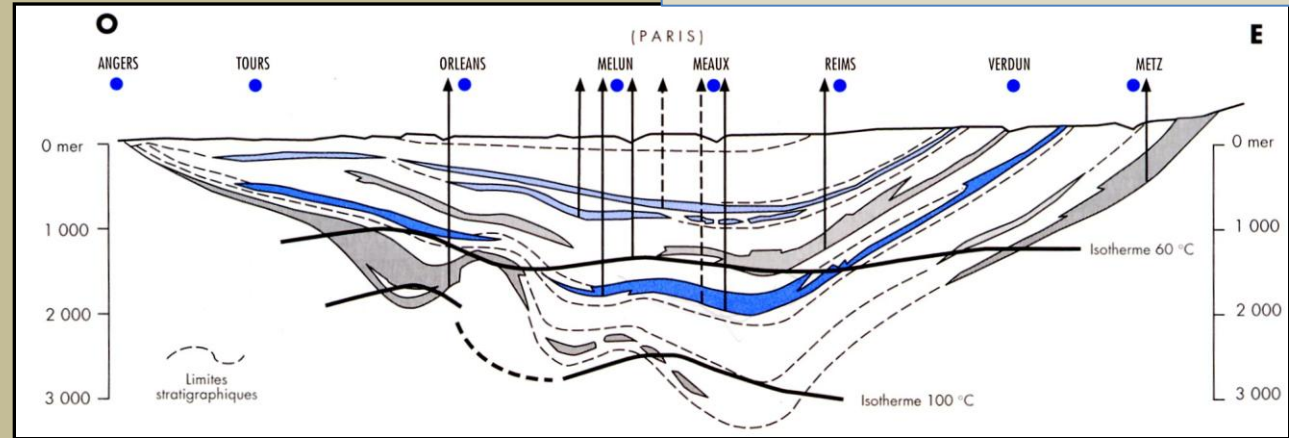
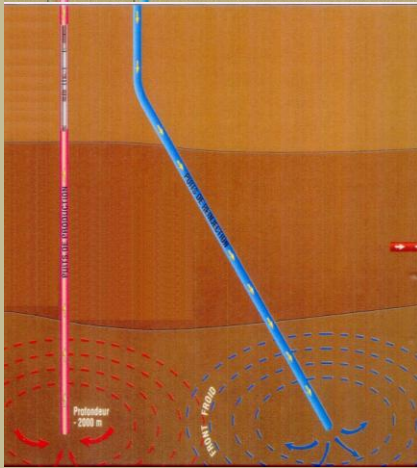
Localisation des réalisation de géothermie basse énergie

Des ressources sur 25 à 30% du territoire national

# Cas du Bassin parisien - 1

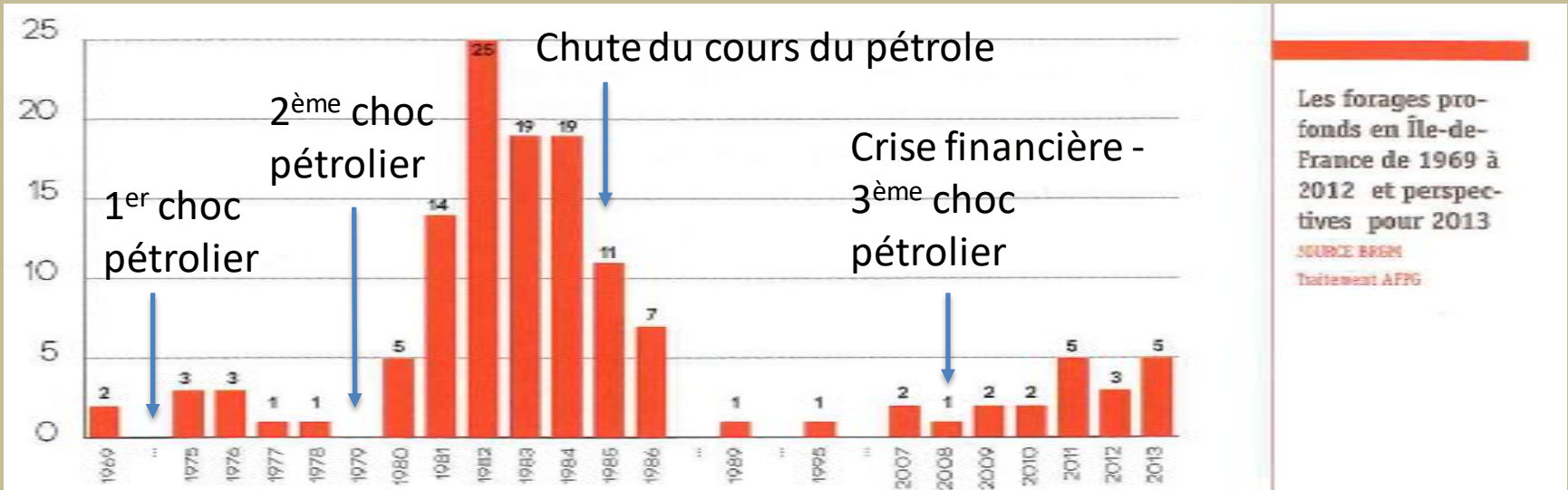


**Réseau de chaleur** ou réseau de chauffage urbain: ensemble de **canalisations** distribuant de la chaleur (eau chaude) en milieu urbain. Les utilisateurs se raccordent au réseau pour prélever une partie de cette chaleur grâce à un **échangeur**, puis ils la distribuent dans leurs **locaux**.



**Dogger:** Formation à dominante **calcaire** du Jurassique moyen (-175 à -154 millions d'années). Principal aquifère géothermique exploité en région parisienne et le plus utilisé d'Europe. **Entre 1 500 et 2 000 m** de profondeur. L'eau y est **fortement minéralisée** (6,5 à 35 g/l), sa température selon la profondeur **de 65 ° C à 85 ° C**.

# Cas du Bassin parisien – 2: aleas économiques



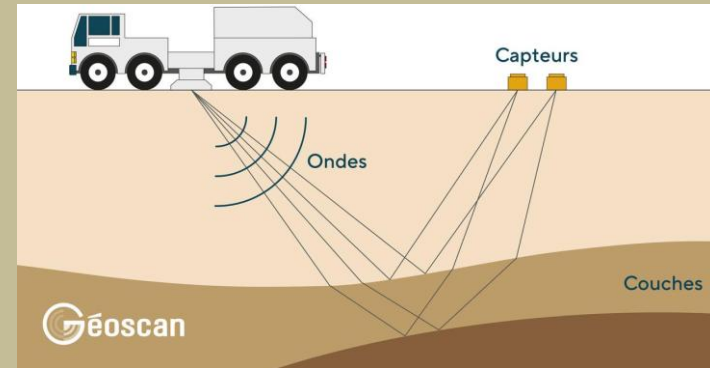
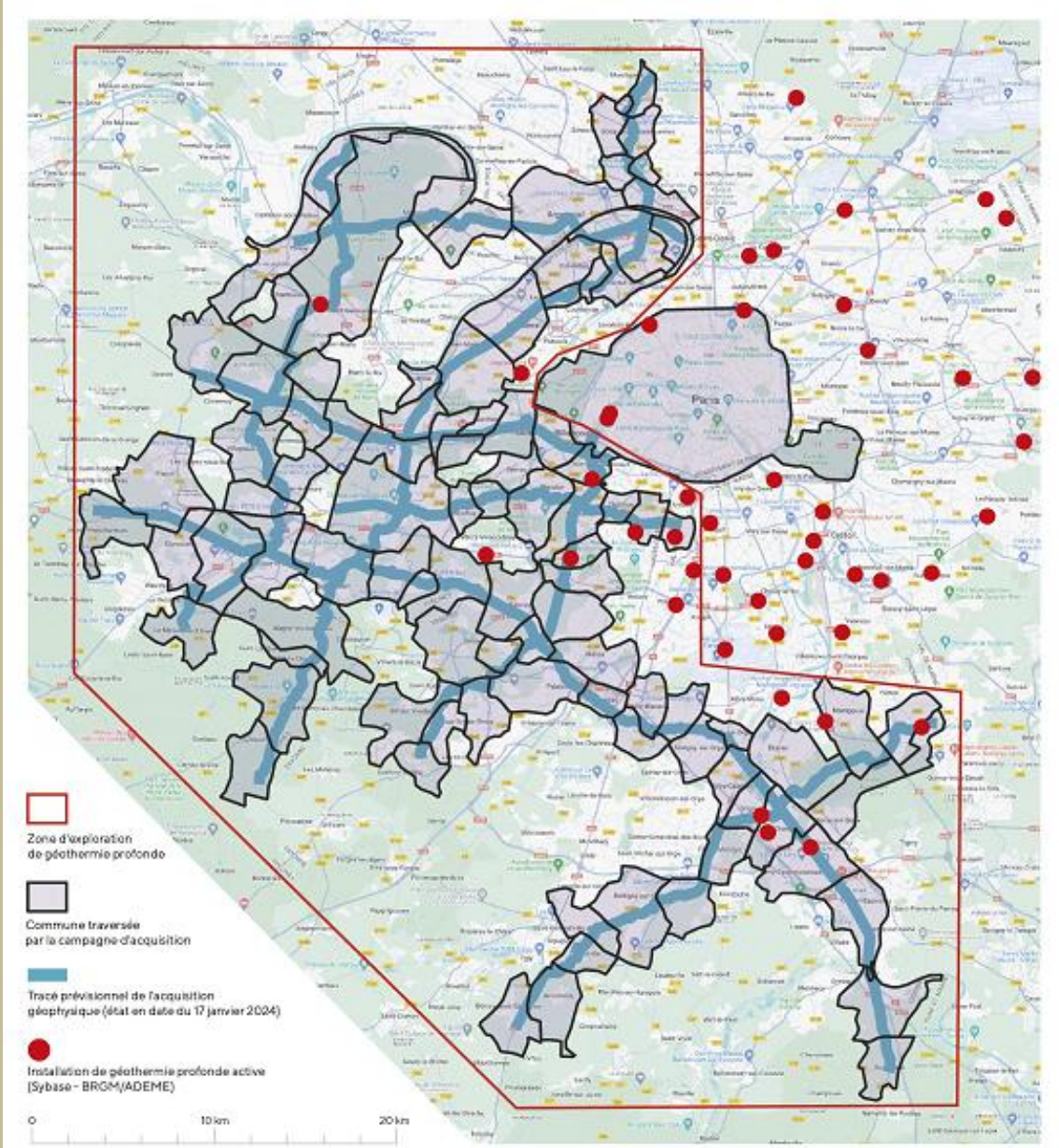
*Illustration de la variabilité des réalisations (en Ile de France sur la période 1969-2012)*

L'exploitation depuis plus de 50 ans du Dogger en Ile de France : **record mondial de densité d'installations** (54 /1 600 km<sup>2</sup>) avec 310 000 équivalents-logements, 400 000 t de CO<sub>2</sub> évitées (/ gaz).

La France se situe parmi les leaders mondiaux des réseaux de chaleur géothermiques.



# Opération Geoscan 2024



Du 26 février au 15 avril 2024, 3 camions sillonneront de nuit, **l'ouest et le sud de l'Île-de-France**.

Objectif: acquisition de données géophysiques sur le sous-sol de 106 communes. BRGM analysera ces signaux bruts en les couplant avec des données de forages pétroliers des années 1970, ou de puits de géothermie existants. Livrable en 2024 et 2025.

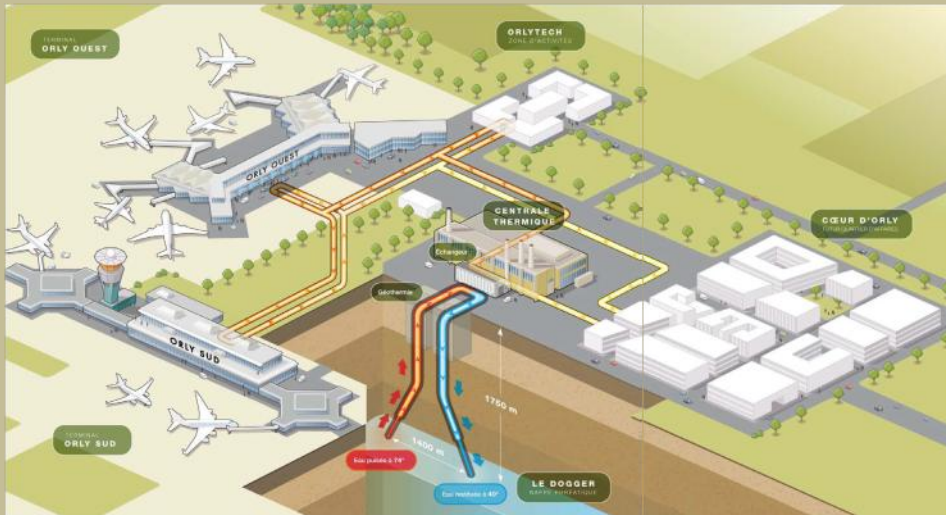
# Exemples de réalisations en milieu urbain

La **Maison de la radio** fut le 1<sup>er</sup> bâtiment chauffé par géothermie, en France, il y a 60 ans, en puisant dans la nappe de l'**Albien** (600 m de profondeur). Depuis 2011, une ressource de très basse température à 45 m permet chauffage et climatisation.

**Le village des athlètes olympiques de Paris 2024**, à St Ouen et St Denis, sera alimenté pour la chaleur et le rafraîchissement à 68 % par géothermie à partir de **3 nappes**.

L'**usines Coca-Cola de Grigny et Viry-Chatillon** (Essonne), sera raccordée d'ici juillet 2025, au **réseau de géothermie** des collectivités locales à partir de la nappe du **Dogger**. (Les Echos 02/12/2023).

**Aéroports de Paris-Orly** à 50% par chaleur géothermique profonde en 2024 **combinée** à la chaleur fatale de l'unité de valorisation énergétique de Rungis.



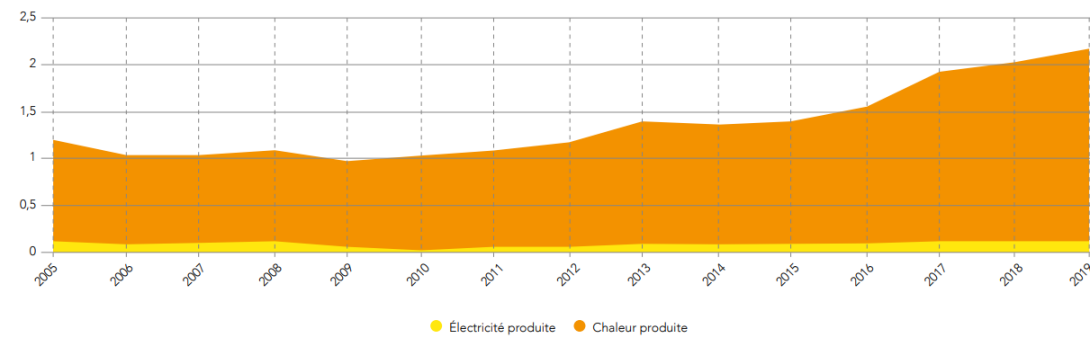
*Schéma du doublet géothermique de l'aéroport de Paris-Orly*

**À Bordeaux métropole**, 30 ans après des réalisations toujours fonctionnelles Bordeaux-Mériadeck, Pessac, ..., de nouveaux **grands projets de réseaux de chaleur** géothermiques sont lancés: Plaine de Garonne, Grand Parc, Métropole Sud, Aéroparc avec combinaison de plusieurs nappes.

# Production de chaleur en France et en Europe

## Évolution de la production d'énergie géothermique en France (2005-2019)

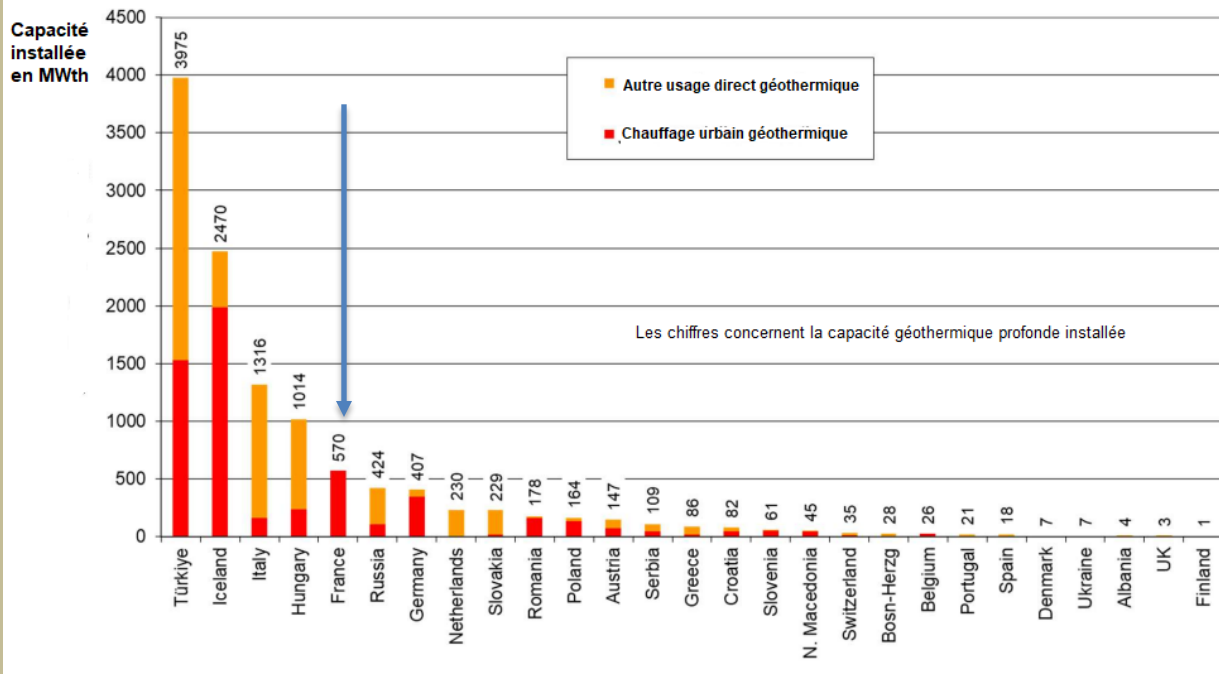
Source : Calculs SDES, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-Energies-renouvelables-2021/14-geothermie> (consultation du 27/10/2021)



En 2019, la production d'énergie géothermique s'élevait à 4 492 GWh, en France métropolitaine, = **0,7 % de la consommation finale de chaleur** .

Des centrales géothermiques fonctionnent en **Ile-de-France**, en **Aquitaine** et dans le **bassin rhénan**

*Puissance géothermique d'origine profonde installée en usage direct en Europe en 2021 indiquant la part du chauffage urbain (source EGEC)*



# Partie 4

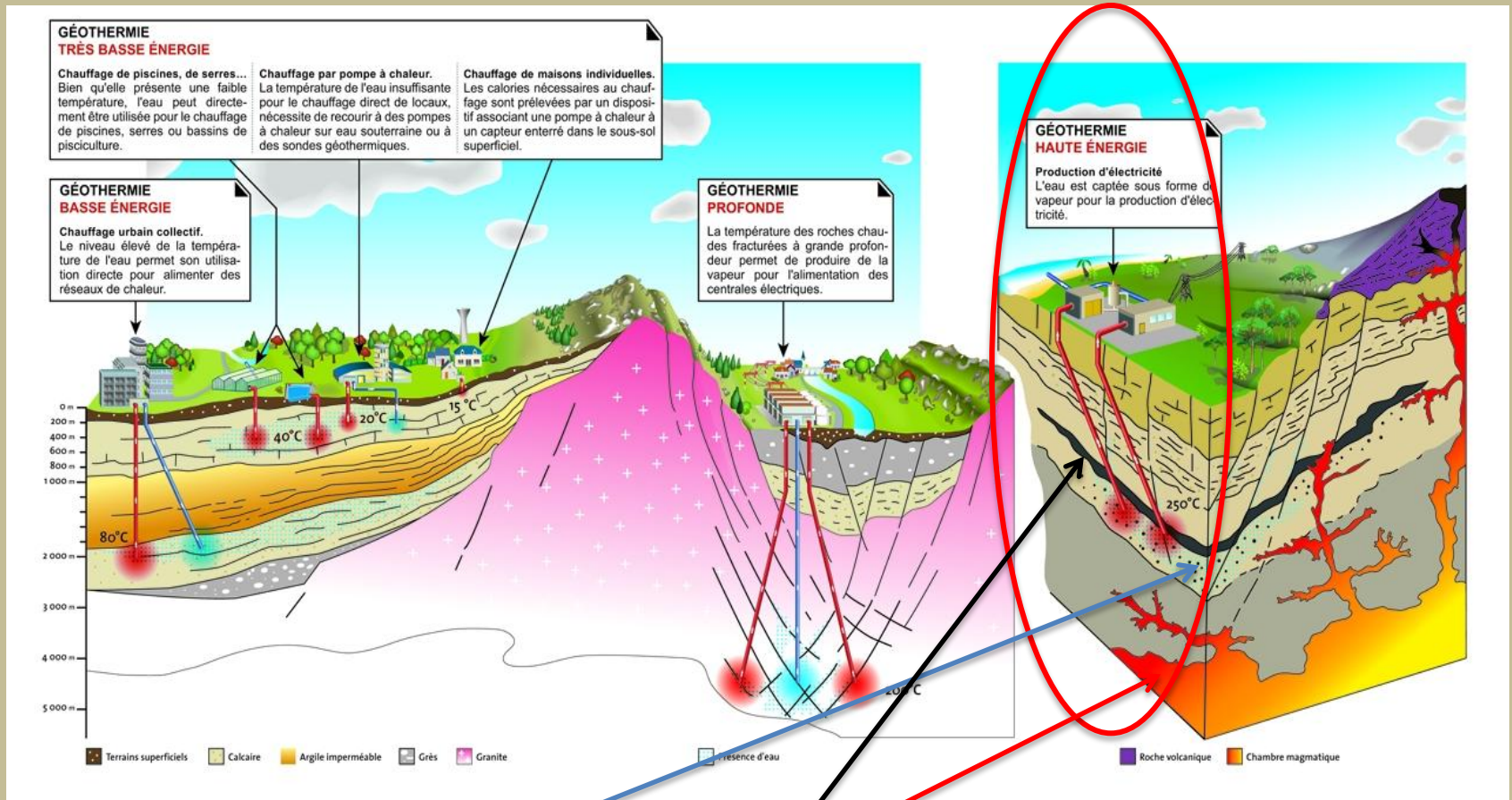
## ➤ 4 - Géothermie conventionnelle de haute énergie

- Système géothermal
- Zones actives du monde
- Méthodes d'exploration géothermique de surface
- Modèle de champ haute température
- Étapes d'un projet géothermique
- Éléments d'une centrale géothermique

➤ Projet, champ et centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe)

- Etapes de l'exploration à l'exploitation
- Perspectives d'autres îles volcaniques d'outre-mer
- Capacités et productions d'électricité géothermique en Europe et dans le monde
- Éléments de comparaison avec d'autres sources d'énergie électrique

# 4 - Géothermie haute énergie / Hte température /Hte enthalpie



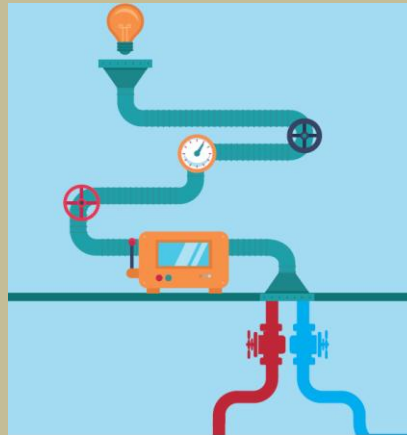
**Système géothermique:** (i) source de **chaleur** (ii) réservoir + **recharge** en eau + **circulation** souterraine et fuites (iii) **couverture imperméable**.

**Production d'électricité géothermique: L'équivalent de + de 10 tranches de centrales nucléaires dans le monde**

# 4 - La géothermie conventionnelle de haute énergie



Centrale de Wairakei, Nelle Zélande



Centrale géothermique de Sugawara (5MW, Japon démarrage en 2015)

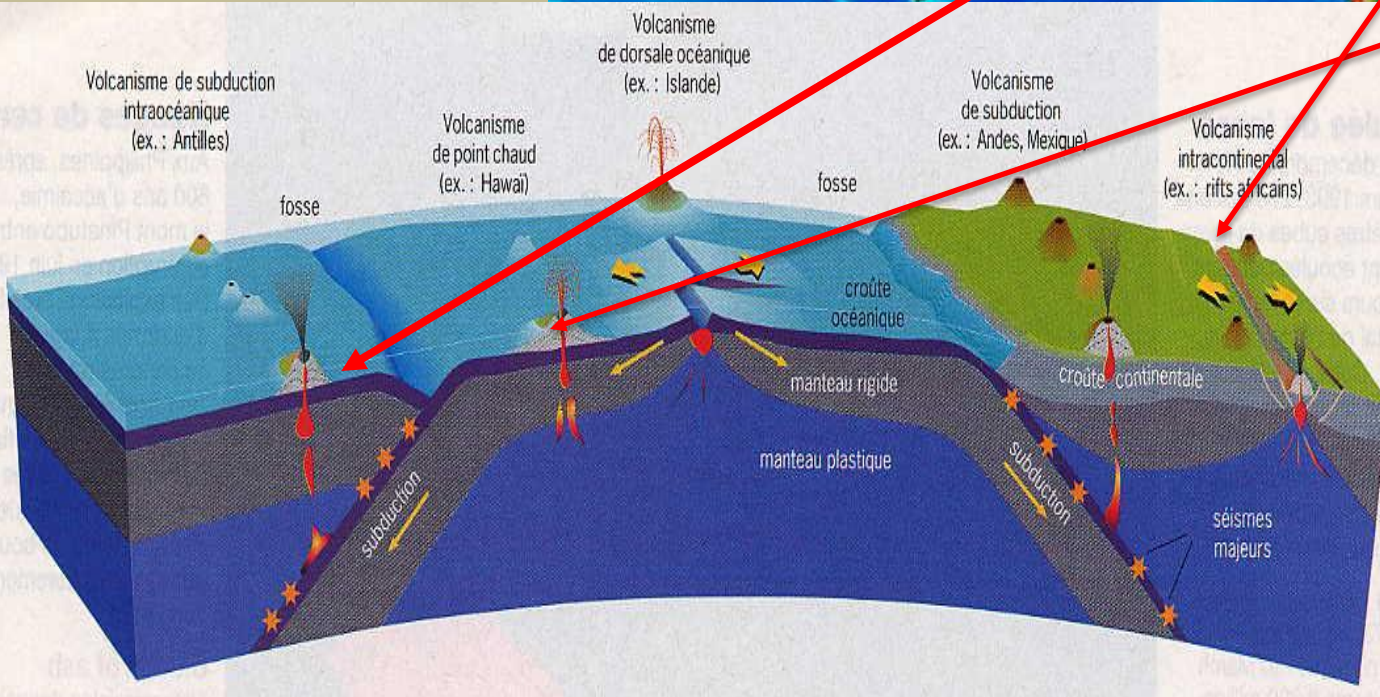
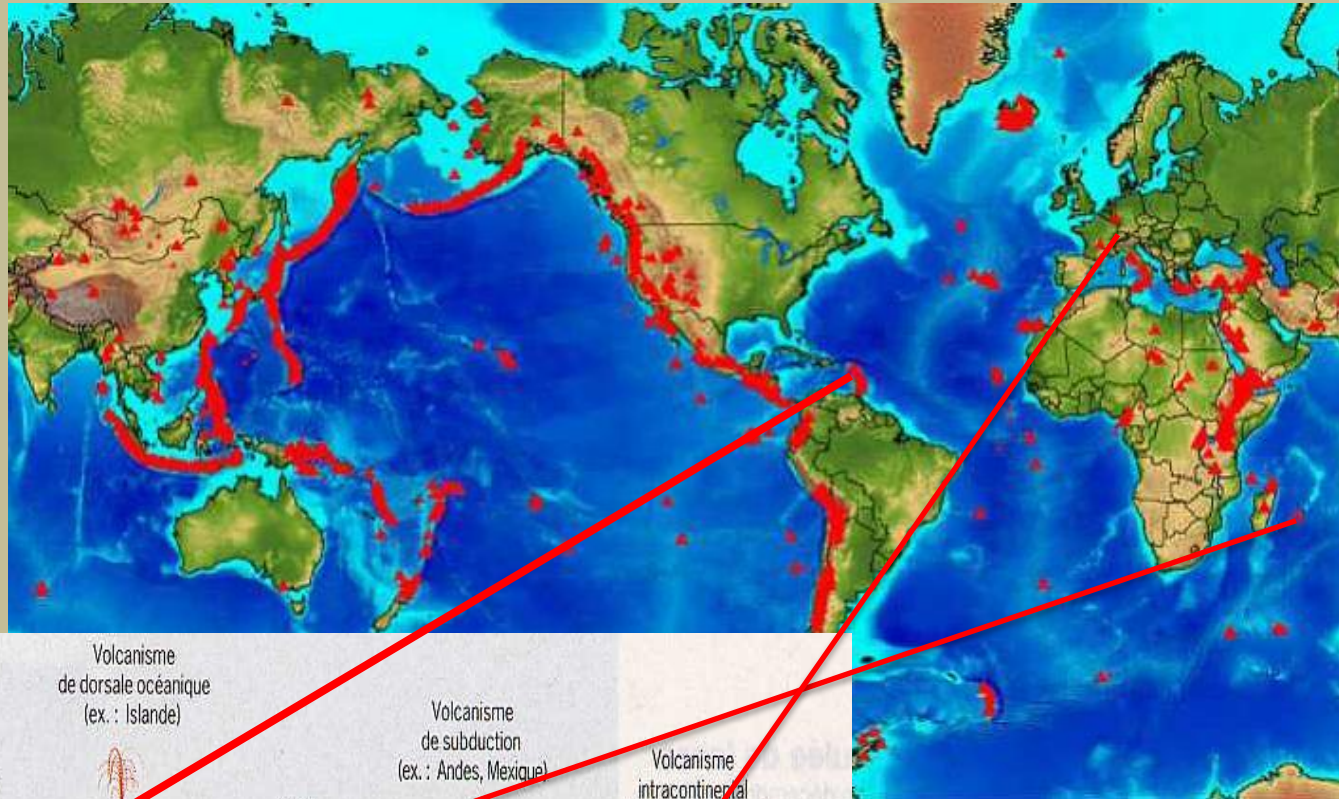


Centrale géothermique Blundell à Roosevelt Hot Springs, Utah, USA (Photo: R. Blackett)



Centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe)

# Zones actives du globe



Répartition aux **limites des plaques tectoniques** + quelques points chauds et fossés continentaux

# Méthodes d'exploration géothermique de surface

**Objectifs:** mettre en évidence la présence d'un **réservoir**, en déterminer la localisation, l'extension et la température

- **Géologie**
- **Hydrogéologie**
- **Géochimie**
- **Géophysique**
- **Modélisation**



*Equipe de gravimétrie, Masigit-Guntur, Java Indonésie*



*Acquisition de données magnéto-telluriques, Montagne Pelée, Martinique (BRGM)*



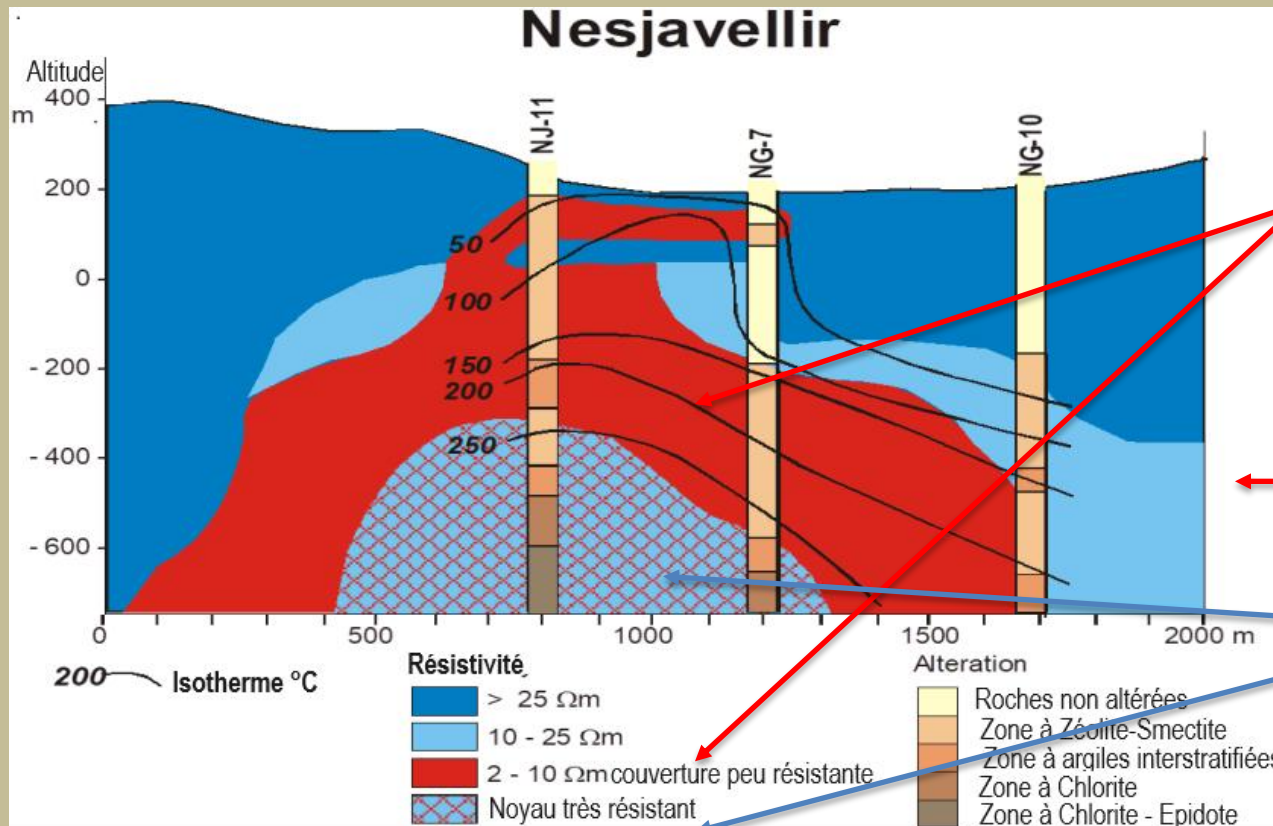
*Observation géologique, Plaine du Lamentin, Martinique*

*Prélèvements de fumeroles (Masigit-Guntur, Java Indonésie)*





# Modèle de champ « haute température »



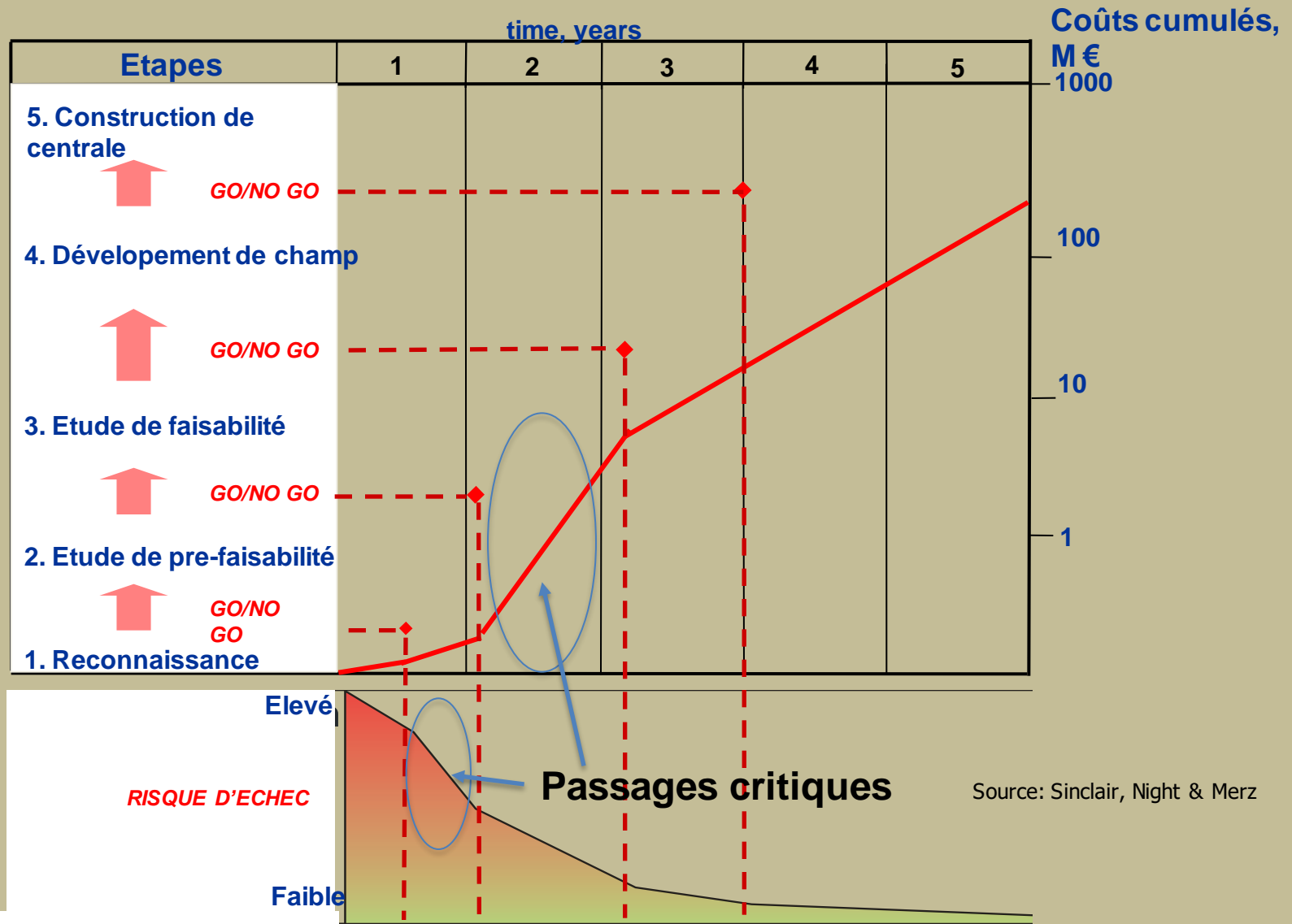
Couverture d'altération argileuse (conducteur) en dôme



Réservoir (résistant)

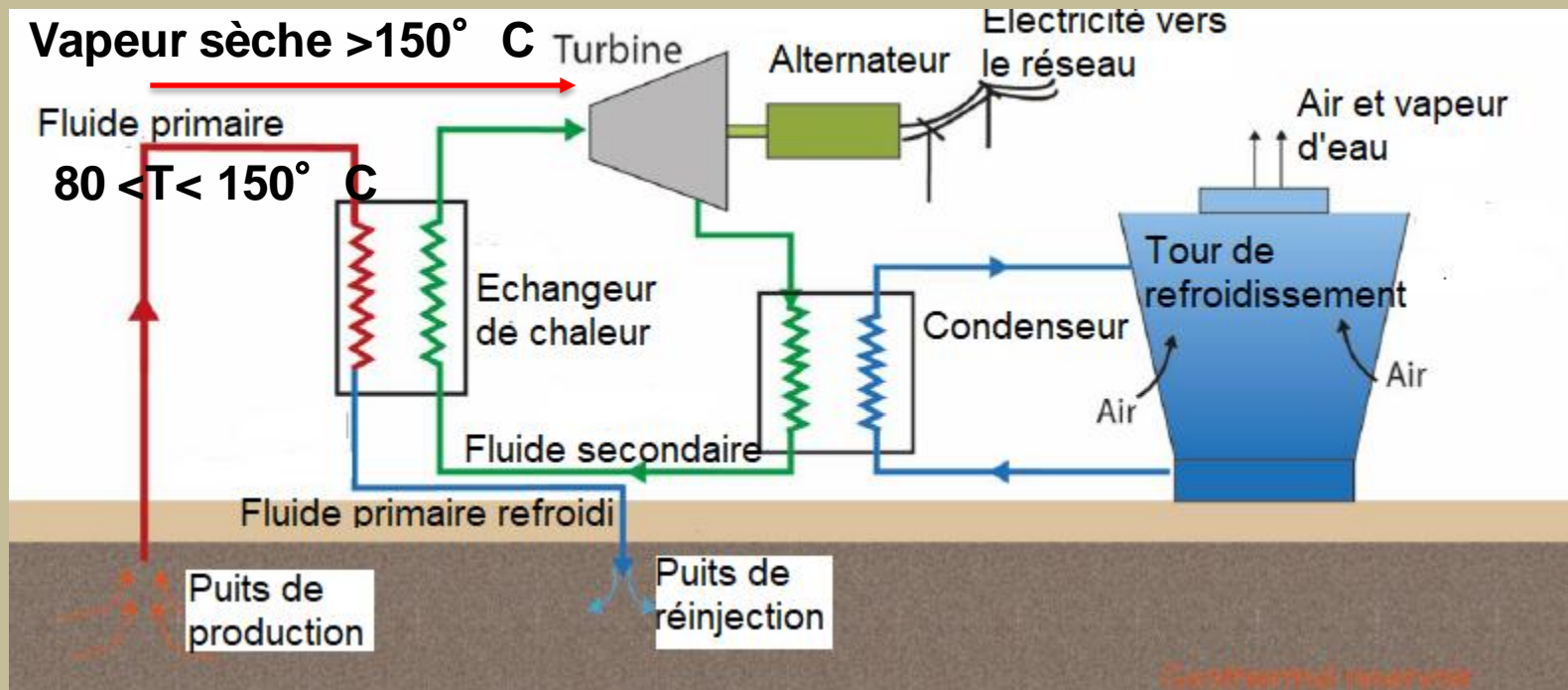
Modèle résultant d'études électromagnétiques et géologiques calées sur forages

# Les étapes d'un projet géothermique



**En résumé:** plus on progresse dans le projet, plus les risques diminuent mais plus les coûts augmentent; les études géoscientifiques restent nécessaires à tous les stades.

# Les éléments d'une centrale géothermique - 3



*Schéma d'une centrale fonctionnant à partir de fluide binaire / secondaire.*

## ORC (Organic Rankine Cycle)

Les machines ORC sont constituées d'un **circuit secondaire** fermé avec **fluide caloporteur à faible point d'ébullition**, utilisées pour la production d'électricité par turbinage. Le transfert de chaleur du circuit primaire, c'est-à-dire le circuit d'eau géothermale, est réalisé par un échangeur de chaleur.

# Les éléments d'une centrale géothermique - 1



*Ailettes du groupe turboalternateur*



*Séparateur haute pression .Bouillante  
(CFG Services)*



*Tours de refroidissement  
Monteverdi Maritimo, Toscane*



*Transformateur Monteverdi Maritimo, Toscane*



*Salle de contrôle-commande, Bouillante,(CFG Services)*

# Projet, champ et centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe)



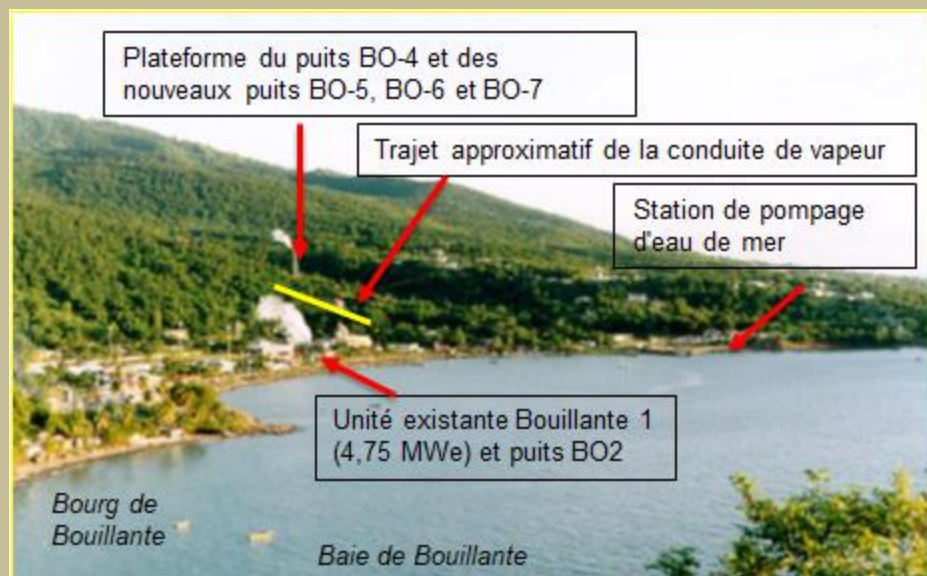
Vue de la baie et du site d'extension du champ  
(en haut à droite)



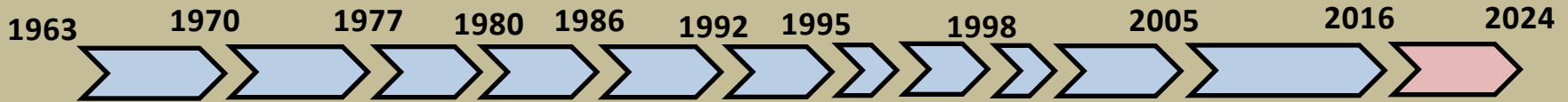
Vue aérienne d'ensemble. (2008) CFG Services



Tête de puits et plateforme de forage. (2008) CFG Services



# Etapes de l'exploration à l'exploitation



BRGM +  
EURAFREP  
exploration

60 ans déjà!

EURAFREP : forages  
BO-1, BO-2, BO-3, BO-4

BRGM  
Exploration +  
EDF  
construction

EURAFREP-EDF (1980-  
1986) : construction de  
Bouillante 1

EDF (1986-1992) :  
exploitation de B1  
(4.2 MWe)

Travaux de recherche BRGM (1995-2016)

BO-4 stimulation  
thermique (1998-  
1999)

GB (2000-2002) : forages  
BO-5, BO-6, BO-7

GB (2003-2005) :  
construction de  
l'unité B2

ORMAT  
MT

Réinjection  
partielle dans  
BO-2, depuis  
2015

GB (depuis 2005) :  
exploitation de B2 (11 MWe)

Nouveaux  
puits  
réinjection &  
production =>  
passage de 15  
à 25 MWe

*Production et puits (en rouge)*

1998: ≈ 2% de la  
consommation  
annuelle d'électricité  
de la région

2005-2020:  
≈ 5 à 7%

2023-  
2030: ≈  
15 à 25%

1995 - 2016 : Géothermie Bouillante S.A. - GB (BRGM majoritaire, EDF) :

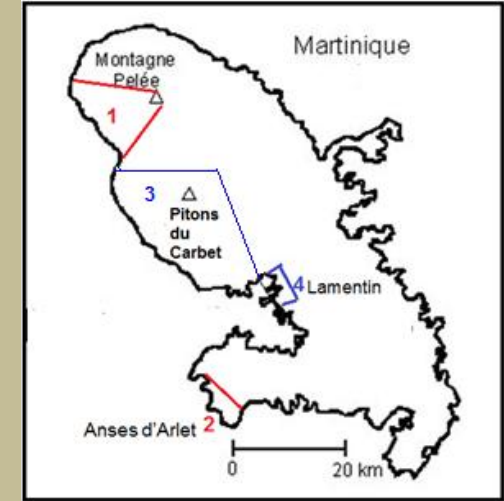
depuis 2016: GB (64% ORMAT, 15% BRGM, 21% Caisse des Dépôts et Consignations)

Création en 2023 d'un  
Centre d'Excellence  
Caribéen de la  
Géothermie (CECG)

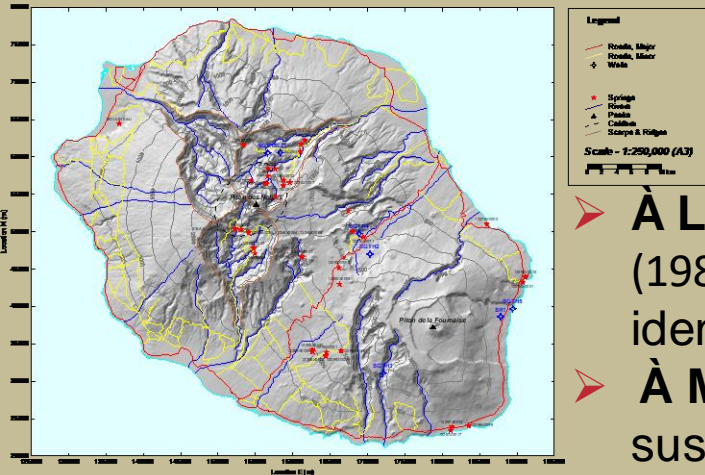
# Perspectives d'autres îles volcaniques d'outre-mer

## ➤ En Martinique

- 4 phases majeures d'exploration
- 4 zones prospectées
- 2 cibles haute température (Montagne Pelée, Petite Anse – Diamant) et 1 cible pour la production de froid (Lamentin)



Distribution of Thermal Springs and Water Samples on Reunion

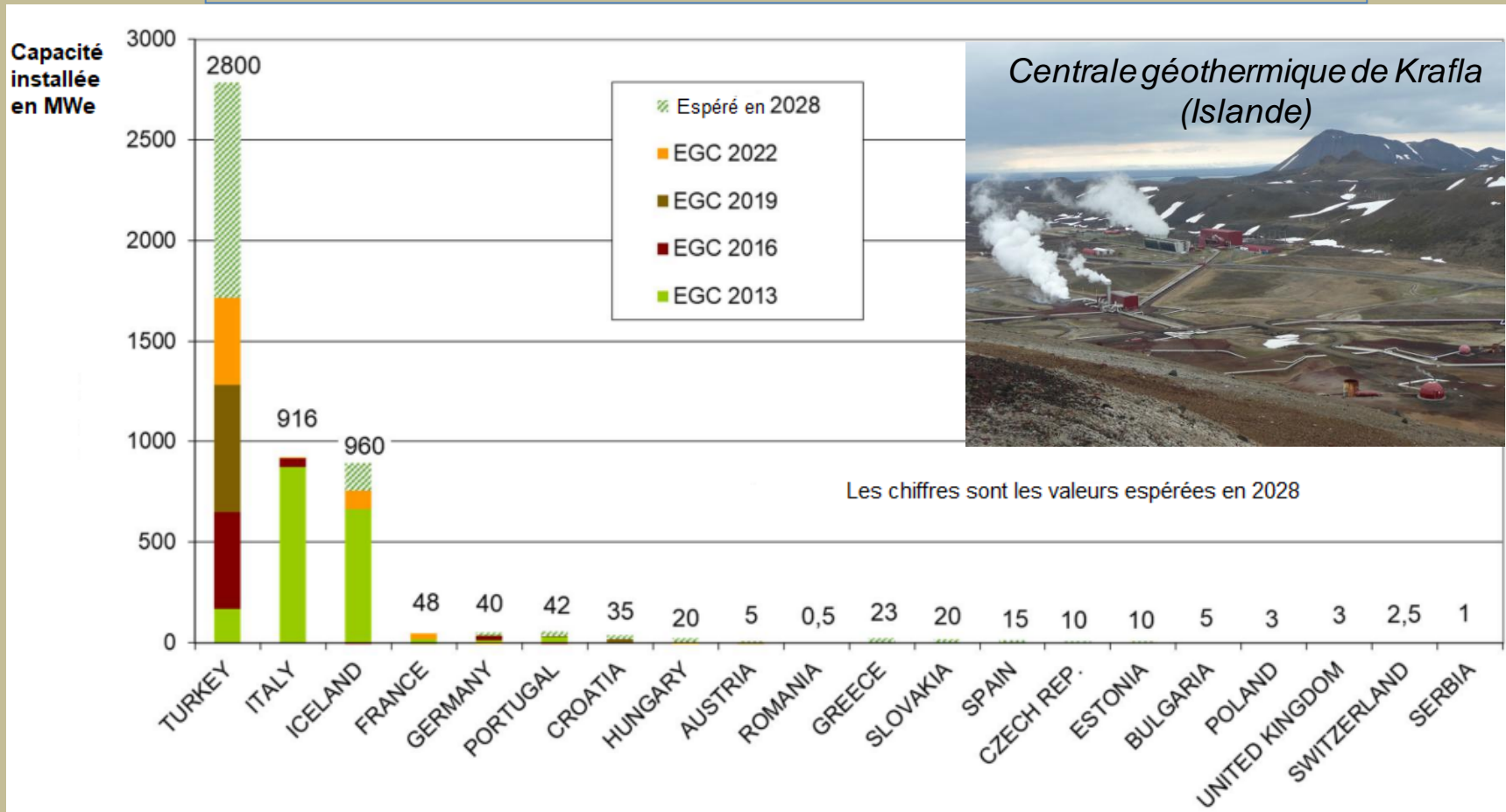


- **À La Réunion**, Blocage après l'échec du forage de Salazie (1983) mais des gisements haute température ont été identifiés
- **À Mayotte**, Petite-Terre gisement haute température suspecté (relance du projet au Karthala, Gde Comore).

- **A Wallis**, aux Kerguelen, ...conditions réunies pour exploration Haute Energie
- **En Polynésie française** exploration complémentaires envisagée sur Tahiti

**En Dominique**, plus riche en ressources géothermiques et moins peuplée l'île peut compléter ses voisines, Guadeloupe et Martinique, en leur fournissant une électricité géothermique via des câbles sous-marins

# Capacités et production d'électricité géothermique\* en Europe



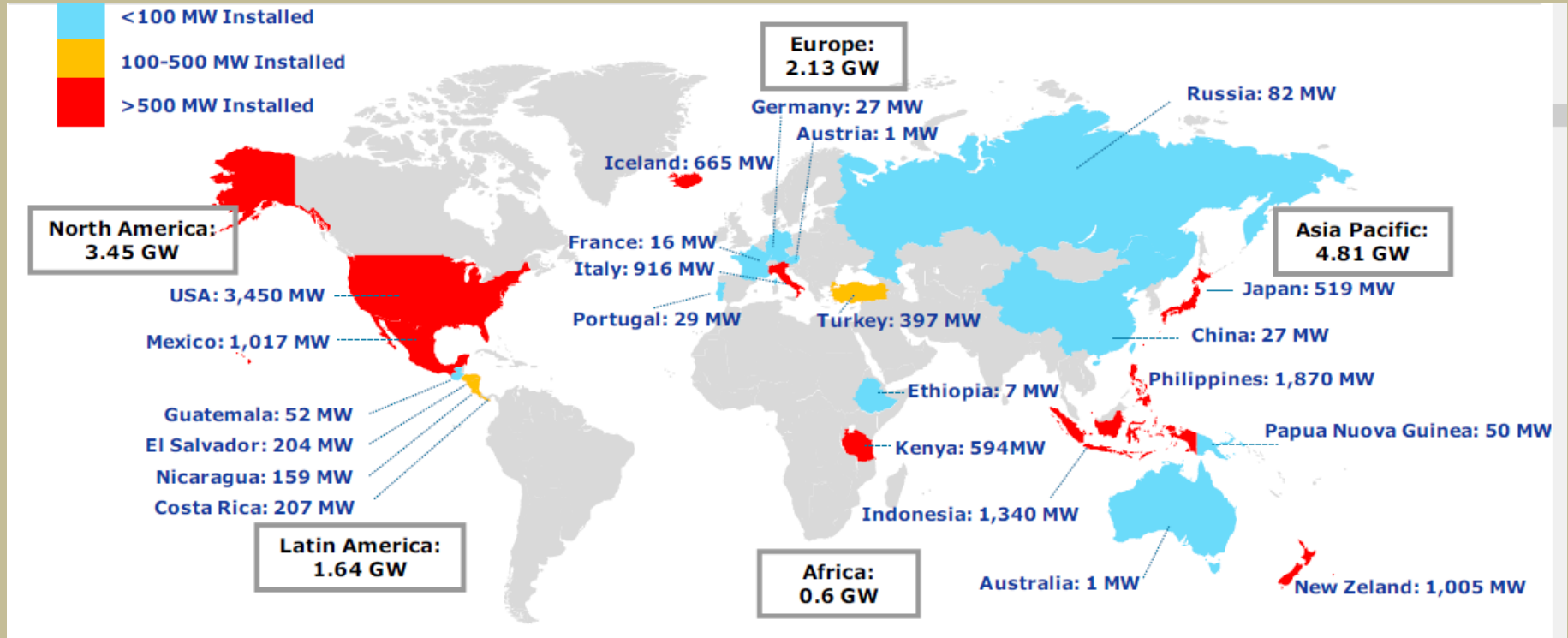
Puissance géothermique électrique installée en Europe en 2021 avec les prévisions pour 2028 (source EGEC)

\*Inclut la géothermie profonde

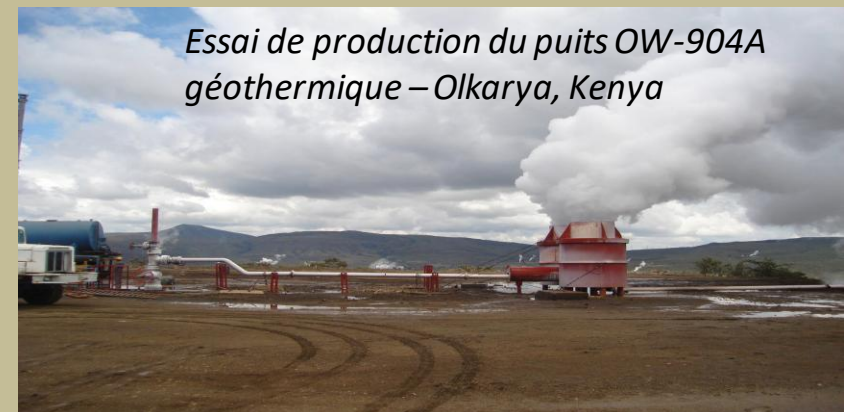
- 1 tranche de centrale nucléaire = 1 000 Mwe
- Installation éolien en France en 2023 = 17 000 MWe



# Capacités et production d'électricité géothermique dans le monde



La Géothermie est arrivée à **maturité** sur le plan technologique et à une échelle mondiale : 13 GWe installés en **2015** (18,5 GWe attendus) 70 GWe attendus en 2050 (+70 GWe EGS)

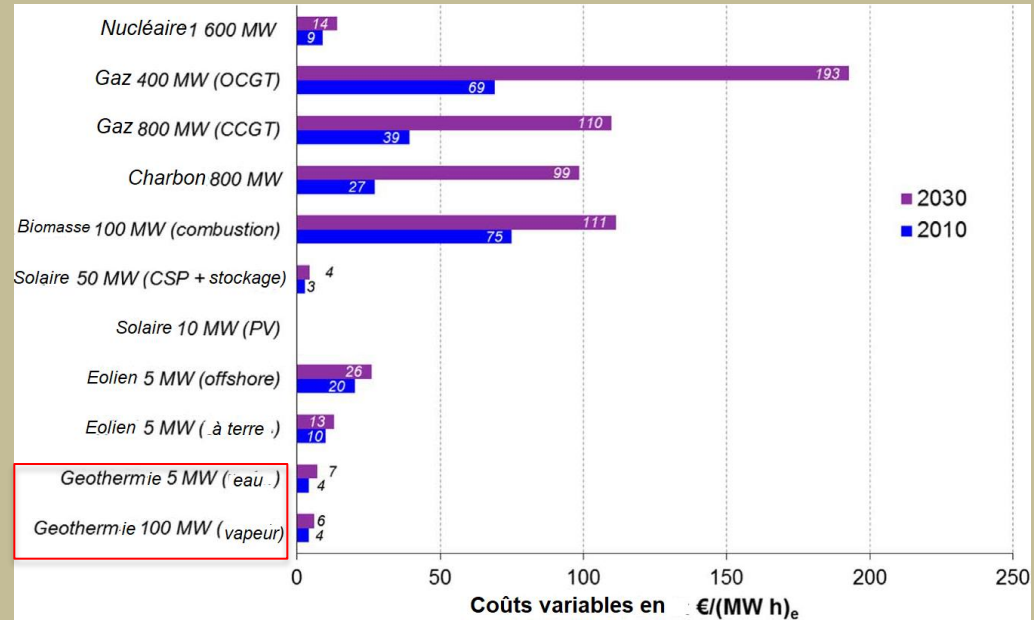


*Essai de production du puits OW-904A géothermique – Olkaria, Kenya*

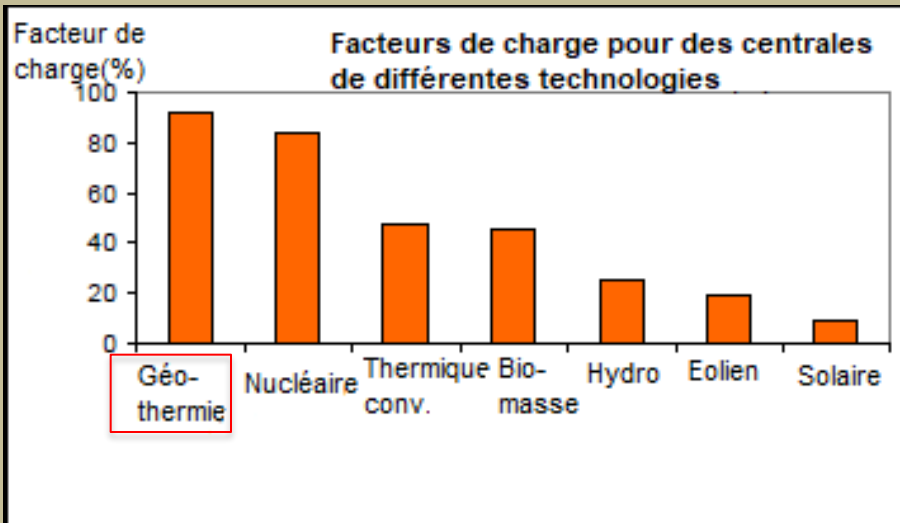
# Eléments de comparaison avec d'autres sources d'énergie électrique

## ➤ Coûts

Coûts variables complets par énergie électrique produite, (y compris les coûts variables pour fonctionnement et maintenance, carburant et émission de GES (Clauser & Ewert, 2017).

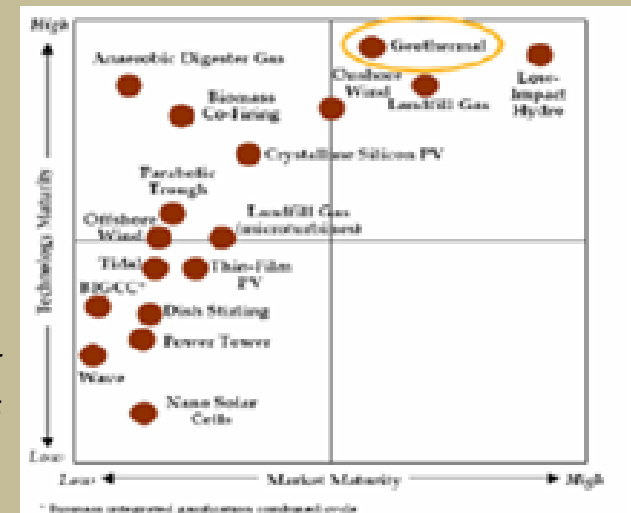


## ➤ Facteur de charge



## ➤ Maturité

Comparaison des maturités technologiques et commerciales des filières ENR

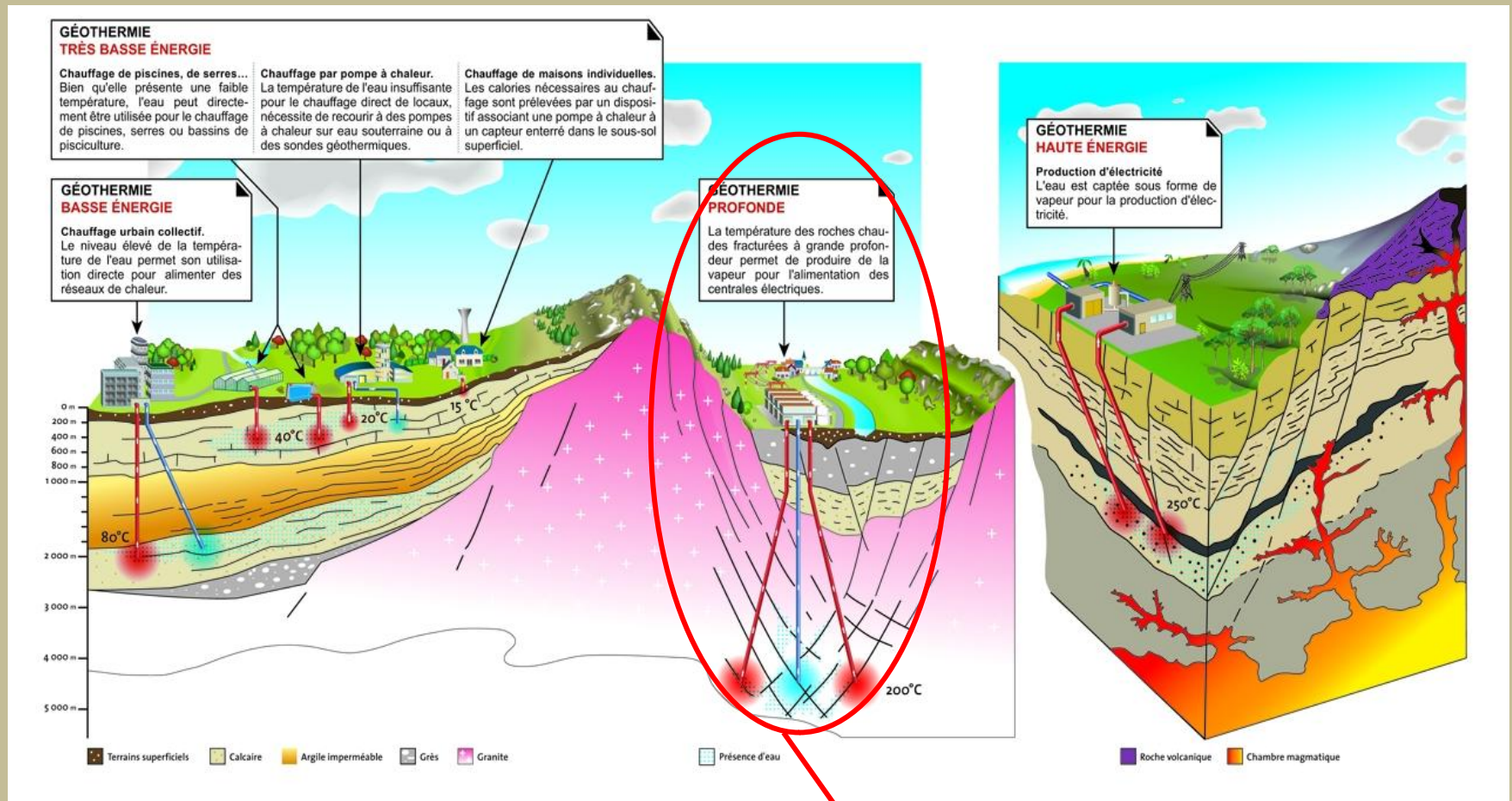


# Parties 5, 6, 7 et 8

- 5 - La géothermie de 2<sup>e</sup> génération
- La géothermie profonde ou stimulée
- Répartition des ressources en France
- Soultz-sous-Forêts : projet, contexte, bilan
- La question des séismes induits: cas de Vendenheim
- Le lithium : un sous-produit ?

- 6 - Et l'Ardèche ?
- Opérations de surface, eaux thermales
- Valorisation énergétique des rejets d'eaux thermales
- Permis de recherche en géothermie profonde et haute énergie
  
- 7- Pistes de progrès et de recherche :
- Améliorations technologiques
- Nouvelles cibles et géothermie de 3<sup>e</sup> génération
  
- 8 - Bilan et conclusion

# La géothermie profonde ou stimulée

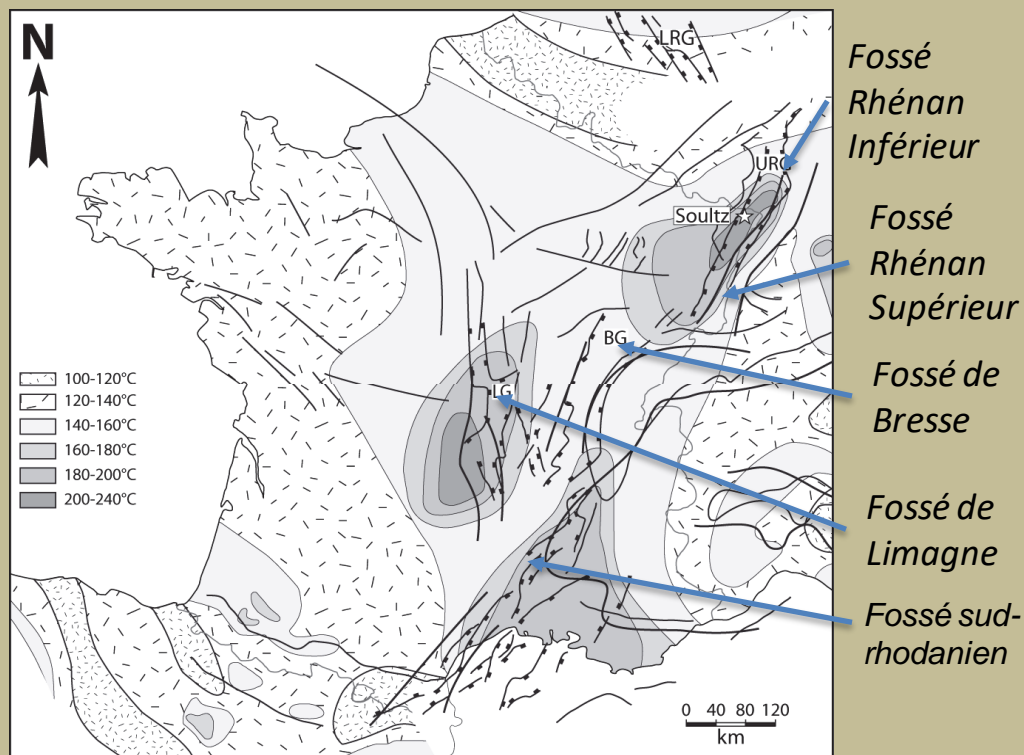


Géothermie de 2<sup>e</sup> génération

Pilote de 1,5 MWe à Soultz + exploitation Li

# Répartition des ressources en France

En Métropole, plus de **20 permis de recherche** et concession déposés en 2017 (investissement industriel de l'ordre d'un milliard d'euros sur dix ans et plus de 1 000 emplois en phase construction et exploitation).



*Carte des températures extrapolées à 5 km de profondeur et localisation de quelques structures majeures (d'après Hurtig et al., 1992; Dèzes et al., 2004).*

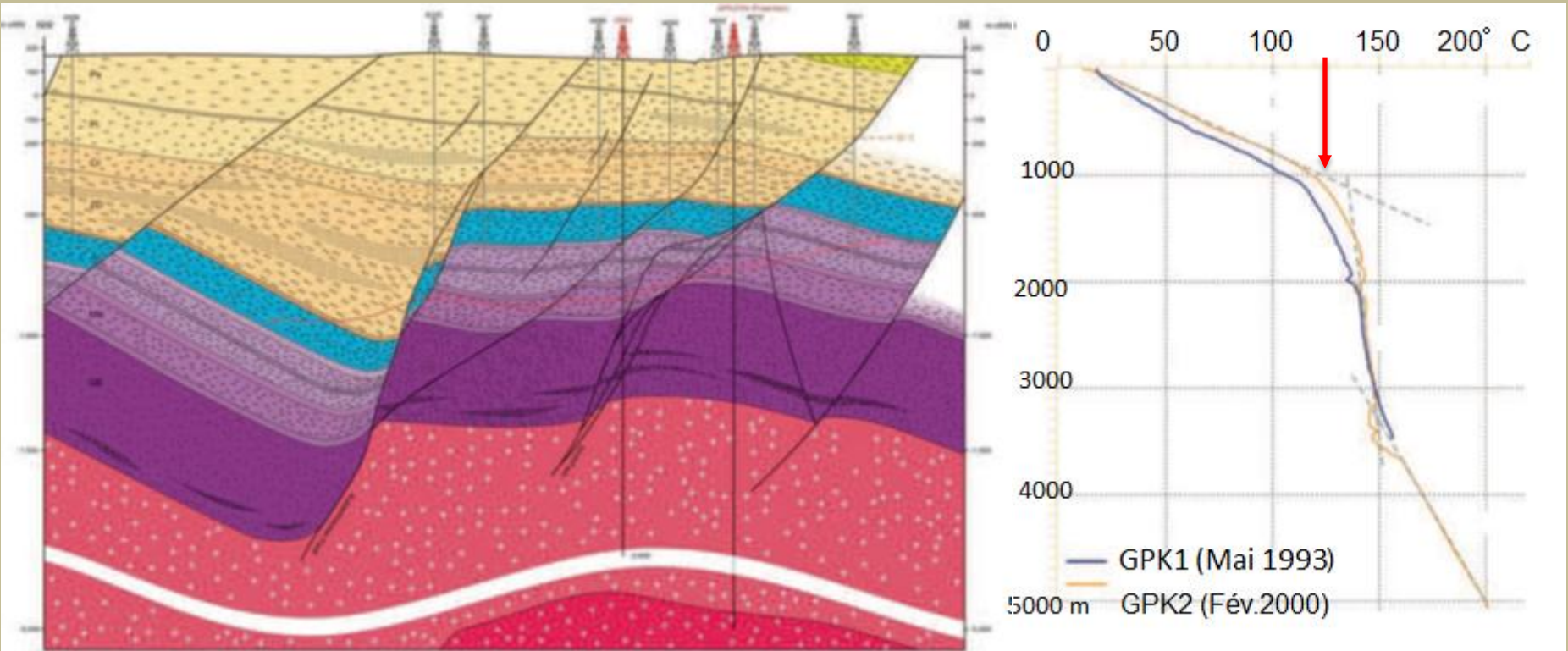


*Chantier de forage de Rittershoffen (Alsace)*

# Soultz-sous-Forêts 1:

projet HDR, EGS puis Géothermie profonde

Site où a été mise au point la technologie EGS au niveau **mondial**. Au départ « roches chaudes sèches » mais présence de saumure => nouvelle appellation « géothermie stimulée »



Profil Géologique du sous-sol d'Alsace à Soultz (d'après Cautru, 1989)

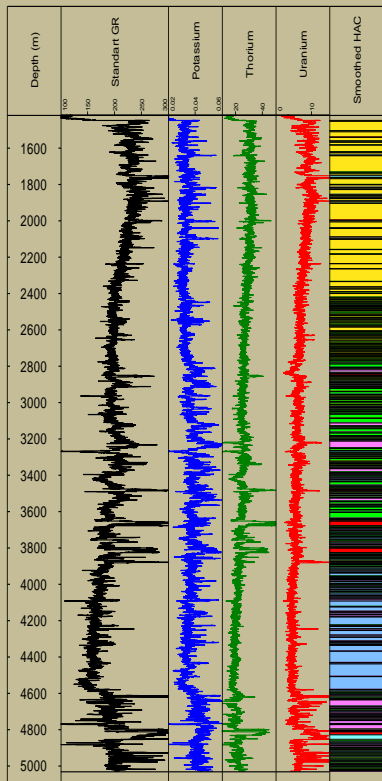
Gradient géothermique dans les puits de Soultz (d'après LIAG, Hannovre)

A Soultz, dans le 1<sup>er</sup> kilomètre de la croûte terrestre, la température augmente en moyenne de **10 ° C tous les 100 mètres** ≈ 3 fois la moyenne de la croûte continentale.

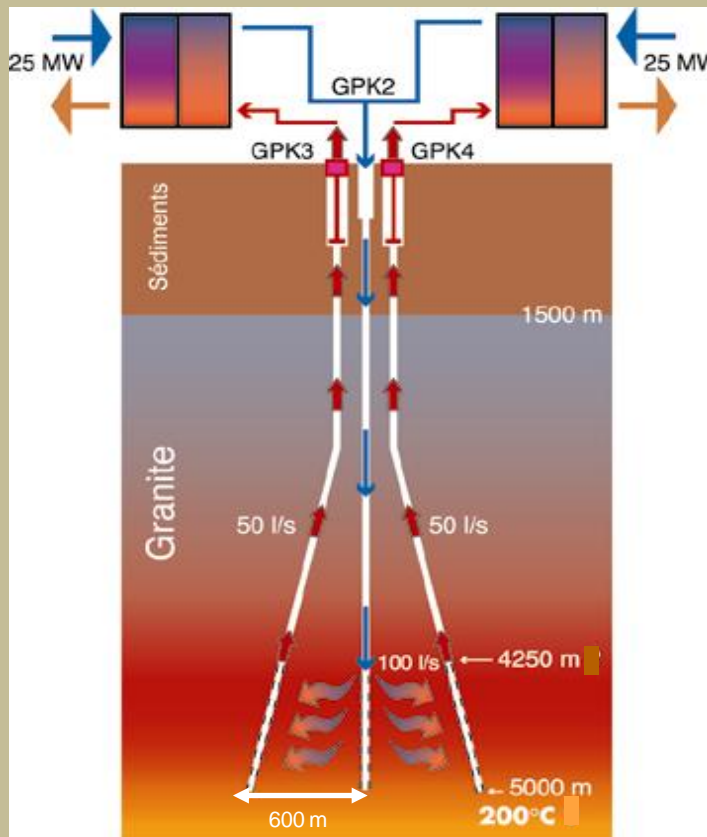
# Soultz-sous-Forêts 2: contexte

Zones d'effondrement (bassin rhénan), mouvements tectoniques => **failles** dans les roches profondes interconnectées => circulation d'eau géothermale. En Alsace, vrai système hydraulique de 50 km d'est en ouest et plus de 200 km du nord au sud.

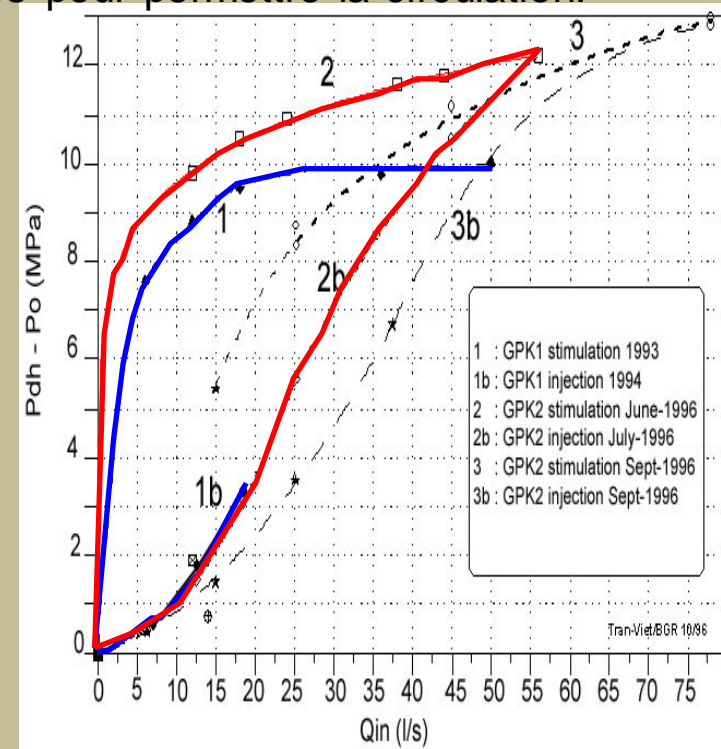
**Différences avec la « fracturation hydraulique »** pour hydrocarbures non conventionnels: nécessité de fracturation artificielle + substances chimiques pour permettre la circulation.



Diagraphies  
Geophysiques



Centrale pilote de Soultz-sous-Forêts



*Augmentation de la perméabilité autour des puits géothermiques à la suite de l'injection d'un fluide à différentes pressions*

# Soultz-sous-Forêts – 3: bilan

- Plus de **25 ans** de recherche (1985 - 2014);
- 80 M€ investis sur le site;
- **15 laboratoires de recherche** européens et internationaux;
- Plusieurs centaines d'entreprises sous-traitantes;
- 4 puits géothermiques à -3 600 / -5 000 mètres;
- 20 km de longueur de puits forés;
- Température de l'eau géothermale : **165° C**
- Débit : 126 m<sup>3</sup> / h
- Entrée en phase industrielle en juin 2016;
- Puissance thermique géothermale : 11,4 MW
- Puissance électrique : **1,7 MWe**
- CO<sub>2</sub> évités : 945 tonnes/an



- **Renouvelable** : l'eau géothermale se réchauffe naturellement par sa circulation en convection dans les formations géologiques profondes
- **Rendements très élevés** : 1 kW d'électricité consommée par pompes de captage et échangeurs en surface => 20 kW thermiques sans CO<sub>2</sub>.
- **Autres sites**: projet Eavor, sud Munich, piémont alpin, forage de 7 km réalisé; centrale ORC en construction



# La question des séismes induits : cas de Vendenheim

Des séismes, d'une magnitude allant jusqu'à 3,9, ont fissuré des centaines de maisons au nord de Strasbourg entre 2019 et 2020;

+ la présence de 40 000 tonnes de déchets toxiques, enfouis dans les galeries de Stocamine (sud Alsace) considérée comme menace à terme pour la plus grande nappe phréatique d'Europe.

En mai 2022, le rapport d'un comité d'experts, à la demande la préfecture du Bas-Rhin, attribue la responsabilité de ces secousses, à la mauvaise maîtrise des opérations par l'entreprise Fonroche (rebaptisée Géorhin).

Le Bureau d'études géologiques et minières (BRGM) a édité un [Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde](#).

Préconisations: exploration géoscientifique sérieuse du site + surveillance attentive de la microsismicité en cours d'opération.



*Chantier géothermique de Vendenheim (Alsace)*

# Le lithium: un sous-produit?

*Après les hydrocarbures (Pechelbronn) et l'hélium (les Héliens), le lithium à Soultz...*

En 2022, le lithium présent dans près de **90 % des batteries**. La consommation mondiale a augmenté de plus de 280 % entre 2010 et 2021.

Lithium métal « **stratégique** ». La France en a fait une priorité de souveraineté économique.

Exploitation : principalement *salars* d'Amérique du Sud ou excavation minière conventionnelle (Australie), avant d'être raffiné en Chine.

Les **saumures géothermales** du nord de l'Alsace ont des concentrations en lithium de l'ordre de **150 à 210 mg/l**.

Electricité de Strasbourg, filiale locale d'EDF et Eramet, expérimentent depuis 2019 leur valorisation dans deux usines-pilotes à

Rittershoffen et Soultz-sous-Forêts (projet européen EuGéLi). En 2021, quelques kg de Li sortent de terre.

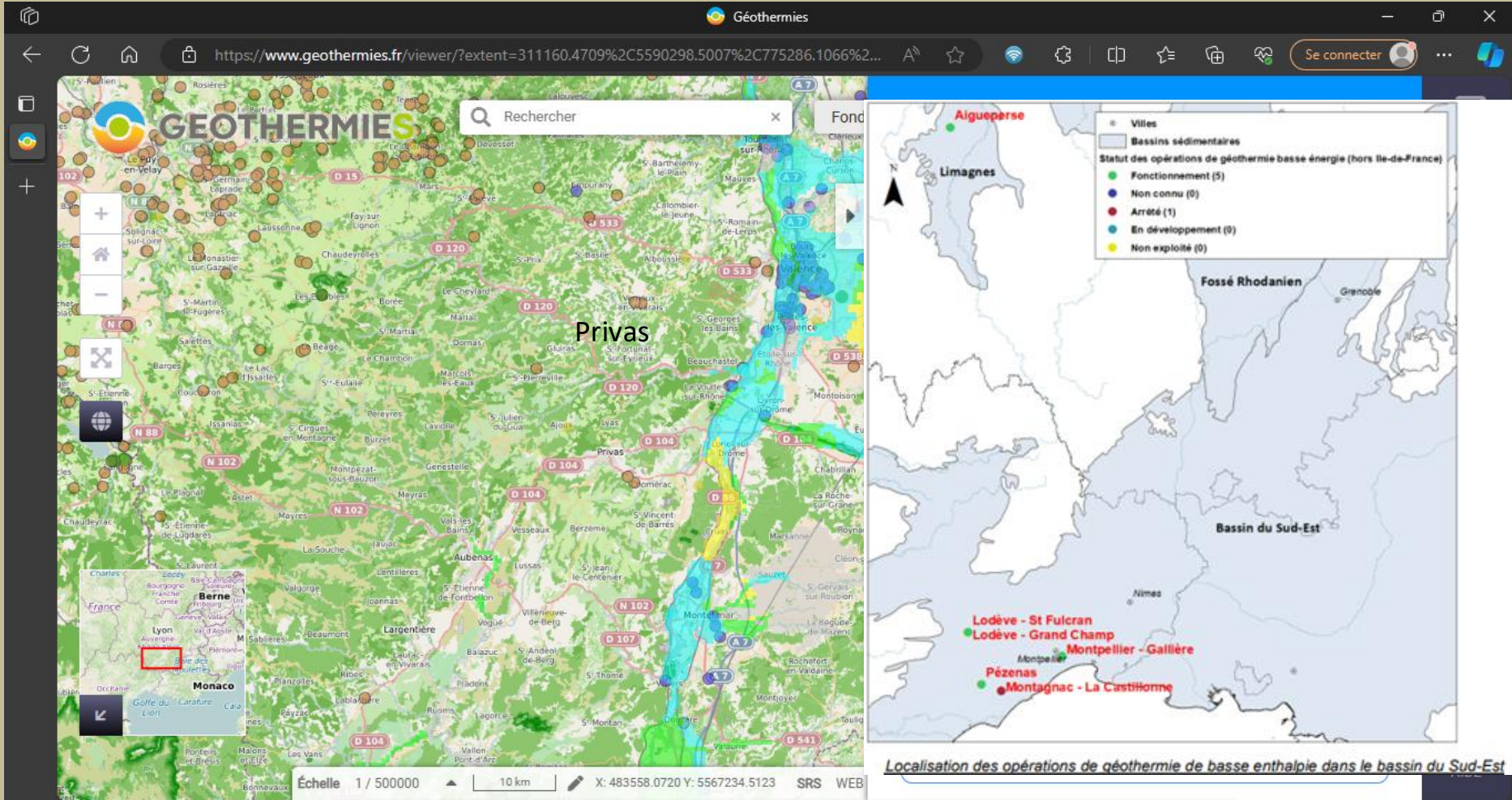
En 2030, le Bas-Rhin pourrait **fournir entre un quart et la moitié des besoins français**.

*Un flacon de carbonate de lithium extrait par la centrale d'ÉS Géothermie de Soultz-sous-Forêt. © Maxppp - Jean-Marc Loos*



# 6 - Et l'Ardèche?

## Opérations de surface



D'après le site GEOTHERMIES

# Eaux thermales d'Ardèche

Source /forage	Commune	Température	Débit
Source Lasaigne	St-Laurent-les-Bains	50° C	3,96 m <sup>3</sup> /h
Source Les Caquets	St-Laurent-les-Bains	53° C	
Source des Bains	Neyrac-les-Bains (Meyras)	24° C	15 m <sup>3</sup> /h
Puits artésien	Celles-les-Bains	22,3° C	
Puits de la piscine	St-Georges-les-Bains	24° C	3,6 m <sup>3</sup> /h
Forage F1	La Voulte s/Rhône	26° C	

Autres sources ardéchoises comprises entre 10 et 18° C

*Données de 1989, Barat, SGN 89 054 RHA*

# Permis de recherche en géothermie profonde & haute énergie

## Dans la Drôme

### PER Val-de-Drôme (**GEOVAL**)

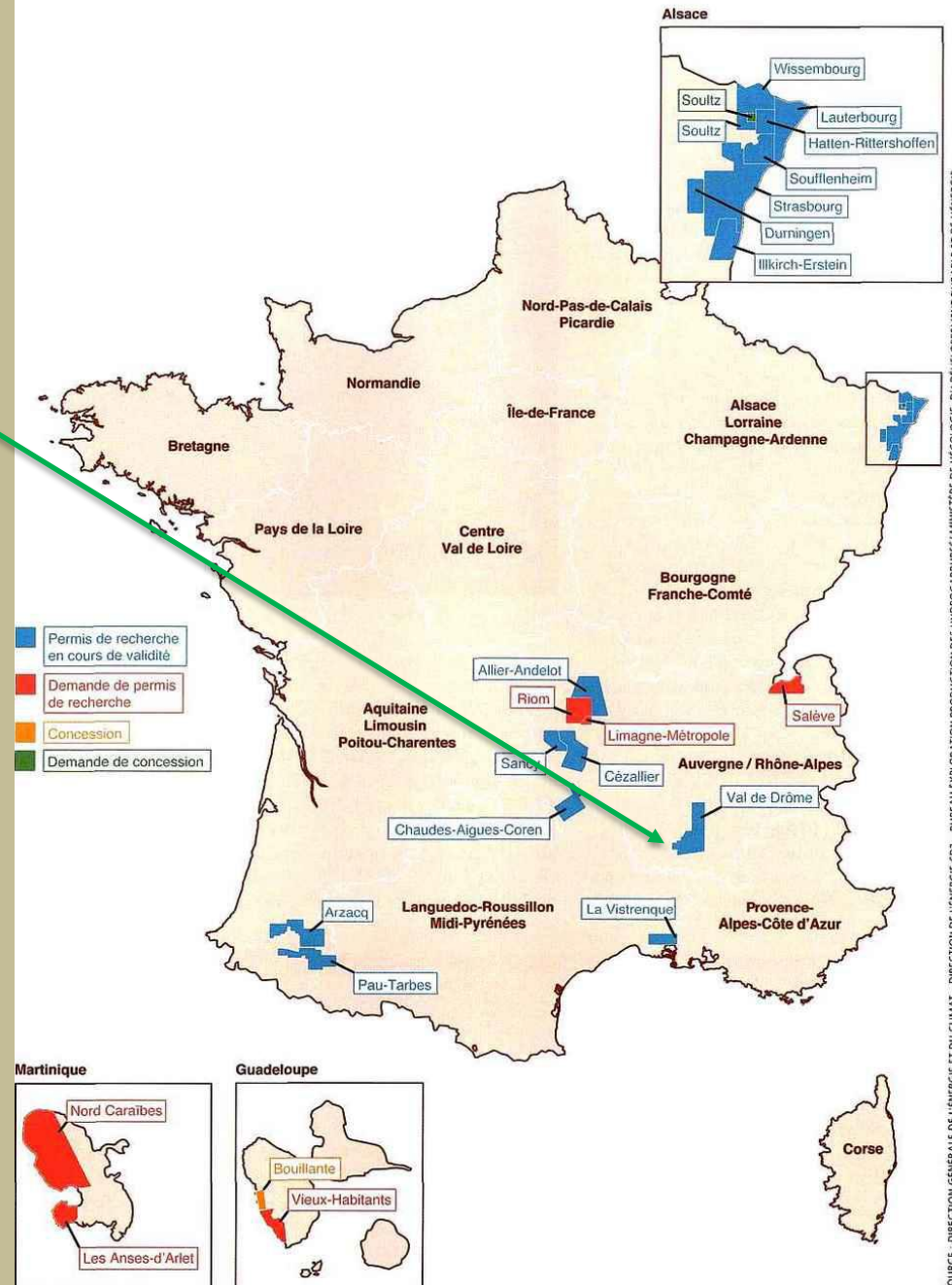
Le projet Valence-Briffaut est situé sur la Commune de Valence (26) doit, à terme, alimenter une **cogénération**, dont l'énergie thermique alimentera le réseau de chaleur de la ville.

C'était le projet le plus avancé où les forages à 4 500 m devaient démarrer fin 2017.

## En Ardèche

Socle intensément fracturé et évaluation des températures à 5000 m suggèrent des conditions proches du piémont vosgien d'Alsace (sans forcément autant de Li).

## CARTE DES PERMIS DE RECHERCHE EN GÉOTHERMIE AU 01/01/2016



# 7- Pistes de progrès et de recherche– 1: améliorations technologiques

## **Techniques d'exploration**

Pour limiter le risque géologique, mieux caractériser les réservoirs, modéliser le sous-sol avant le forage.

## **Techniques de forage**

Améliorer les approches conventionnelles (outils plus robustes, techniques de cimentation et capteurs plus performants à haute température, ...) pour réduire les coûts et faciliter l'accès aux zones profondes et chaudes.

## **Stimulation**

Mieux cibler les zones à fort potentiel de circulation, accroître la capacité d'extraction de chaleur des roches fracturées, réduire les risques de sismicité induite pour réduire les coûts et augmenter la durée de fonctionnement du réservoir.

## **Gestion des réservoirs**

Accroître la part de fluide réinjecté en évitant le refroidissement induit.

# Pistes de recherche et de progrès –

## 2: nouvelles cibles et géothermie de 3<sup>e</sup> génération

### ➤ Systèmes supercritiques

Un fluide est dit supercritique quand sa température et sa pression sont suffisamment élevés pour qu'**on ne puisse plus distinguer sa phase vapeur de sa phase liquide**. Pour de l'eau pure les pressions doivent atteindre 20-25 MPa sous des températures  $> 374^{\circ}$  C. L'enthalpie (ou énergie interne du fluide) est d'un ordre de grandeur (**x10**) plus élevée par unité de volume par rapport à un fluide conventionnel hydrothermal.



*Projet de forage IDDP (Krafla, Islande), pendant lequel on a atteint  $400^{\circ}$  C de vapeur surchauffée à partir de magma en fusion à une profondeur de 2km (photo : Gudni Anderson)*

=> obtenir beaucoup plus d'énergie à partir de moins de puits.

⇒ forer près des intrusions magmatiques.

A Krafla en 2009-2010 et Reykjanes en 2017-2018 tentatives de capter des ressources supercritiques.

Un projet Krafla Magma Testbed (KMT) vise à creuser un tunnel atteignant la chambre magmatique. Démarrage prévu en 2026. Parmi les objectifs: mieux comprendre les systèmes hydrothermaux profonds

# Pistes de recherche et de progrès –

## 3: nouvelles cibles et géothermie de 3<sup>e</sup> génération

### ➤ Réservoirs géopressurisés

Dans les bassins sédimentaires profonds, donc sous haute pression où les fluides sont enrichis en minéraux dissous et en gaz => meilleure maîtrise des problèmes de corrosion et d'incrustations.

### ➤ Géothermie off-shore

Constat et proposition récente de CGG: important réseau de dorsales océaniques sur le globe où se forme le plancher océanique à travers un magmatisme peu profond et un immense système hydrothermal associé.

+ accessible que dans les zones de subduction=> moins cher à l'investissement.

Proximité de la source de chaleur et réservoir d'eau quasi-inépuisable mais éloignement des zones de consommation de l'électricité.

Prospection, puis forage sous 3 à 4 000 m d'eau de mer pas évidente.

Le modèle islandais (dorsale émergée + point chaud) pas forcément reproductible.





# 7 - Bilan

## Avantages

Fournit de l'**énergie en continu** (facteur de charge > au nucléaire)

**Amortissable rapidement** => stable et bon marché / autres sources d'énergie

**Durable**

**Locale**

Faible incidence sur l'**environnement** (espace occupé réduit, réinjection, ...)

**Expérience** > 70 ans

**Adaptable**: large gamme d'options

Source d'**emplois locaux**

## Inconvénients possibles

**Risque** géologique => études  
**Risque** chimique (corrosion / colmatage)  
=> matériaux adaptés, traitement par inhibiteurs

**Investissement** de départ (forages) relativement élevé => montage financier, aides

**Durée** des opérations => planifier

Peu transportable

**Impact** éventuel: émission de gaz sulfuré, sismicité, bruit, ... => anticiper / traiter

# En conclusion, la géothermie c'est ....

- Potentiel important, en France, dans tous les secteurs :
  - **Pompes à chaleur** pratiquement partout
  - **Réseaux de chaleur** dans les bassins sédimentaires (B. Parisien, B. Aquitain, Fossés d'Alsace, de Limagne, du Rhône, Nord, ...). France: 1<sup>er</sup> pays de l'UE pour réseaux de chaleur géothermique avec 650 MW<sub>th</sub> installés (EGEC, 2019)
  - **Electricité** : DROM, Alsace + Massif Central , fossé rhodanien ?
- Contribution significative, mais partielle, à la lutte contre le changement climatique
- 3200 emplois directs et indirects (ADEME, 2019)
- ...**mais, pour faire correspondre ressources et enjeux, dépasser les caprices du marché et donner plus de visibilité à toute la filière géothermique.**

**MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION**

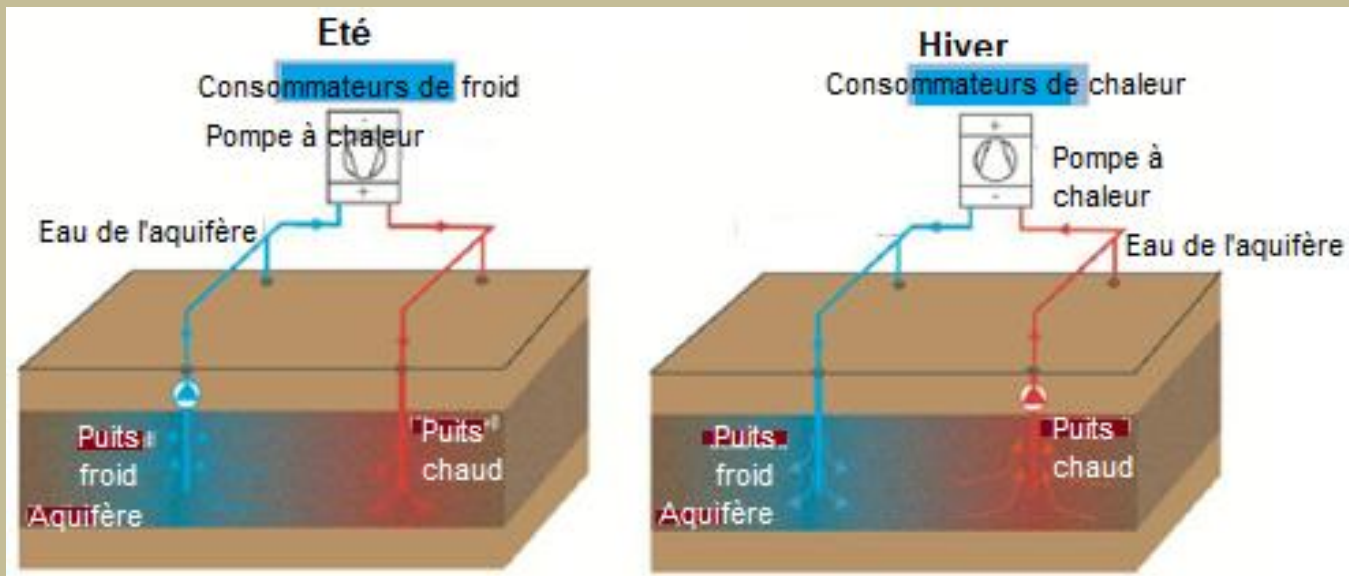


# Stockage de chaleur

2 objectifs principaux :

- **Réguler la production d'énergie thermique pour mieux faire coïncider l'offre avec la demande.** D'autant plus nécessaire avec l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. Exemple: l'énergie solaire majoritairement produite en été / demande plus forte en hiver => possibilité de **combiner** solaire et stockage géothermique
- **Valoriser la chaleur « fatale »** (énergie thermique indirectement produite dans le cadre de processus industriels) des usines d'incinération d'ordures ménagères, des *data centers*, des stations d'épuration, des centrales nucléaires, ...

**Stockage en aquifère :** **en été**, l'eau souterraine, pompée puis réchauffée dans le local est alors réinjectée par un puits ou un groupe de puits.



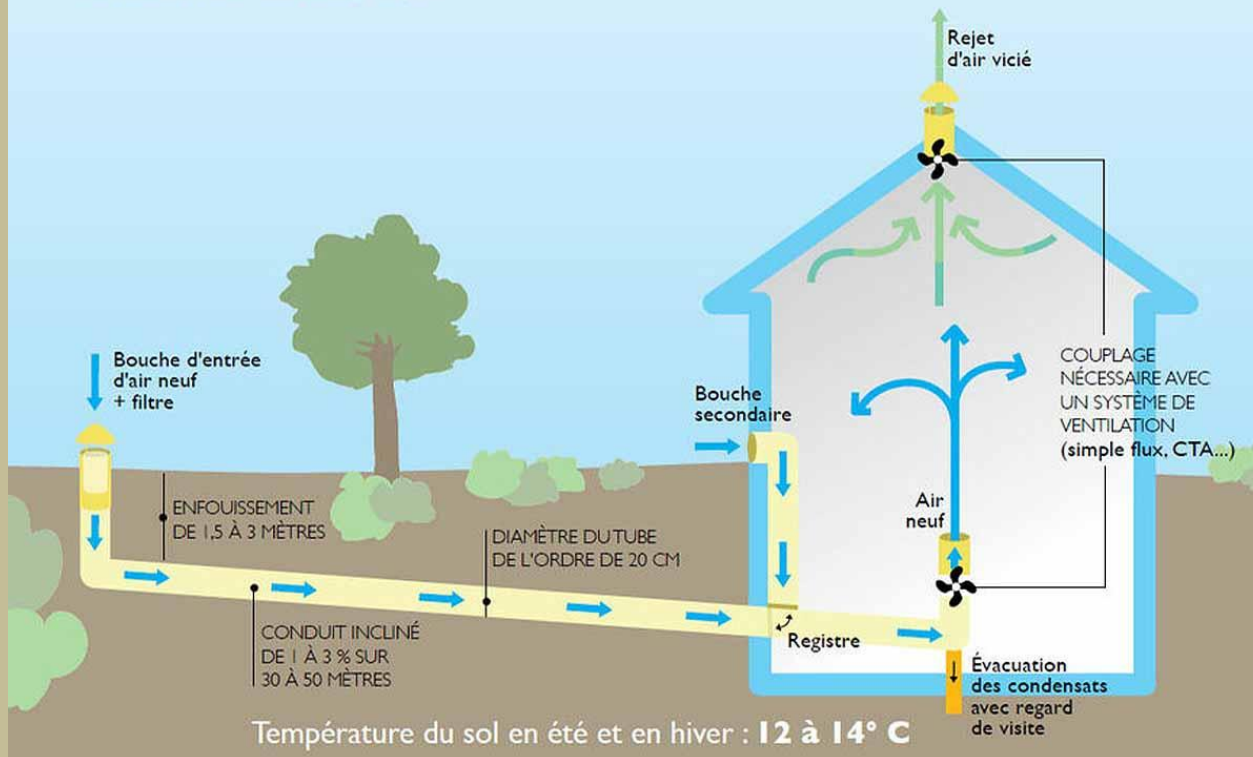
**En hiver**, l'inversion du sens de circulation du fluide permet de récupérer la chaleur stockée

# Puits canadien / puits climatique géothermique

Enterré à **plusieurs mètres de profondeur**, un tuyau laisse passer librement l'air frais grâce à une bouche d'extraction. Au contact du sol, l'air extérieur, est réchauffé en hiver ou refroidi en été, avant de pénétrer dans le bâtiment. Un ventilateur d'extraction permet d'optimiser le débit d'air diffusé à l'intérieur.

## LE PUITTS CLIMATIQUE

Rafraîchissement ou réchauffement de l'air



Le **coefficient de performance (COP)** d'un puits canadien peut facilement atteindre 10 à 20. À titre de comparaison, celui des autres systèmes de ventilation réversibles oscille en général entre 2 et 4.

# Cartographie des aquifères régionaux

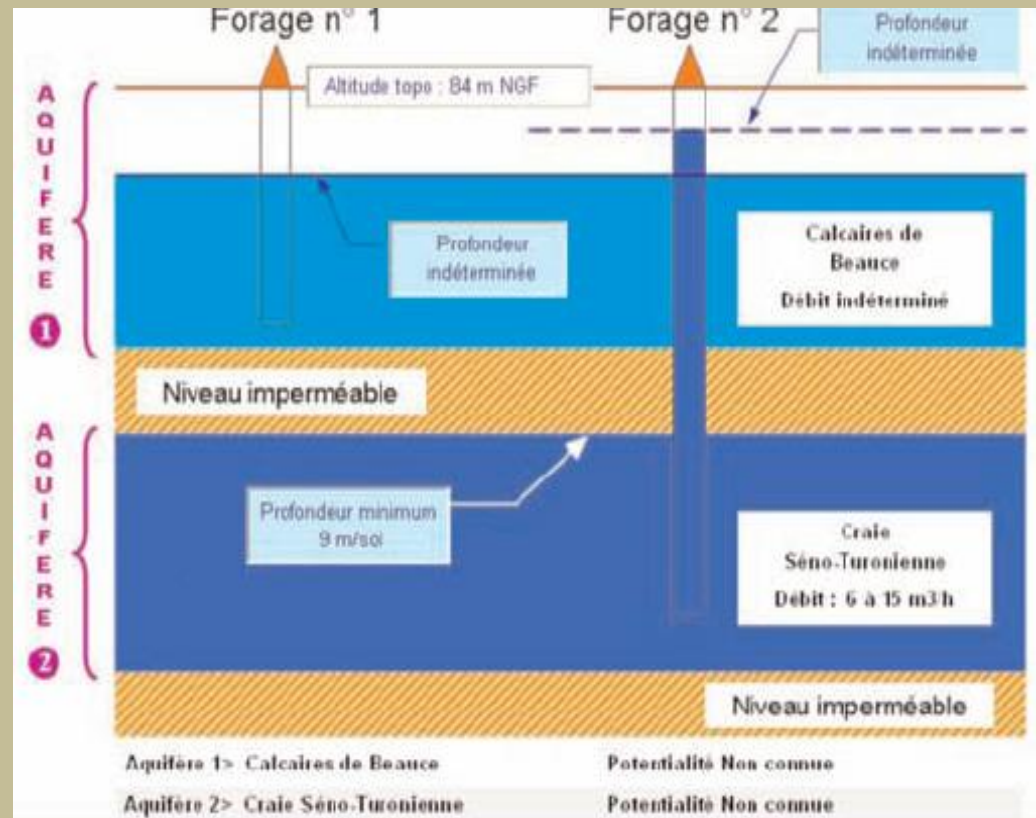
Système d'Information Géographique (SIG):  
intègre différentes couches d'informations  
(topographiques, hydrogéologiques,  
aménagement du territoire,...)

Aquifère ou nappe souterraine :  
formation géologique contenant de l'eau

Résultat de l'interrogation : (maille OS211)

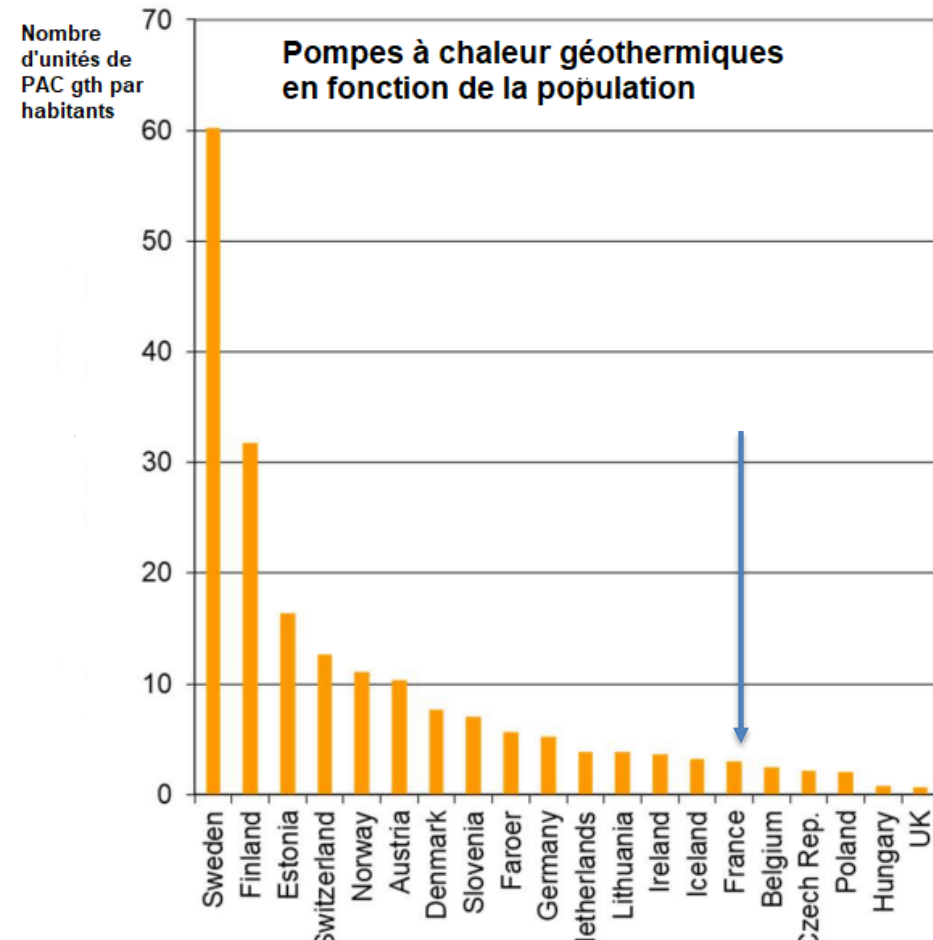
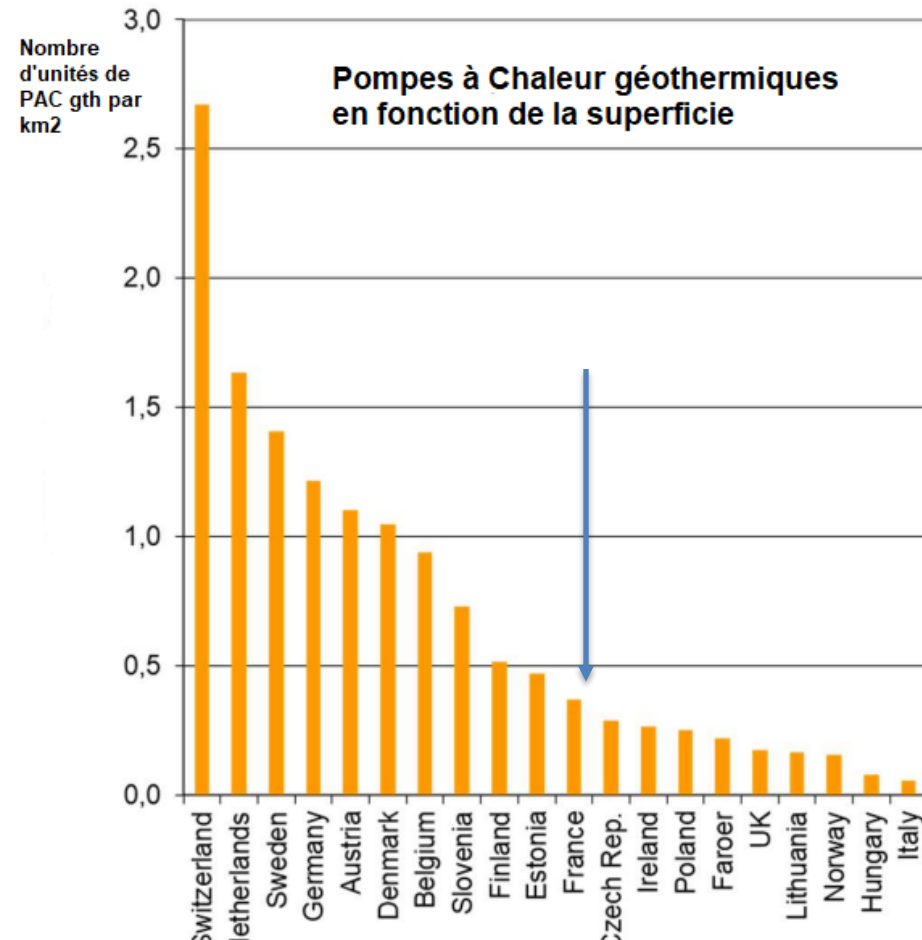
Commune : CHALETTE-SUR-LOING (45)

Coordonnées du point (Lambert 2 étendu) : X=629391 Y=2334516



Géothermie de très basse énergie (proche sous-sol): ressources [valorisables sur 85 à 95% du territoire français](#)

# Les PAC géothermiques en Europe

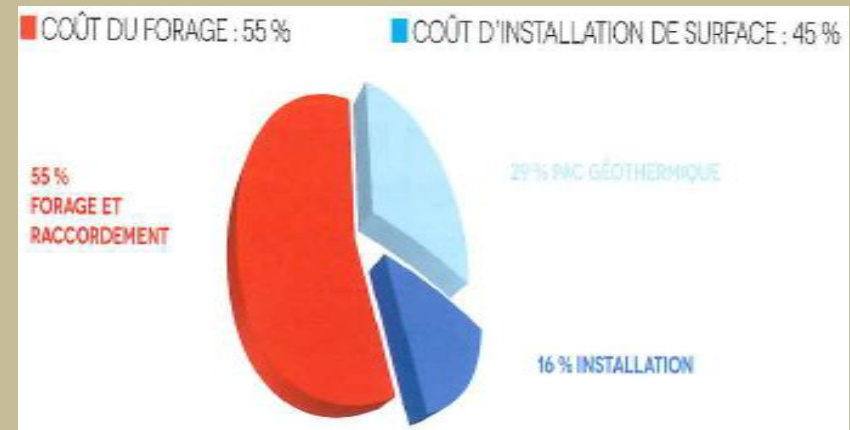


Les pompes à chaleur en Europe selon la superficie et la population (source EGEC)

# Quelques éléments de coûts

- **Basse-Energie** : de l'ordre de 9 M€ (2014) pour un doublet en Ile-de-France.
- **Très Basse-Energie** :
  - **Forage sur nappe aquifère** alimentant une pompe à chaleur : **environ 150 €/ml** (2 forages à 20 m reviennent à 6.000 €)
  - **Sonde géothermique verticale** : **environ 60 € /ml**
  - Coût de l'énergie => **retours sur investissement** plus favorables, de 6 à 16 ans. De plus en plus pris en compte: **retour sur carbone**. De 10 mois par rapport à une chaudière au gaz, en considérant les travaux de forage, les matériaux utilisés...
  - la pompe à chaleur aura sa **durée de vie** de 20-25 ans, mais l'échangeur thermique durera aussi longtemps que le bâtiment car, sous terre, il n'est pas soumis aux aléas climatiques et ne s'endommagera pas.
- L'installation d'une PAC géothermique représente entre 18 000 et 20 000 € selon la profondeur de l'installation (2023).

*Répartition du coût d'une installation PAC gth:  
Forage: 55%; installation: 16 %; PAC: 29 %*





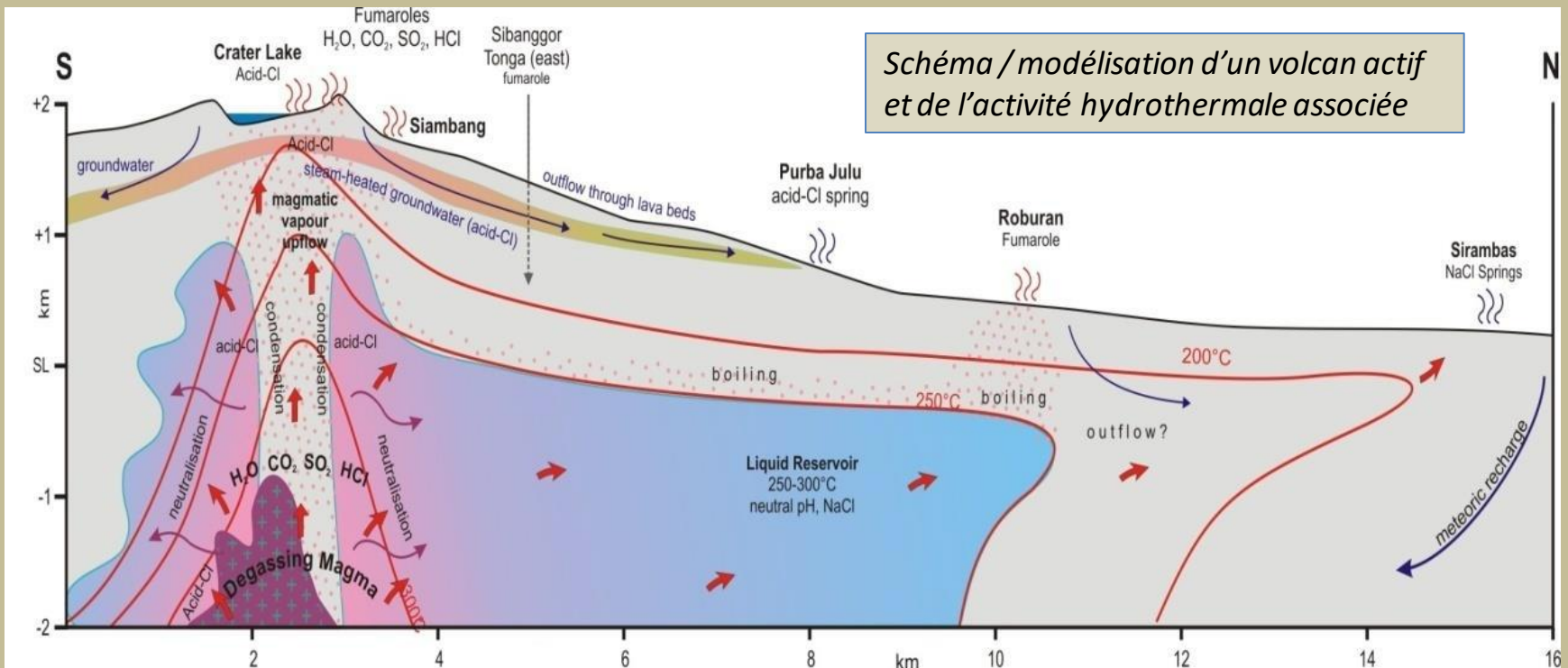
# Géothermie en milieu volcanique actif



Vallée de la Désolation  
(Dominique) – Boiling  
Lake au 2<sup>e</sup> plan



Champagne pool,  
Wai O Tapu, Nelle  
Zélande



# Valorisation énergétique des rejets d'eau thermale (ADEME – Rhône Alpes – Auvergne)

Etude VERTH menée sur 6 stations thermales d'Auvergne (coordonnée par le cluster INNOVATHERM)

## Exemple:

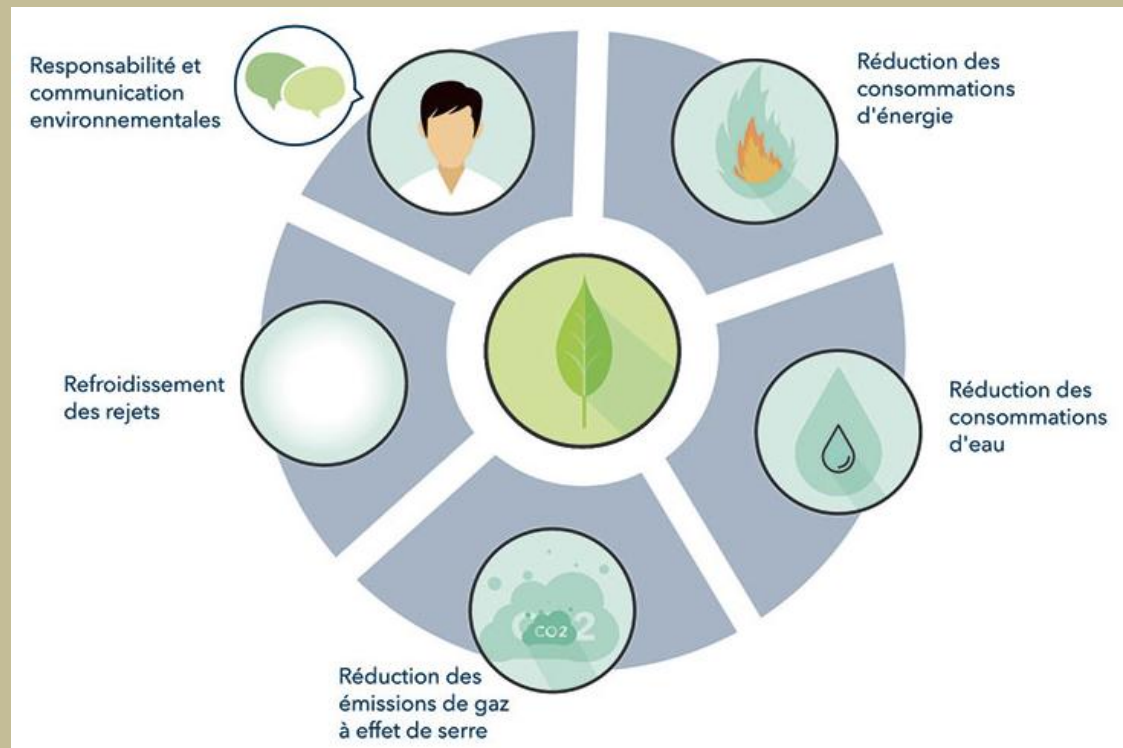
L'établissement thermal rejette 5 m<sup>3</sup>/h d'eau à 30° C tout au long de l'année

La valorisation est envisagée au moyen d'une PAC « Hte Température » de 90 kW pour répondre aux besoins en chaleur de l'établissement.

Investissement limité à 110 k€

Economie annuelle de ≈30 k€

=> Retour sur investissement en 4 ans



# Etapes pour votre projet

Voici les grandes étapes à suivre pas à pas pour conduire votre projet de géothermie :

- **Etape 1 :** [Connaître ses besoins énergétiques;](#)
- **Etape 2 :** [Choisir le système géothermique adapté à ses besoins ;](#)
- **Etape 3 :** [Engager les démarches nécessaires : réglementation et garanties ;](#)
- **Etape 4 :** [Solliciter une aide financière ;](#)
- **Etape 5 :** [Installer son système : une affaire de spécialistes ;](#)
- **Etape 6 :** [Entretien son installation.](#)



# 5 - La géothermie de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> génération



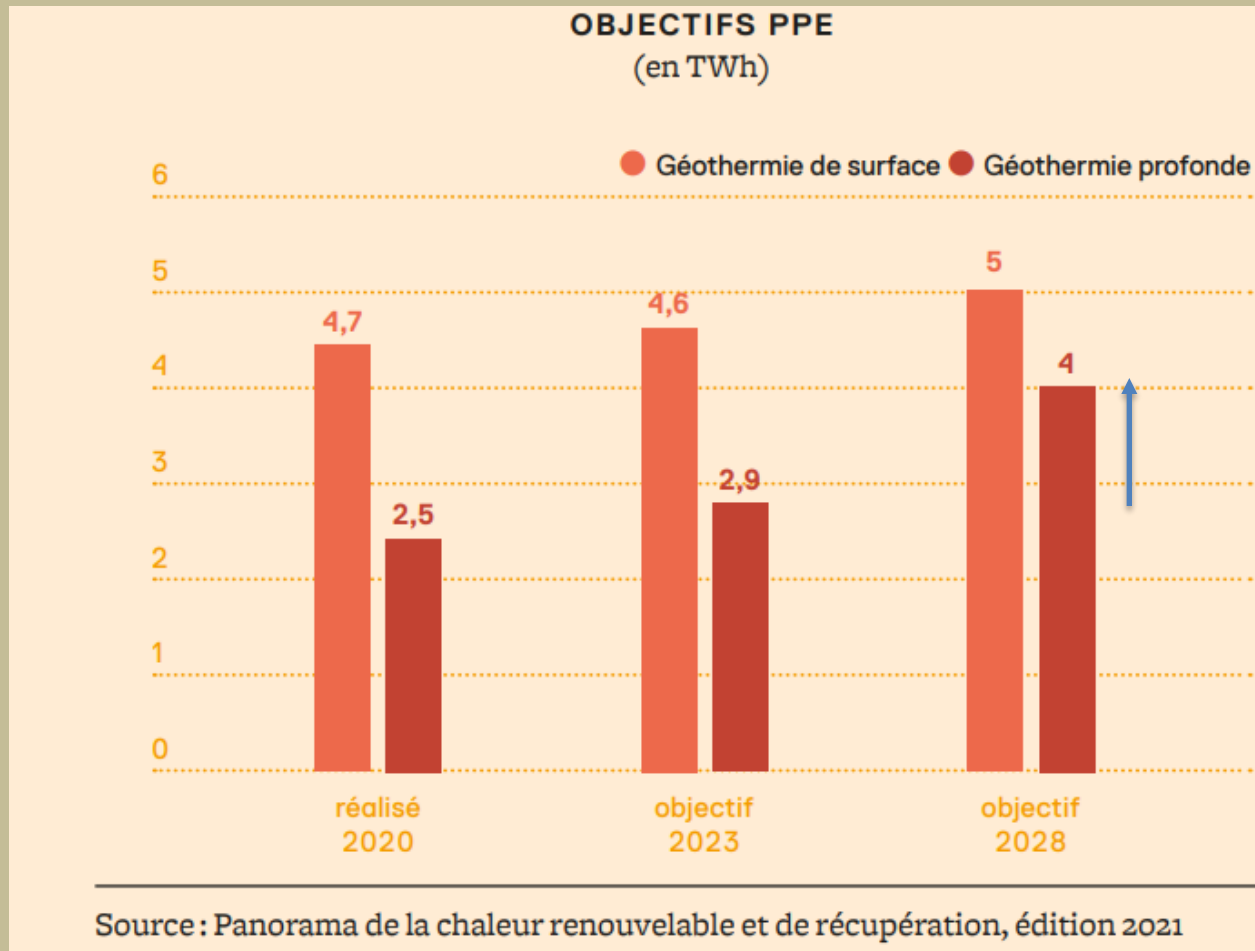
*Site laboratoire  
passé au stade  
industriel de  
Soutz-sous-Forêts  
(Alsace)*

*Forage sur la péninsule de  
Reykjanes (Islande) dans le  
but d'atteindre un réservoir à  
fluide supercritique*



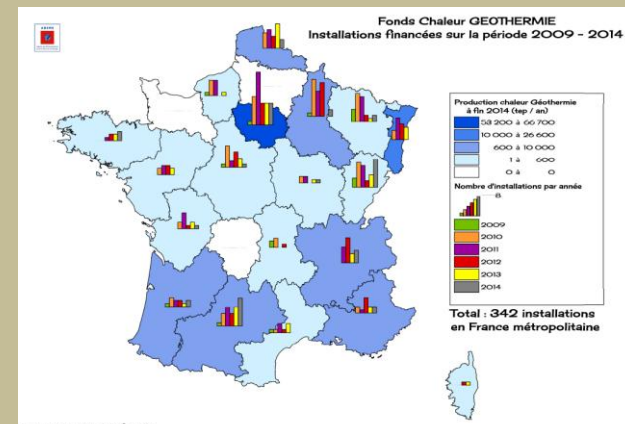
*Centrale géothermique de Rittershoffen. Au premier plan, la production (à droite) et le puits de reinjection (à gauche). Le système d'échangeurs de chaleur se situe dans le bâtiment.*

# Objectifs de production pour la France



# Outils d'accompagnement

- **Techniques** (guides, formation, atlas régionaux, données de la Banque Sous Sol, ...)
  - **Financiers** (couverture des risques géologiques, aides à la décision et aux investissements, Fonds chaleur, ...). En 2022, le Fonds Chaleur utilisé pour subventionner les investissements (463 M€), dont géothermie: 34 M€.
  - Pour PAC sur nappe superficielle jusqu'à 100 m de profondeur et de puissance supérieure à 30 kW : **Indemnité** avec remboursement en cas d'échec total, du montant garanti (coût du forage, études, essais) et **plafonné à 140 000 €**;
  - Le Fonds Chaleur Renouvelable pour l'**habitat collectif**, etc : aides financières à la décision : études de potentiel, de faisabilité, forages d'essais, ... ; Cahiers des Charges type; **cumulables avec d'autres aides** (conseil régional, FEDER, ...)
  - Le Fonds Nouvelles Technologies Emergentes – fonds NTE
  - Principaux **critères d'éligibilité** des opérations **PAC sur champ de sondes, sur nappe, géothermie profonde (>200 mètres de profondeur)**
- **Etudes, communication et organisation**: jusqu'à 70% (ADEME, CTM, ou ERDF si > €200 000)
  - **Investissement**: "Fonds Chaleur" – Aides au cas par cas + éventuellement ERDF (taux moyen 52%)
  - **En cas d'échec au forage**: fond de garantie du risque géologique avec couverture de 65% (jusqu'à 90% avec contribution ADEME)



# Propositions du Syndicat des Energies Renouvelables (2014)

## ➤ **Pour les PAC géothermiques**

- Valoriser le Crédit d'Impôt « transition énergétique » pour PAC géothermiques.
- Mettre en place un « chèque PAC géothermique » pour les particuliers.
- Dynamiser les filières locales (animateur dédié dans chaque région).
- Mieux prendre en compte le froid renouvelable dans les objectifs.
- Aboutir à la réforme du code minier.

## ➤ **Pour la géothermie basse température**

- Réduire le taux de TVA pour les réseaux de froid renouvelable.
- Campagnes nationales de forages d'exploration des zones peu connues
- Appels d'offres pour de nouveaux réseaux de chaleur géothermique.

## ➤ **Pour la géothermie haute température et EGS**

- Engager des investissements à la hauteur du potentiel
- Favoriser l'expansion d'une filière française d'expertise (Geodeep).
- Promouvoir 2 fonds de garantie des risques géologiques pour la géothermie électrogène
- Valoriser la chaleur en réseau urbain et agricole sous forme directe ou en cogénération.

# Plan d'action du Gouvernement pour accélérer le déploiement de la géothermie

En France, la chaleur représente **50% de notre consommation d'énergie**, majoritairement produite par des énergies d'origine fossile et importées.

Les solutions géothermiques, ne représentent que **1%** de cette consommation.

La France est en retard dans l'atteinte de ses objectifs de déploiement de la chaleur renouvelable. En 2021, 24,4 % de la chaleur est produite à partir d'EnR&R (Energies Renouvelables et de Récupération), pour un objectif de 38 % d'ici 2030.

Le gouvernement a défini 6 grands axes et une quinzaine d'actions, pour :

- Structurer la filière et renforcer sa capacité de production et de forage
- Développer l'offre de formations
- Accompagner les porteurs de projets et les usagers, notamment financièrement
- Sensibiliser les acteurs locaux
- Simplifier la réglementation
- Améliorer notre connaissance du sous-sol

**Objectif:** doubler le nombre d'installations de pompes à chaleur géothermique chez les particuliers d'ici 2025.

**Moyen:** L'aide à l'installation d'une pompe à chaleur passe à 5 000 €, quel que soit le niveau de revenu (à partir de mars 2023).



# Les acteurs de la “géothermie” Associations et Institutionnels

➤ L'AFPG : <http://www.afpg.asso.fr/>

Association Française des Professionnels de la Géothermie

➤ L'AFPAC : <http://www.afpac-org>

Association Française des Pompes à Chaleur

➤ Le SFEG : <http://www.sfeg-forages.fr/>

Syndicat des Foreurs d'Eau et de géothermie

➤ L'ADEME : <http://www.ademe.fr>

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

➤ Le BRGM : <http://www.brgm.fr>

Bureau de Recherches Géologiques et Minières

➤ La SAF Environnement

Filiale de la Caisse des Dépôts et Consignations

➤ L'OPQIBI, I Cert et Qualit'EnR, ....

Organismes de qualifications études et travaux

Région Rhône Alpes – Auvergne: [Auvergne-Rhône-Alpes | Geothermies](#)

# Les acteurs de la “géothermie” en Rhône Alpes - Auvergne

Le dispositif d'animation pour la géothermie en Auvergne-Rhône-Alpes, financé par l'ADEME et la Région, s'appuie sur deux structures porteuses :

- l'agence régionale Auvergne-Rhône-Alpes Énergie Environnement ([AURA-EE](#)), centre de ressources pour les territoires en transition d'Auvergne-Rhône-Alpes ;
- [Tenerrdis](#), pôle de compétitivité de la transition énergétique en Auvergne-Rhône-Alpes.

Retrouvez toutes les informations de l'animation régionale sur le [centre de ressources Géothermie Auvergne-Rhône-Alpes](#)

- Vous êtes une collectivité, entreprise ou association ? Contacter Nicolas Picou (AURA-EE) : [nicolas.picou@auvergnerhonealpes-ee.fr](mailto:nicolas.picou@auvergnerhonealpes-ee.fr)
- Vous êtes un particulier ? Consulter notre page [Accompagner votre projet](#)