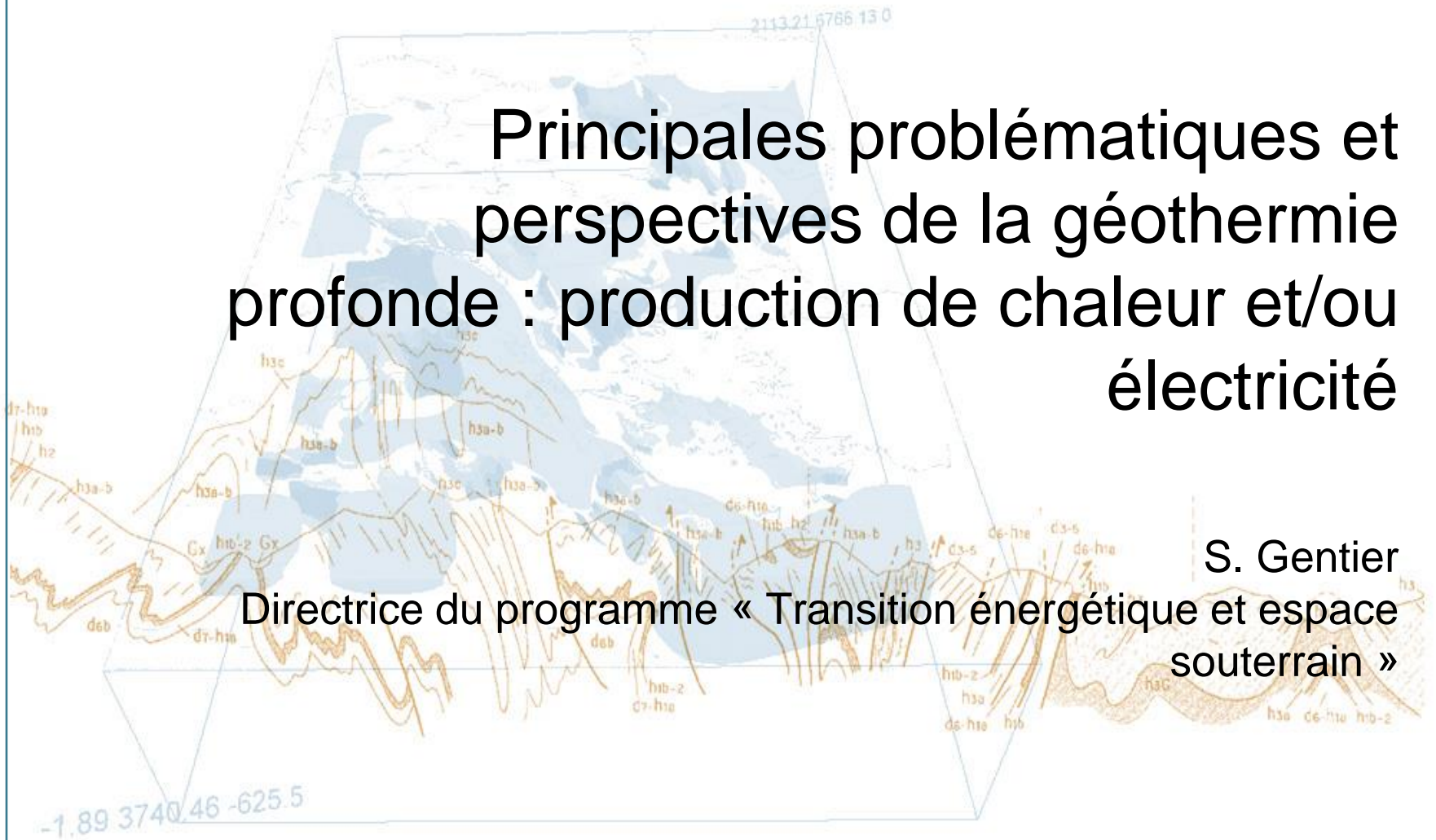


# Principales problématiques et perspectives de la géothermie profonde : production de chaleur et/ou électricité



S. Gentier  
Directrice du programme « Transition énergétique et espace souterrain »

# La « géothermie profonde »...

## > La géothermie ?

- est un mot qui désigne à la fois:
  - la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre à l'origine du flux thermique naturel
  - La/Les technologies qui vise(nt) à l'exploiter
  - ...par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre.

## > Profonde ?

- On parle de géothermie profonde au-delà de ... 200 m

- Production de chaleur :
- Production d'électricité
- Cogénération : électricité/chaleur



Dépend en fait du gradient géothermique:

- Électricité à partir de 500 à 600 m (Bouillante)
- Chaleur vers 1700/2000 m (Dogger Ile de France)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Géothermie profonde de moyenne à haute température ?

## Systèmes de basse température

- $T_{\text{réservoir}} < 150^{\circ}\text{C}$
- souvent associés à des sources chaudes

## Systèmes de moyenne température

$$150^{\circ}\text{C} < T_{\text{réservoir}} < 200^{\circ}\text{C}$$

## Systèmes de haute température

- $200^{\circ}\text{C} < T_{\text{réservoir}}$
- souvent associés à des fumerolles, événements de vapeur, piscines de boue et terrains très altérés

## Systèmes géothermiques de basse enthalpie

$$H_{\text{fluide}} < 800 \text{ kJ/kg} \\ (T_{\text{fluide}} < 190^{\circ}\text{C})$$

## Systèmes géothermiques de haute enthalpie

$$H_{\text{fluide}} > 800 \text{ kJ/kg.}$$

## Réservoirs géothermiques à dominante liquide

- $T_{\text{fluide}} \leq T_{\text{ébullition}}$  à la pression du réservoir
- phase liquide contrôle la pression dans le réservoir
- un peu de vapeur peut être présente

## Réservoirs géothermiques bi-phasiques

- vapeur et liquide coexistent
- température et pression suivent la courbes d'ébullition

## Systèmes géothermiques à dominante vapeur

- $T_{\text{fluide}} \geq T_{\text{ébullition}}$  à la pression du réservoir
- phase vapeur contrôle la pression dans le réservoir
- un peu de fluide liquide peut être présent

**+ Systèmes de très haute température : fluide supercritique**  
( $T = 400$  à  $600^{\circ}\text{C}$ ,  $P < 220$  bar)/ Islande IDDP à 5 km



Géosciences pour une Terre durable

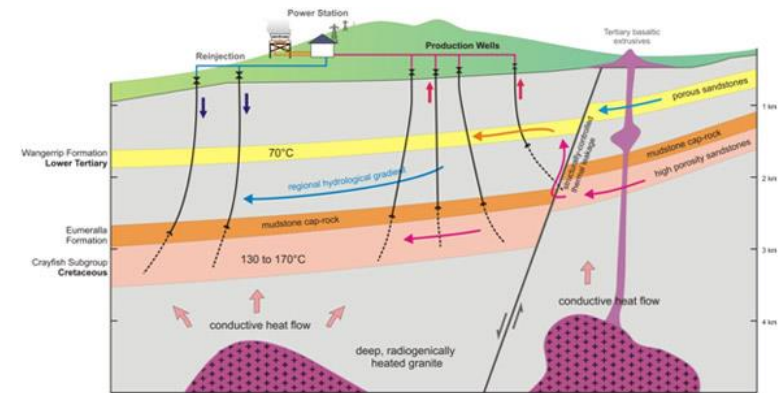
**brgm**

# Environnements géologiques ?

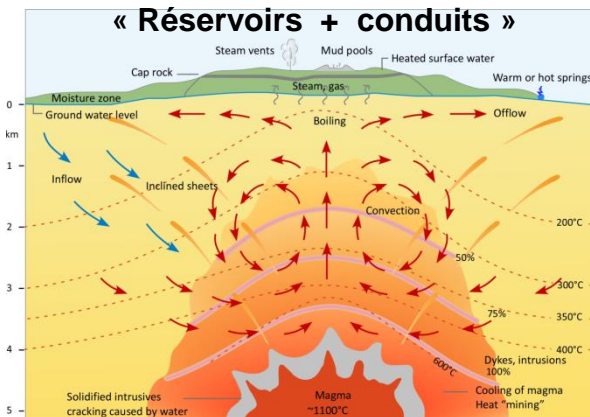
- > Systèmes géothermiques sédimentaires : aquifères
- > Systèmes géothermiques volcaniques : associés dans un sens ou un autre à une activité volcanique. Les sources de chaleur sont pour de tels systèmes des intrusions chaudes ou du magma:

- le plus souvent situés dans ou près des complexes volcaniques près ou aux limites des plaques ou des points chauds.
- Des fractures perméables et des zones de failles mais aussi des couches perméables comme des sédiments ignimbrites ou laves contrôlent le système hydraulique associé.

## Réservoir : stock d'eau chaude



Réservoir : porosité + perméabilité (homogénéité)  
Équilibre hydraulique : entrées = sorties ?  
Vitesse d'écoulement relativement lente

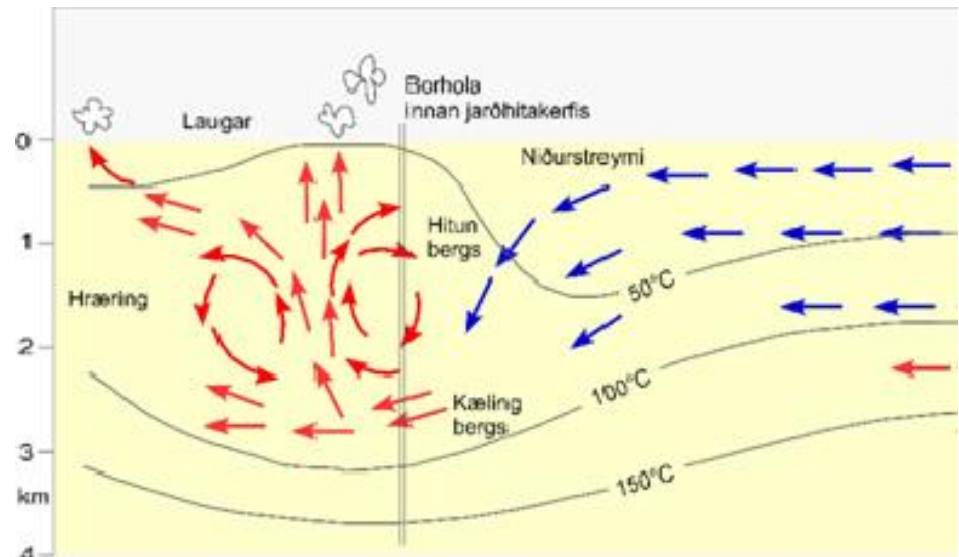


Réservoir : porosité + perméabilité (hétérogénéité)  
Équilibre hydraulique : entrées = sorties ?  
Vitesse d'écoulement plus rapide

# Environnements géologiques ?

- > Systèmes géothermiques convectifs : la source chaude est la chaleur de la croûte en profondeur dans des zones plus ou moins actives tectoniquement avec de préférence un flux thermique supérieur au flux moyen. Le fluide géothermal circule à de grandes profondeurs à travers des fractures/faillrd où la chaleur est extraite des roches en général

« Réservoir » = conduits où le fluide réchauffé circule



Réservoir : perméabilité (hétérogénéité ± grande)

systèmes hydrauliques spécifiques : exploration, accès à la ressource et exploitations spécifiques ?

# Quelques définitions ...

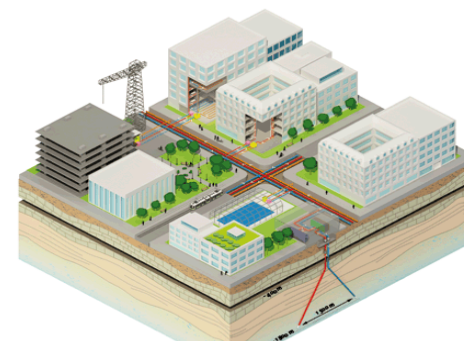
- > **Champ géothermal** : définition géographique (classiquement pour indiquer une aire d'activité géothermique en surface. Dans le cas où il n'y a pas de manifestations de surface, ce terme peut être utilisé pour indiquer une aire en surface correspondant au réservoir souterrain ...)
- > **Système géothermique** : désigne toutes les parties du système hydraulique impliqué incluant la zone de recharge, les parties souterraines et les exutoires
- > **Réservoir géothermal** désigne la partie perméable et chaude du système géothermique qui peut être directement exploitée. Pour une décharge spontanée soit possible, les réservoirs géothermiques doivent être « pressurisés » : artésianisme, ébullition.

# La géothermie profonde dite « basse température »

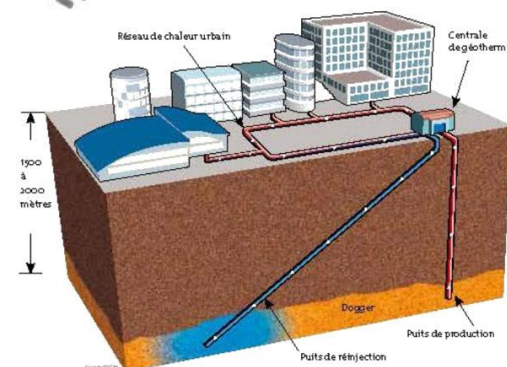
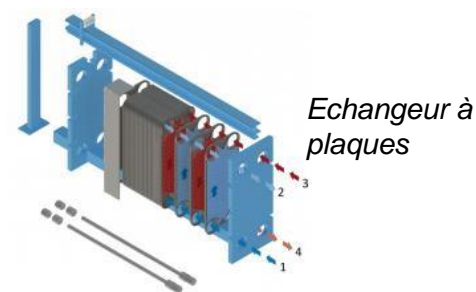
Exemple : Dogger du Bassin parisien

# Réseaux de chaleur urbains

- > Eaux chaudes : exploitées de tout temps par les sociétés
- > Premier vrai réseau de chauffage urbain : Reykjavik (Islande) dès 1930.
- > En France :
  - Un premier bâtiment (Maison de la radio, 1963) à partir de l'Albien via un puits à 600 m de profondeur : rejet eau ?
  - Première expérience significative en 1969 (à Melun l'Almont au sud-est de Paris : chauffage et production d'eau chaude sanitaire de plus de 2 500 logements collectifs, à partir d'eaux à basse température (72°C) pompées à 1 700 mètres de profondeur
  - Mise au point de la technique dite du "doublet". Elle permet alors l'exploitation d'un des aquifères profonds du bassin de Paris (Dogger) en réinjectant l'eau, après épuisement calorifique par échange, en évitant le rejet en surface d'une eau fortement minéralisée, et en maintenant la pression du réservoir.



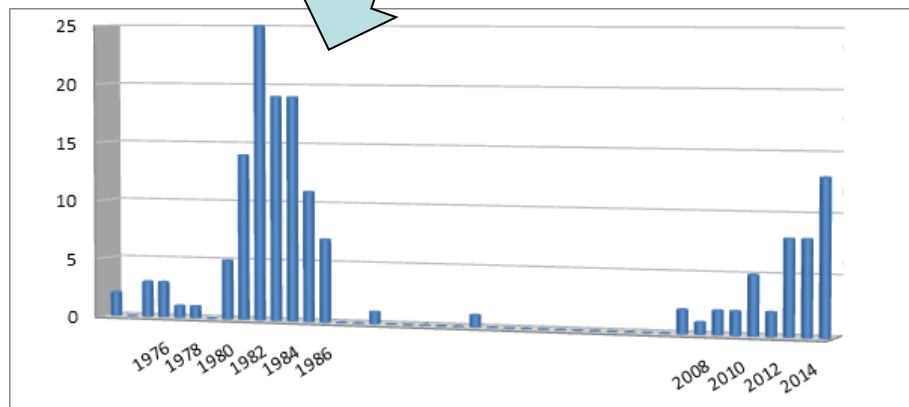
Réseau de chaleur, principe de fonctionnement et alimentation par un doublet sur aquifère ©ADEME-BRGM





# L'exploitation du Dogger : déjà une réalité

- > Actuellement, 47 opérations géothermiques constituées de doublets ou de triplets sont en fonctionnement (de l'ordre de 230 000 équivalents-logements) ou en cours de développement dans l'aquifère du Dogger.
- > La géothermie représente un peu plus de 10 % de l'énergie distribuée par les réseaux de chaleur en Ile-de-France.



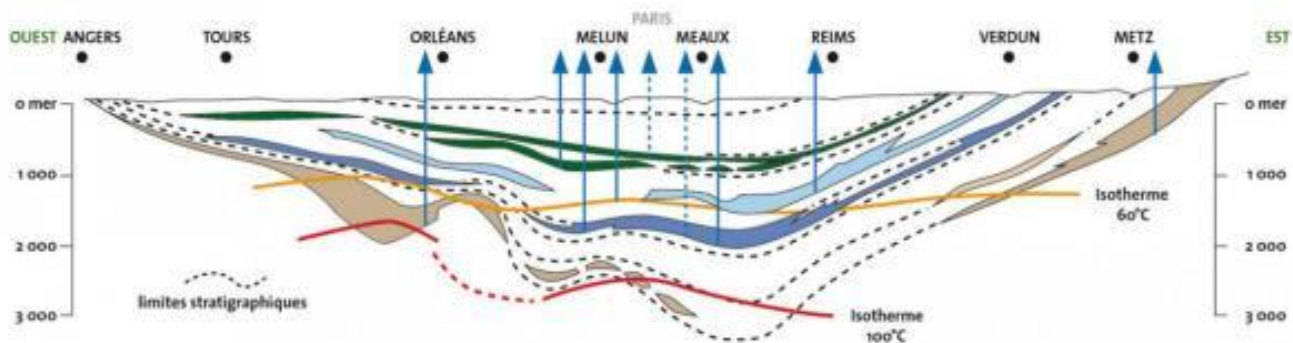
Bassin Parisien, Usage direct de la chaleur (aquifère du Dogger). Nombre de puits forés depuis 1969 (©BRGM)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

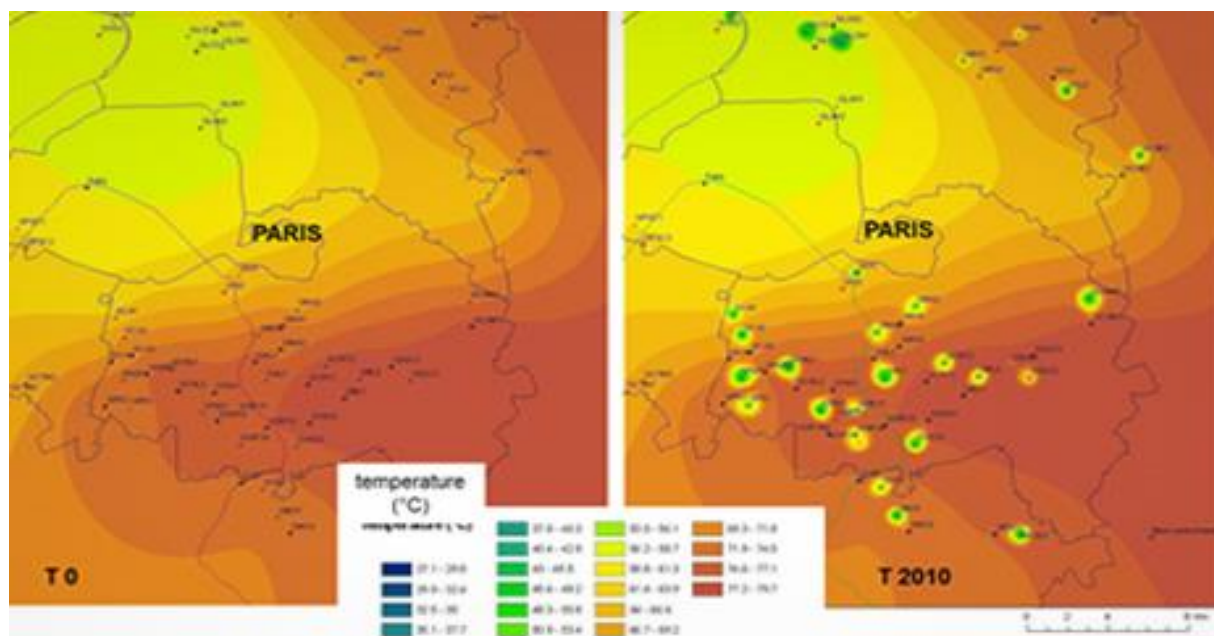
# La Bassin Parisien : des aquifères profonds



Source : BRGM



# Une gestion des exploitations



*Etat initial (T0) de la température de l'eau du Dogger et état à l'année 2010 : évolution des « bulles froides » (©BRGM)*

Décroissance thermique ne devrait pas se faire sentir avant les années 2028 voire 2040 suivant les simulations.

Travaux reposent sur les relevés mensuels de température du réservoir du Dogger effectués par les exploitants de réseaux de chaleur géothermiques d'Ile-de-France et sur des modélisations.

Primordial de développer et de maintenir un outil d'aide à la gestion adapté à l'échelle du champ géothermique destiné aux décideurs pour le suivi des opérations à long terme comme pour la réalisation de nouvelles opérations : base de données.

# Perspectives

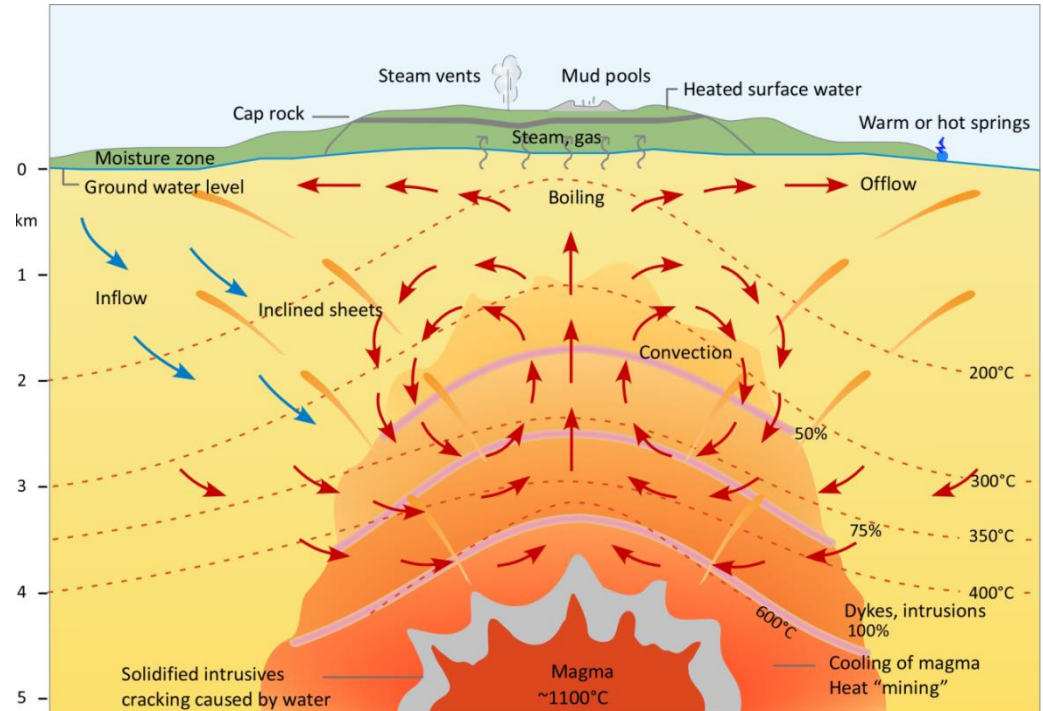
- > Potentiel en géothermie profonde
  - Extension des réseaux de chaleur géothermiques existants
  - « Géothermisation » de réseaux de chaleur existants alimentés par des énergies fossiles : une dizaine de réseaux peuvent faire l'objet d'un changement de système.
  - Création de nouveaux réseaux de chaleur géothermique sur une cinquantaine de communes
- > Chauffage représente aujourd'hui le plus gros poste de la consommation énergétique des ménages.
- > Au cours de l'année 2018, base de données étendue à toutes les opérations de géothermie profonde en France pour la production de chaleur (bassin de Paris, bassin aquitain, bassin du Sud-Est, fossé rhénan, fossé rhodanien, fossé bressan, Limagne)
- > Représente environ 230 forages géothermiques

# La géothermie profonde dite « haute température »

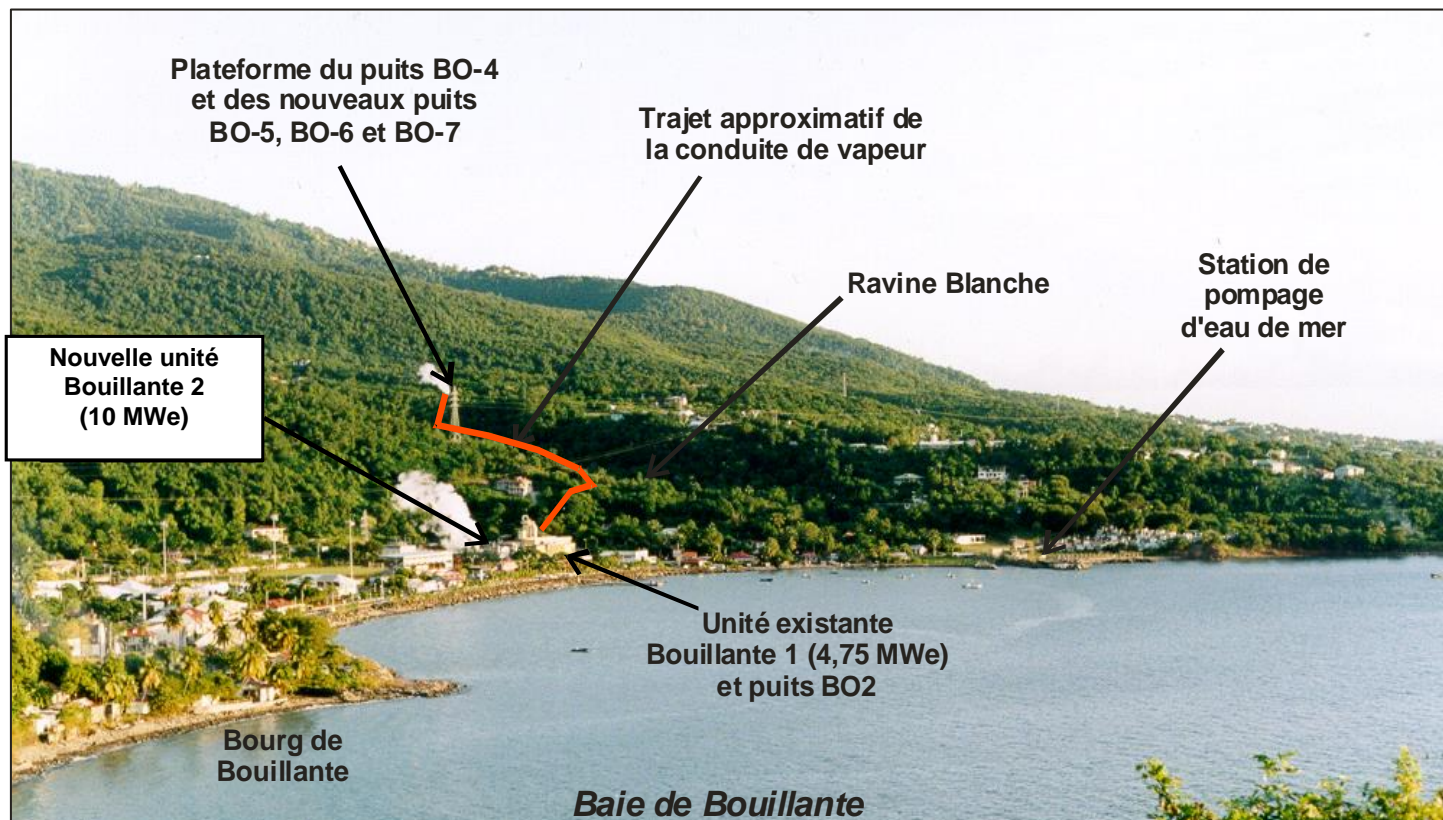
Exemple : Bouillante (Guadeloupe)

# Exemple de Bouillante en Guadeloupe

- > Un gisement géothermique de haute température se compose d'une source de chaleur magmatique, d'un réservoir (formation poreuse et perméable) et d'une couverture.
- > Pour garantir la pérennité de la production sans réinjection, il doit en outre bénéficier d'une réalimentation naturelle en eau. Les infiltrations d'eau assurent la recharge du réservoir géothermal.
- > Chauffé par le magma sous-jacent, le réservoir est maintenu sous forte pression, permettant une utilisation pour la production d'électricité.



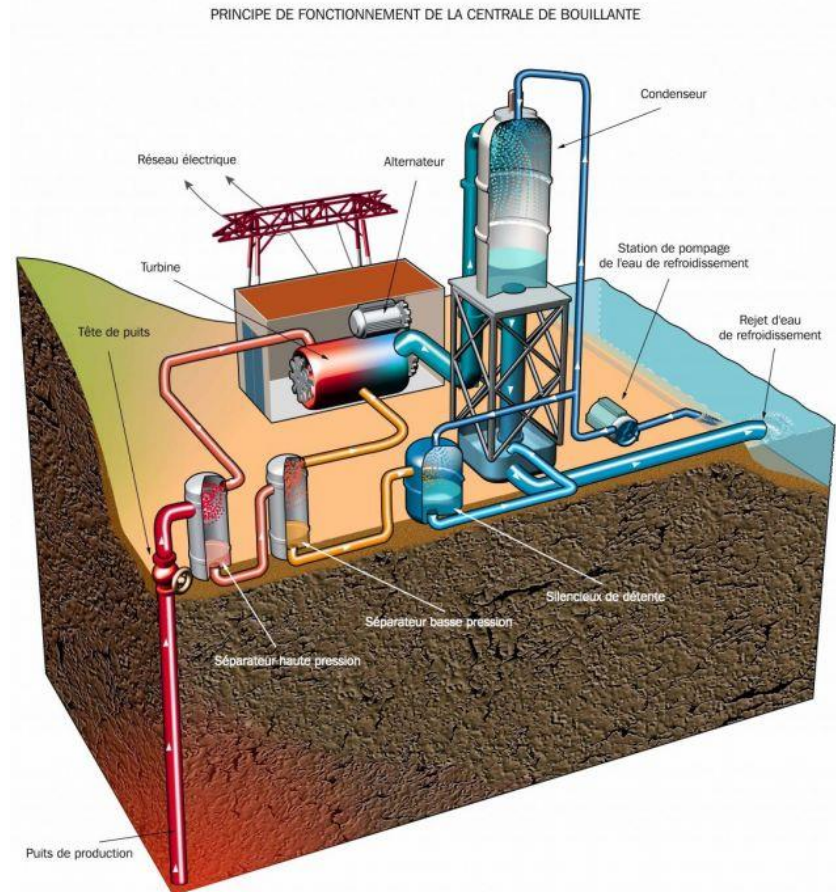
# La centrale de Bouillante



- La centrale de Bouillante produit de l'électricité depuis 1986 :
  - 1<sup>ère</sup> tranche de 4 MW
  - 2<sup>ème</sup> tranche de 11MW installée en 2004
- Produit environ 6% de l'électricité de cette île de 400 000 habitants

# Principe d'une centrale « Flash »

- > Par un forage géothermique, il est alors possible de produire de la vapeur seule, dite vapeur sèche, ou un mélange de liquide et de vapeur, appelé vapeur humide.
- > Dans la plupart des centrales géothermiques, la vapeur naturelle sous pression fait tourner une turbine (à vapeur) qui à son tour actionne un alternateur
- > Problème de la réinjection ?
- > Evolution : ajout cycle binaire ?





# Enjeux par rapport à l'énergie

- > Les centrales géothermiques présentent néanmoins des limites :
  - un rendement de production d'électricité assez faible, de l'ordre de 5 à 10% ;
  - une utilisation limitée à certaines régions caractéristiques
    - Actuellement, la production d'électricité d'origine géothermique n'est possible qu'à partir de formations géologiques naturellement perméables (zones aquifères).
    - Zones volcaniques
  - un coût élevé d'investissement dans les phases à risques d'exploration
- > Si les premiers travaux datent du début du XIXe, la production d'électricité géothermique ne deviendra significative qu'à partir des années 1970, dans un contexte de crises pétrolières et d'un souci d'indépendance énergétique des pays en voie de développement. La puissance électrique installée dans le monde est ainsi passée de 400 MW en 1960 à 8 000 MW à la fin du XXe siècle.

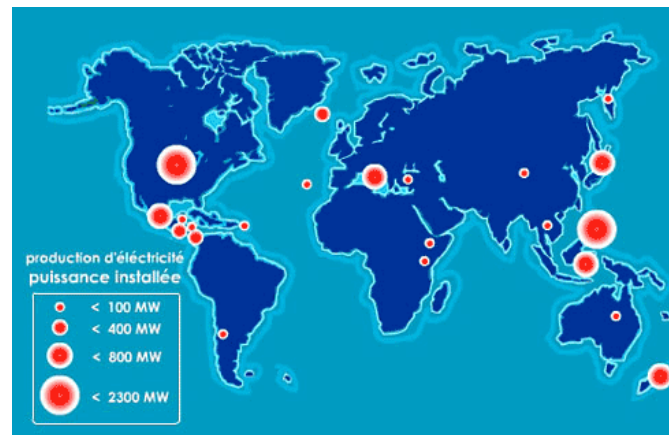


# La géothermie profonde

## Quelles perspectives ?

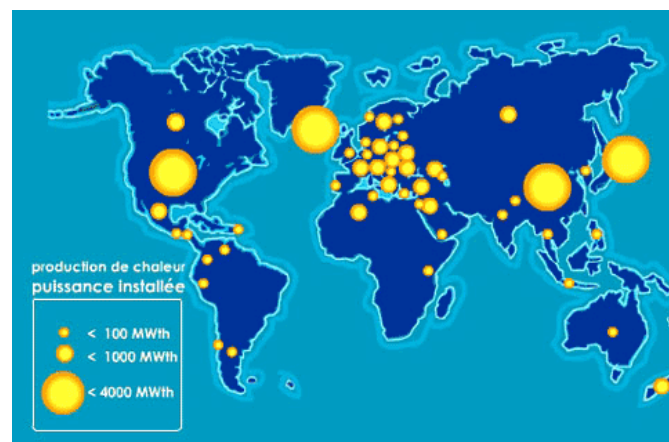
# Enjeux par rapport au mix énergétique

> La production d'électricité par géothermie sur le long terme devrait connaître une croissance faible dans le monde, mais significative dans les régions géodynamiques actives : Amérique Centrale, Asie du Sud Est, Afrique de l'Est, et îles océaniques.



> La production de chaleur :

- Surtout vers les usages industriels
- Chauffage bâtiments moindre dans le futur

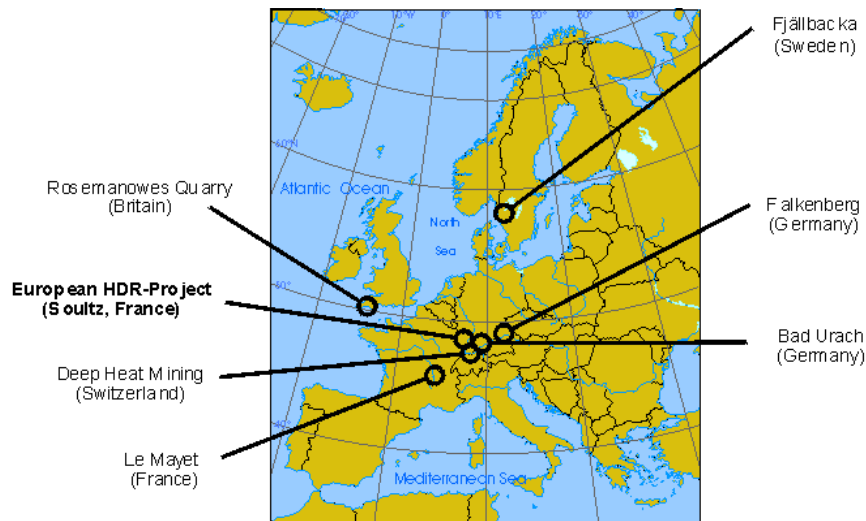


Electricité : exploitation des hautes températures

Chaleur : aquifères basse température

# Quel futur ?

- > De nouvelles technologies, doivent être développées pour pouvoir exploiter le potentiel des zones profondes des plateformes continentales stables, où les roches ne sont pas suffisamment perméables et où les températures sont moyennes à hautes
- > Nécessité de développer un véritable « génie géothermique » pour accroître considérablement les aires géographiques de production plus en accord avec les besoins : de la chaleur à l'électricité.
- > Ce potentiel est abondant:
  - En Europe, il est estimé à 100.000 km<sup>2</sup>.
  - En France, la plaine d'Alsace, la plaine de la Limagne (Massif central) et le couloir rhodanien constituent des zones exploitables
- > **Projet Soultz-sous-Forêts : 1<sup>ère</sup> mondiale**

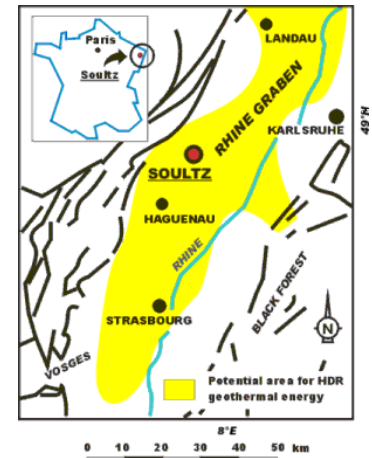


# De la géothermie « conventionnelle » à une géothermie dite EGS

- > Si les ressources hydrothermales haute température « conventionnelles » :
  - présentent un gradient thermique moyen élevé
  - une perméabilité et une porosité des roches élevées
  - des fluides en place en quantité suffisante
  - et une recharge en fluide adéquate
- > Les ressources exploitables sous forme d'EGS présentent au moins une lacune dans ces caractéristiques. Leurs développements nécessitent des technologies adaptées au niveau :
  - du réservoir : stratégies de stimulation, réduction de l'énergie nécessaire pour réinjecter le fluide produit, modèles permettant l'exploitation et le suivi du réservoir ;
  - du forage : complétion des forages, optimisation de la profondeur de forage, nouvelles technologies de forage ;
  - de la conversion thermodynamique : optimisation de la technologie de conversion pour la production d'électricité;
  - des impacts environnementaux : réinjection, sismicité induite...

# Un projet phare : Soultz-sous-Forêts

- > Débuté en 1984 sur la base du concept « Hot Dry Rock » à la suite de Fenton Hill (USA), Rosemanowes (GB)...
- > Objectif :
  - échangeur thermique profond
  - granite sous couverture (anomalie thermique)
- > Projet initialement franco-anglo-germanique... à un projet franco-germanique... et participation d'industriels (GEIE)
- > Exploitation par ESGéothermie de 2,1 MWe conduisant à une production nette de 1,5 MWe de production nette.
- > Il s'agit alors, en 2008, de la première production d'électricité au monde issue de tels systèmes géothermaux raccordée au réseau électrique.

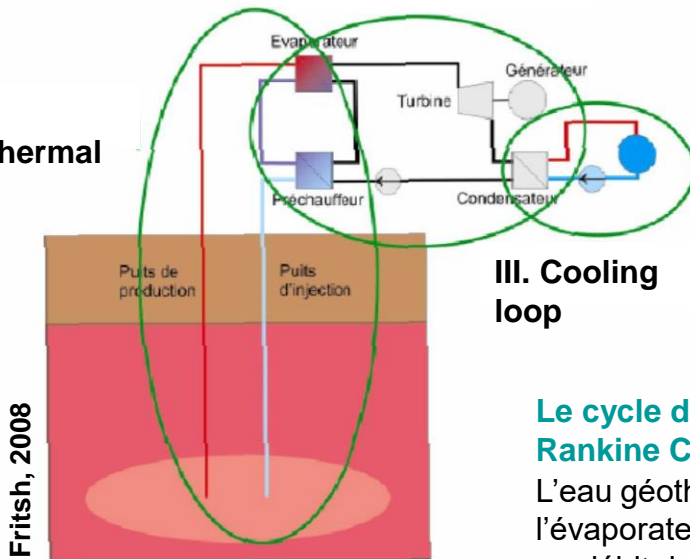


# Le système géothermal et de production électrique : le concept

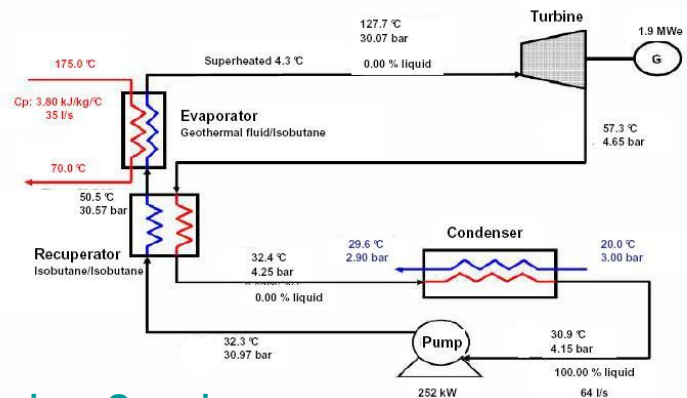


II. ORC unit : heat/power conversion

## I. Geothermal loop



## III. Cooling loop



## Le cycle de conversion : Organic Rankine Cycle (ORC)

L'eau géothermale attendue en surface par l'évaporateur du système ORC sera à 175° C pour un débit de 35 l/s.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Vers un génie « géothermique »...

		Chaleur	Fluide	Perméabilité	Solutions
Application des technologies d'ingénierie des systèmes géothermiques	Réservoirs hydrothermaux	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Pas nécessaires
	Réservoirs hydrothermaux améliorés	Trop basse	Acceptable	Acceptable	Développement de technologies de conversion énergétique basse température ou approfondissement des forages
		Acceptable	Insuffisant	Acceptable	Réinjection et/ou injection de fluide externe
		Acceptable	Acceptable	Trop basse	Stimulation des fractures de la formation rocheuse
	Réservoirs géothermiques « ingénierisés »	Acceptable	Insuffisant	Trop basse	Introduction d'un fluide « de travail » et stimulation des fractures de la formation
		Acceptable	Insuffisant	Trop haute	Scellement de fractures
		Trop haute	Insuffisant	Trop basse	Développement d'outils haute température, Introduire un fluide de « travail », et stimulation des fractures de la formation
		Trop basse	Insuffisant	Trop basse	Développement de technologies de conversion énergétique basse température, introduction d'un fluide de « travail », et stimulation des fractures

> Les systèmes « stimulés » (enhanced) ne sont qu'une des facettes des systèmes « ouvragés » (engineered)

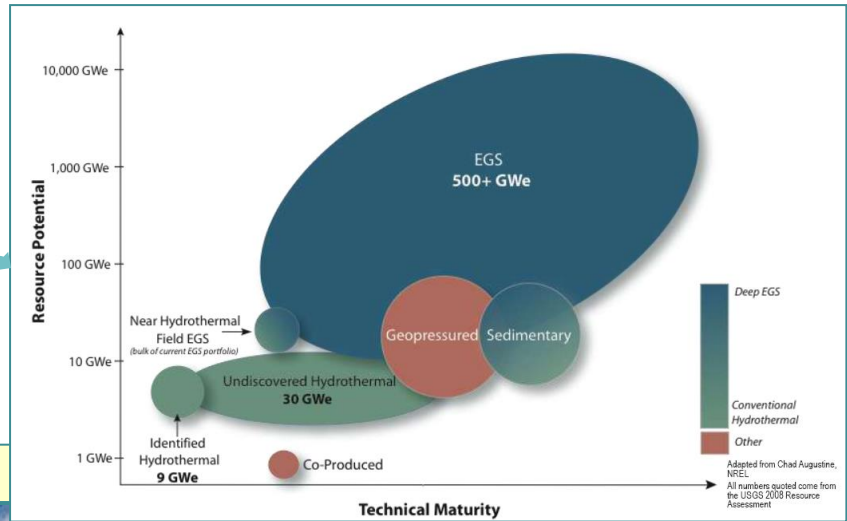
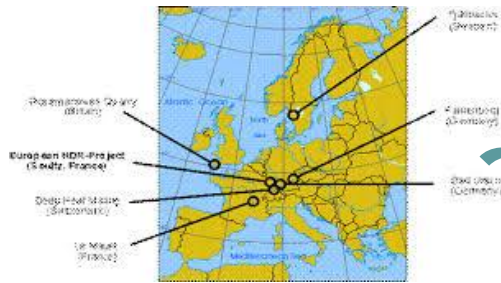


Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

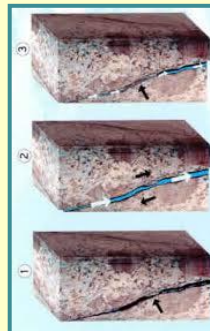
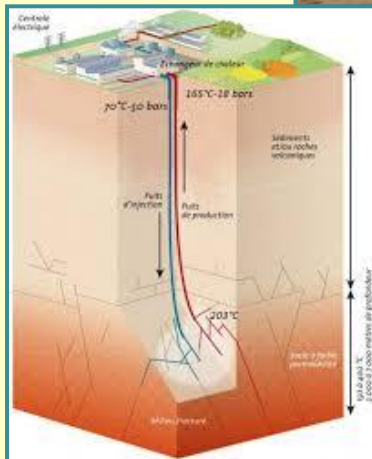


# Les EGS



## Soutz-sous-Forêts:

**1.5 MWe**  
**1<sup>er</sup> pilote EGS au monde raccordé au réseau**



**Australie (green field) : 1 MW Habanero Pilot Plant**

**Etats Unis (in field) : 1.7 MWe additionnel dans un puits peu producteur -> 38% de puissance en plus (Desert Peak 2 - Nevada)**

**Etats Unis (near field) : 1.75 MWe additionnel avec un potentiel de 3.25 MWe (Geysers - Californie)**

**Allemagne (cogénération) : Landau 2,5 – 3 MW**

**France (chaleur) : Rittershoffen**



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# First Magma-Enhanced Geothermal System In The World (Iceland)

well IDDP-1

Une chambre magmatique à 3-7 km de profondeur au centre de la caldeira  
Source de chaleur pour le système géothermique exploité au niveau de la centrale Krafla (60 Mwe)  
Projet IDDP : projet de forage à 4.5 km dans le but d'explorer les fluides géothermaux supercritiques



*The well overlooks Viti, an explosion crater formed in an eruption in 1724 AD. PHOTO BY G.Ó. FRÍÐLEIFSSON.*



Flow test of the IDDP-1 well at Krafla. Note the transparent superheated steam at the top of the rock muffler. Image Credit: Kristján Einarsson

Futur : création du plus chaud  
*Engineered Geothermal System (EGS)*  
du monde en injectant de l'eau sur le magma et produire une vapeur "superchaude" dans un forage attendant

<http://cleantechnica.com/2014/01/31/first-magma-enhanced-geothermal-system-world-developed-iceland/#WizMczP6FtzRjMZO.99>



Géosciences pour une Terre durable

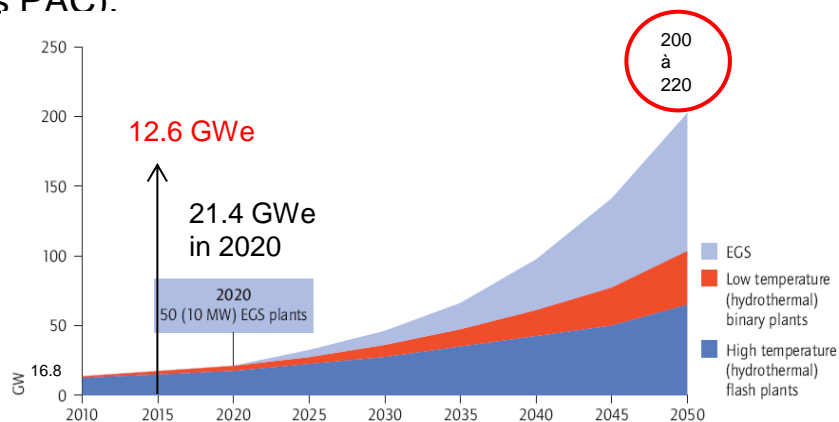
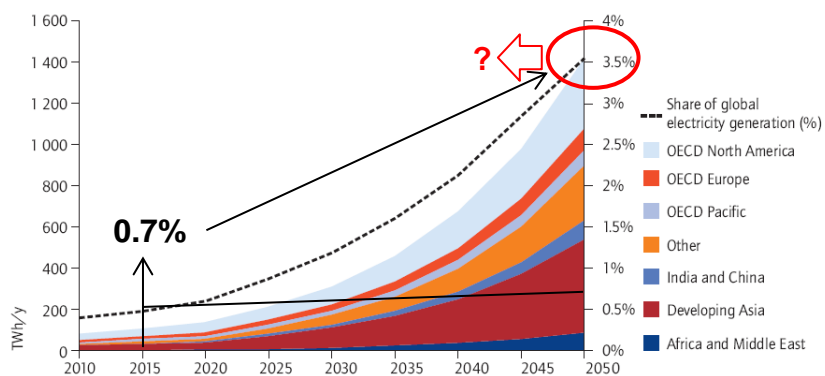
**brgm**

14/10/2019

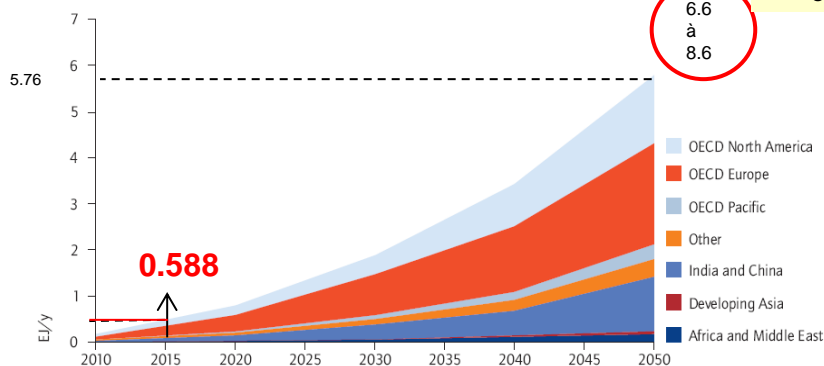
# Quelles perspectives en 2050 au niveau mondial?

> Feuille de route pour l'énergie géothermique de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2011) d'ici 2050 :

- production d'énergie géothermique devrait être augmentée à 1400 TWh / an,
- et l'utilisation directe à 1600 TWh / an (hors PAC).



2010-2015 :  
augmentation d'environ 16%



2010-2015 :  
augmentation de 45%

Un léger retard sur la production d'électricité mais une très légère avance sur la production de chaleur

# Et au niveau français : la PPE...

	Réalisé 2012	Réalisé 2016 ou 2017*	Objectifs PPE précédente (*données décret)		Objectifs projet PPE 2019	
			Horizon 2018	Horizon 2023 bas/haut	Horizon 2023	Horizon 2028 bas/haut
<b>Consommation Chaleur renouvelable (TWh) :</b>	127.7	154.6	173	200/221	196	218/247
PAC géothermiques	2.9	3.1	4.6	5.8/7	4.6	5/7
<b>Géothermie profonde</b>	<b>1.2</b>	<b>1.57</b>	<b>2*</b>	<b>4/5,5*</b>	<b>2.9</b>	<b>4/5.2</b>
<b>Production électricité renouvelable (GW) :</b>	-	49*	53	71/78	74	102/113
<b>Géothermie profonde (MW)</b>	-	<b>1</b>	<b>8*</b>	<b>53/53*</b>	<b>24</b>	<b>24/24</b>

fin du dispositif de soutien via le complément de rémunération en métropole pour la production d'électricité issue de la géothermie !?



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Usages et atouts de la géothermie

> Directive européenne sur les énergies renouvelables :

## La géothermie : exploitation de la chaleur contenue dans le sous-sol

> Usages

- Electricité / Chaleur / Froid

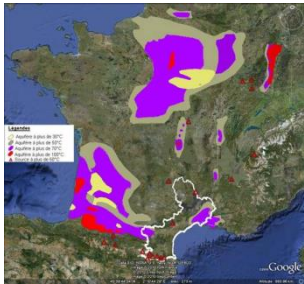
> Avantages

- Energie renouvelable
- Energie de base
- Potentiel important (~solaire)
- Faible occupation foncière
- Impacts limités
- Energie locale
- Source d'emploi local
- Coûts de fonctionnement réduits, stables
- durée de vie : 30 à 80 ans

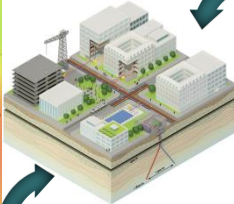
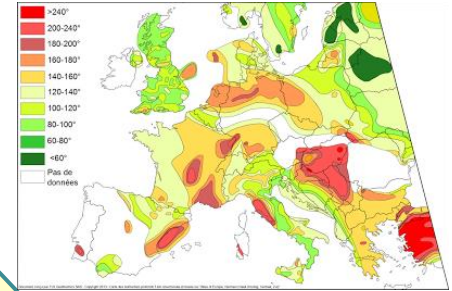
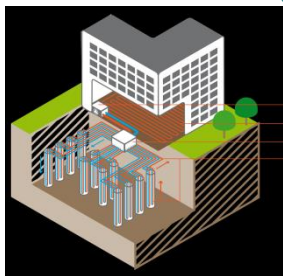
> Points faibles

- Investissement conséquent
- Risque géologique (couverture)
- Délais (haute énergie)

# La géothermie au BRGM



cfgr services

Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

*Merci pour votre attention ....*