

# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

Marc Fournier

Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP)

Stromboli 2016



# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre



Etna 2012

# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre



Etna 2015



# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre



Yasur 2010 (Vanuatu)



# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre



Tungurahua (Équateur)



# Sciences de la vie et de la Terre

## Thème 2. – Enjeux planétaires contemporains

### Thème 2-A – Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

L'énergie solaire, d'origine externe au globe terrestre, a été largement abordée dans les programmes de sciences de la vie et de la Terre des classes de seconde et de première. Un flux thermique dont l'origine est interne se dirige aussi vers la surface. L'étudier en classe de terminale est à la fois prendre conscience d'une ressource énergétique possible et un moyen de comprendre le fonctionnement global de la planète.  
Bilan : flux thermique, convection, conduction, énergie géothermique

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La température croît avec la profondeur (<b>gradient géothermique</b>) ; un <b>flux thermique</b> atteint la surface en provenance des profondeurs de la Terre (flux géothermique). Gradients et flux varient selon le <b>contexte géodynamique</b>.</p> <p>La flux thermique a pour origine principale la <b>désintégration des substances radioactives</b> contenues dans les roches.</p> <p>Deux mécanismes de <b>transfert thermique</b> existent dans la Terre : la <b>convection</b> et la <b>conduction</b>. Le transfert par convection est beaucoup plus efficace.</p> <p>A l'échelle globale, le flux fort dans les dorsales est associé à la production de lithosphère nouvelle ; au contraire, les zones de subduction présentent un flux faible associé au plongement de la lithosphère âgée devenue dense. <b>La Terre est une machine thermique.</b></p> <p><b>L'énergie géothermique</b> utilisable par l'homme est variable d'un endroit à l'autre.</p> <p>Le prélèvement éventuel d'énergie par l'homme ne représente qu'une infime partie de ce qui est dissipé.</p> <p><i>Objectifs et mots clés. Il s'agit de montrer le lien étroit entre la compréhension du fonctionnement de la planète et l'utilisation par l'Homme d'une ressource naturelle que l'on peut considérer inépuisable. La compréhension du transfert thermique dans la Terre permet de compléter le schéma de tectonique globale en y faisant figurer la convection mantellique.</i></p> <p><i>(Collège, seconde, première. Il convient de réinvestir les résultats des classes antérieures pour aboutir à une compréhension très globale du fonctionnement de la planète.)</i></p> <p><i>[Limites. Aucune formalisation mathématique de la circulation de la chaleur n'est attendue.]</i></p> <p><i>Convergences. Physique : transferts thermiques.</i></p> <p><i>Pistes. Approche mathématique du flux thermique, calcul du gradient géothermique.</i></p>	<p>Exploiter des données extraites des <b>atlas régionaux des ressources géothermales</b> en France, concernant la température des fluides extraits dans ces zones</p> <p>Exploiter les données recueillies lors d'une sortie locale dans une <b>exploitation géothermique</b>.</p> <p>Exploiter l'<b>imagerie satellitale</b> et les <b>cartes de répartition mondiale du flux thermique</b> pour replacer les exploitations actuelles dans le cadre structural : magmatisme de rifting, de subduction ou de points chauds.</p> <p><b>Réaliser des mesures de conduction et de convection</b> à l'aide d'un dispositif ExAO et les traiter avec un tableur informatique.</p> <p>Réaliser et exploiter une <b>modélisation analogique de convection</b> en employant éventuellement des matériaux de viscosité différente.</p> <p>Exploiter les <b>imageries de tomographies sismiques</b>.</p>

**Géothermal** : dont la température est due à un séjour en profondeur (ex. eaux géothermales)

**Géothermique** : qui se rapporte à la géothermie (chaleur de la Terre et énergie qu'elle procure)



# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

## Introduction

- Manifestations de la chaleur : volcanisme, hydrothermalisme...
- Exemples d'utilisation de la chaleur géothermique par l'Homme

### ➤ 1. La Terre libère de la chaleur

- 1.1. Mesures des températures en profondeur ⇒ géotherme, gradient géothermique
- 1.2. Mesures du flux de chaleur à la surface de la Terre
- 1.3. Flux de chaleur et contexte géodynamique
- 1.4. Bilan global

### ➤ 2. Exploitation de l'énergie géothermique

- 2.1. Géothermie basse température dans le bassin de Paris
- 2.2. Géothermie haute température à Soultz (Bouillante, Larderello,...)
- 2.3. Géothermie très basse température

### ➤ 3. La Terre produit de la chaleur par radioactivité

- 3.1. Découverte de la radioactivité
- 3.2. Les 4 radioéléments naturels producteurs de chaleur
- 3.3. Autres sources de chaleur

### ➤ 4. La dissipation de la chaleur est le moteur de la tectonique des plaques

- 4.1. Conduction
- 4.2. Convection
- 4.3. La dissipation de la chaleur de la Terre est le moteur de la tectonique des plaques

## Conclusion

- Schéma bilan
- Avantages de l'énergie géothermique



# Volcanisme



Volcan Kilauea, Hawaii, 6 mars 2011 (photo Hawaiian Volcano Observatory, USGS)

$T > 900^{\circ} \text{C}$



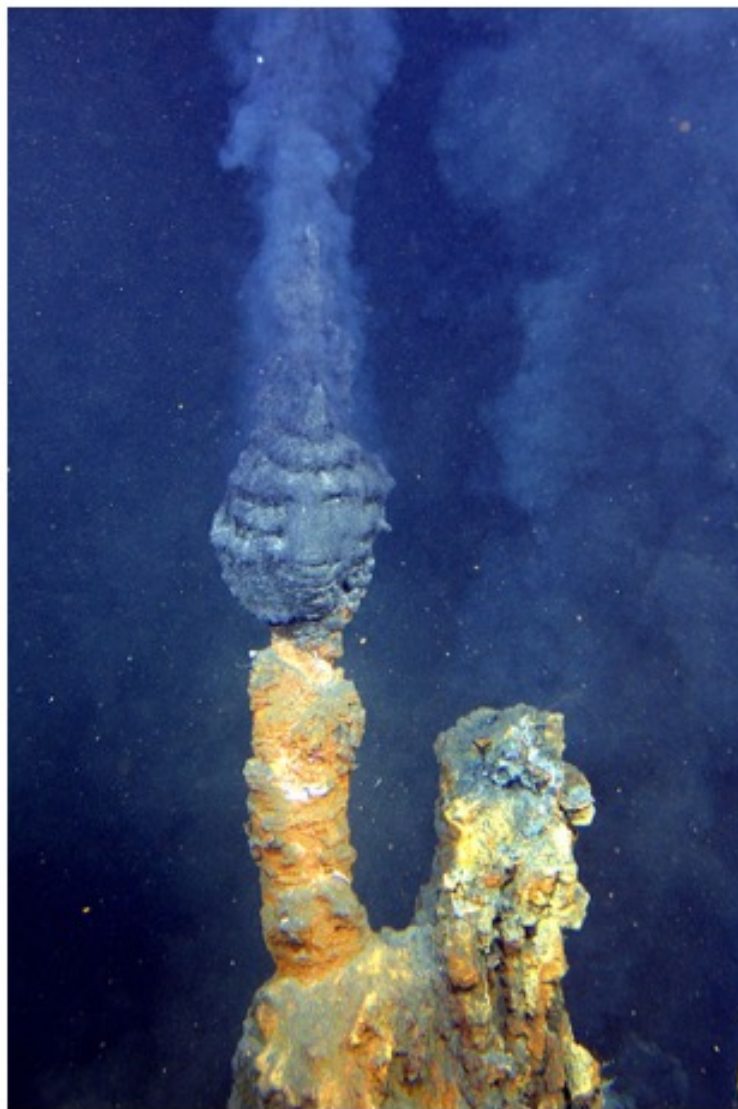
# Volcanisme



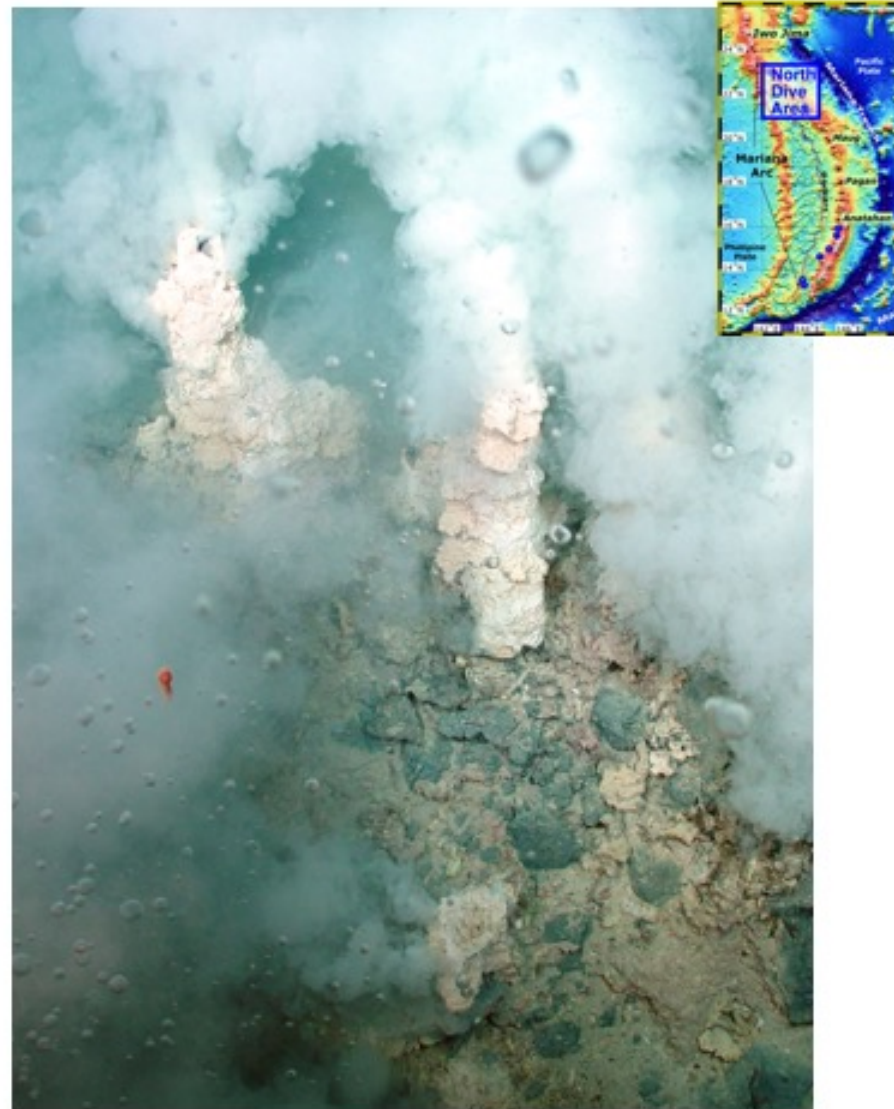
Volcan Kilauea, Hawaii, mai 2018



# Hydrothermalisme

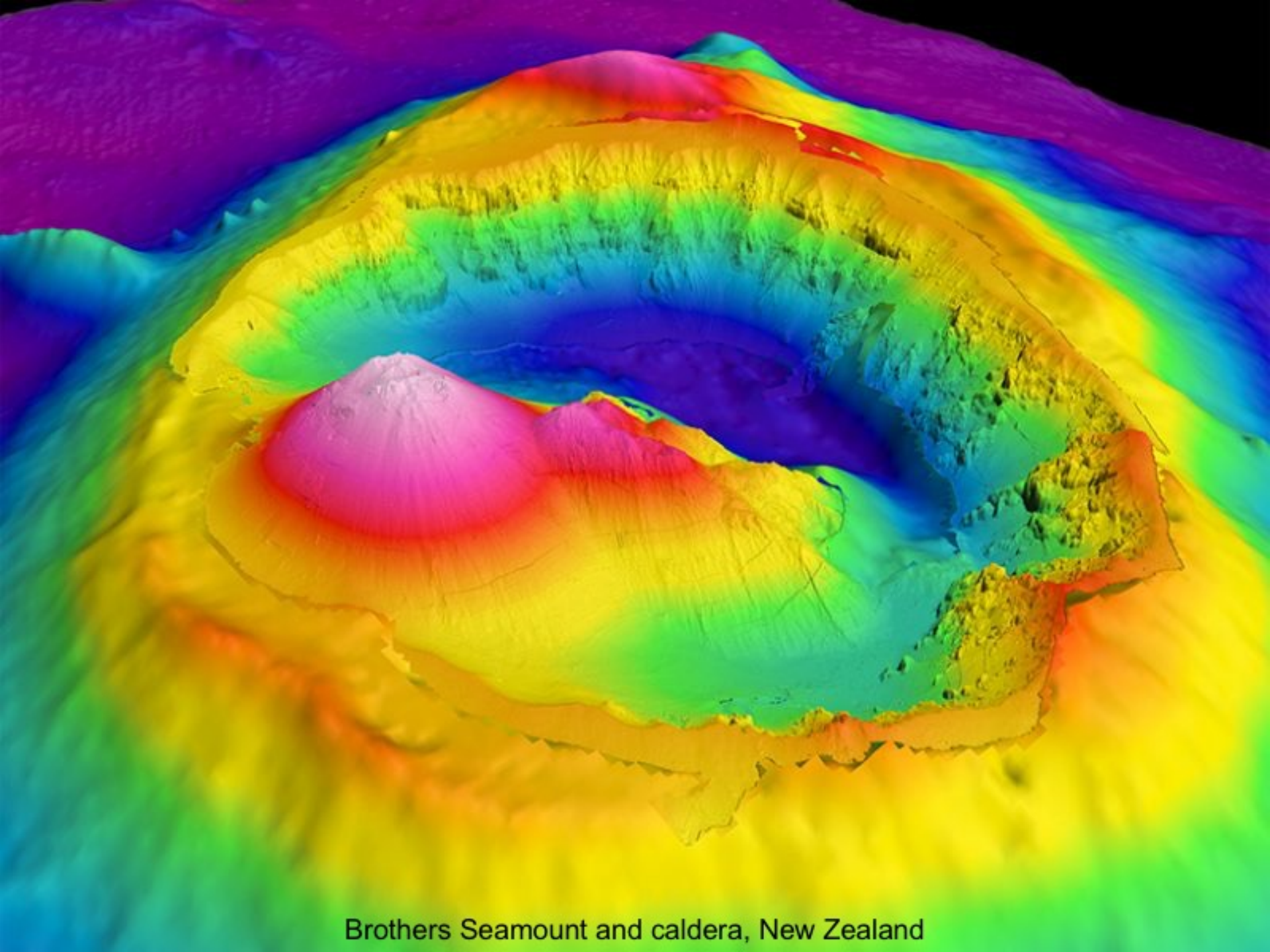


Fumeurs noirs : The Brothers, Nlle-Zélande  
 $T = 350^{\circ} \text{C}$



Fumeurs blancs : site Champagne du volcan Eifuku  
 $T = 103^{\circ} \text{C}$

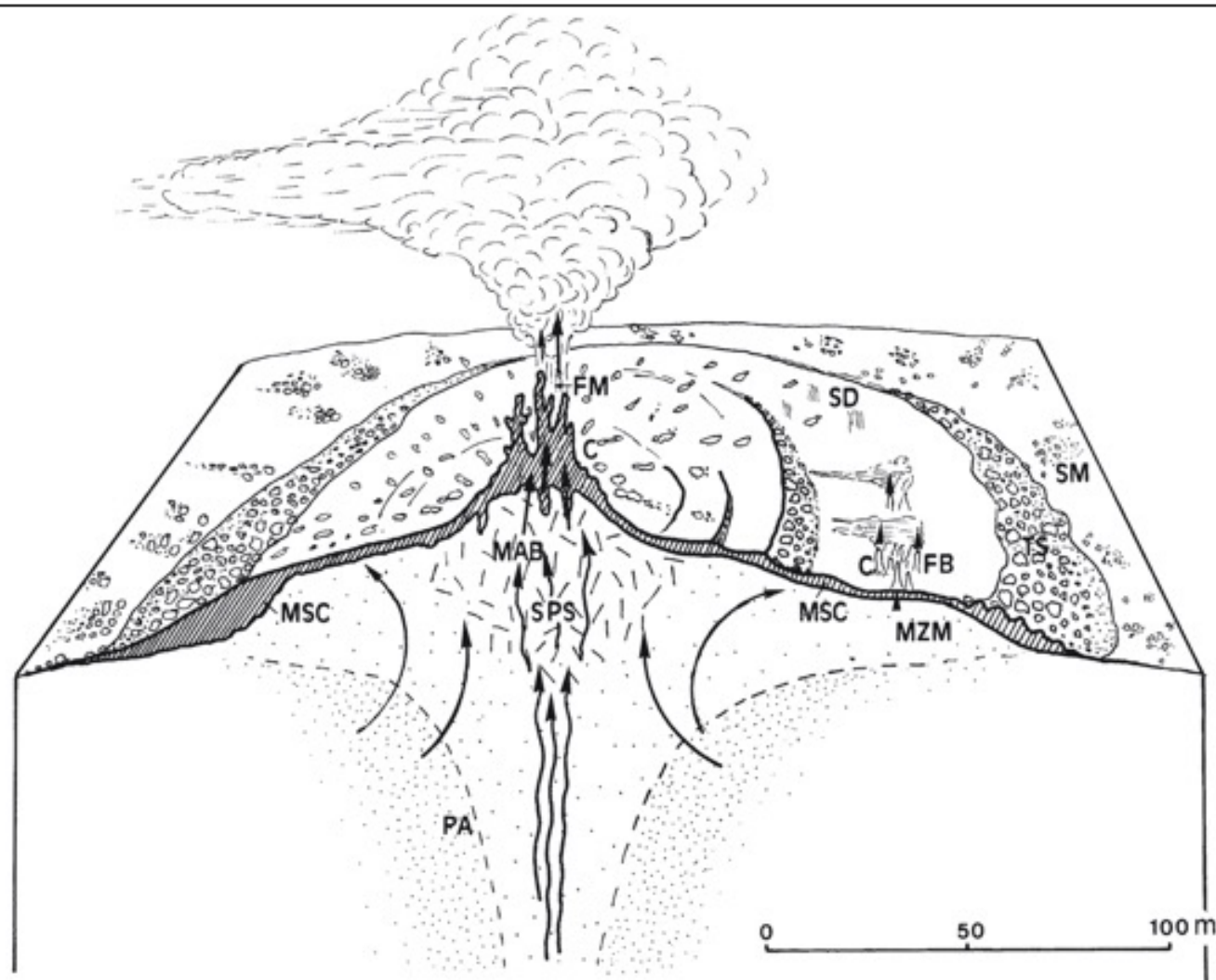
*NOAA Ocean Explorer 2004*



Brothers Seamount and caldera, New Zealand



# Schéma d'un site hydrothermal



## Tertre (amas sulfuré) du champ hydrothermal TAG (MAR)

Les fumeurs noirs sont directement alimentés par le flux ascendant central et les fumeurs blancs par des dérivations dans des conduits latéraux intra-tertre. FM = fumeur noir ; FB = fumeur blanc ; SD = suintement diffus ; C = cheminée ; TS = talus sulfuré ; SM = sédiments métallifères ; MSC = minéral sulfuré compact ; MAB = minéral à anhydrite bréchique ; MZM = minéral zincifère marginal ; SPS : stockwerk pyriteux silicifié ; PA = pipe d'altération chloriteuse.

# Le site hydrothermal fossile de Zuha (Oman)



C.Nicollet

Les terres d'ombre (croûtes sombres) qui forment la colline de Zuha sont des sédiments métallifères : Mn, Fe, Cu, Zn. Elles reposent sur une fine épaisseur de radiolarites ou bien directement sur les laves en coussin. La faible épaisseur ou l'absence de sédiments montrent que les terres d'ombre se déposent à l'axe de la dorsale. Elles sont abondantes dans un périmètre de 2 km autour de la colline de Zuha.

<http://christian.nicollet.free.fr/page/oman/Zuha/zuha.html>



# Hydrothermalisme



Geyser : Castle Geyser, Yellowstone  
 $T > 100^{\circ} \text{ C}$



Chaudes-Aigues, Cantal : source du Par  
 $T = 82^{\circ} \text{ C}$





# Sources thermales : thermes, bains



Thermes de Lipari, époque mycénienne -1300 BC,  
(vue depuis Vulcano, subduction)



Takaragawa onsen, Japon (subduction)



Blue Lagoon, Islande (dorsale)

Centrale géothermique thermoélectrique de Svartsengi



Sources d'eau  
chaude du Parc  
national Mae  
Fang, Thaïlande





# Centrale géothermique, chauffage



Prince Conti, Larderello, 1904

La centrale géothermique de Nesjavelli transforme l'énergie géothermique en électricité  
→ géothermie à haute énergie :  
 $T > 150^{\circ} \text{C}$



## Islande

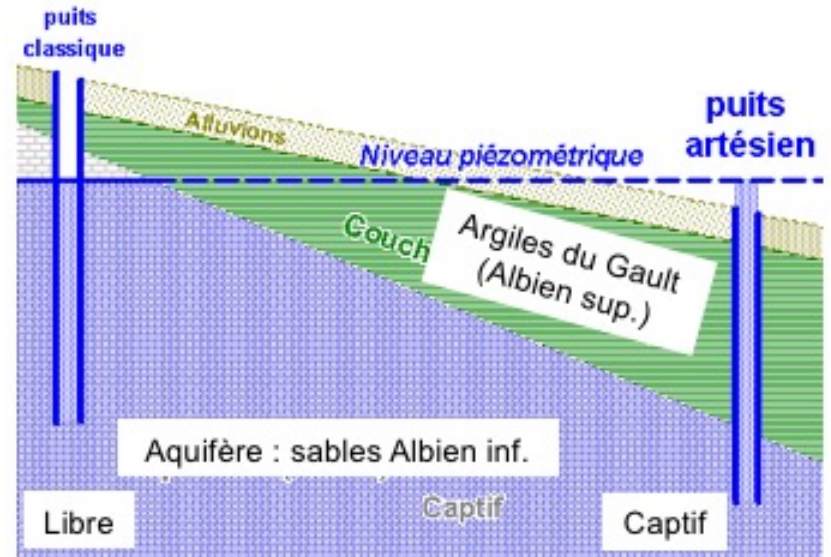
- Premier chauffage urbain géothermique à Reykjavik en ~1930'
- 89% des habitations chauffées par géothermie (2006)
- Gradient géothermique  $> 150^{\circ}\text{C}/\text{km}$

# Puits artésiens



Puits artésien de Grenelle, 1841

Nappe phréatique de l'Albien, 548 m,  $T=30^{\circ}$  C



Principe du puits artésien



Fontaine de la Butte-aux-Cailles (1904)



# Puits artésiens



Puits artésien de Grenelle, 1841  
Nappe phréatique de l'Albien, 548 m,  $T=30^{\circ}\text{C}$

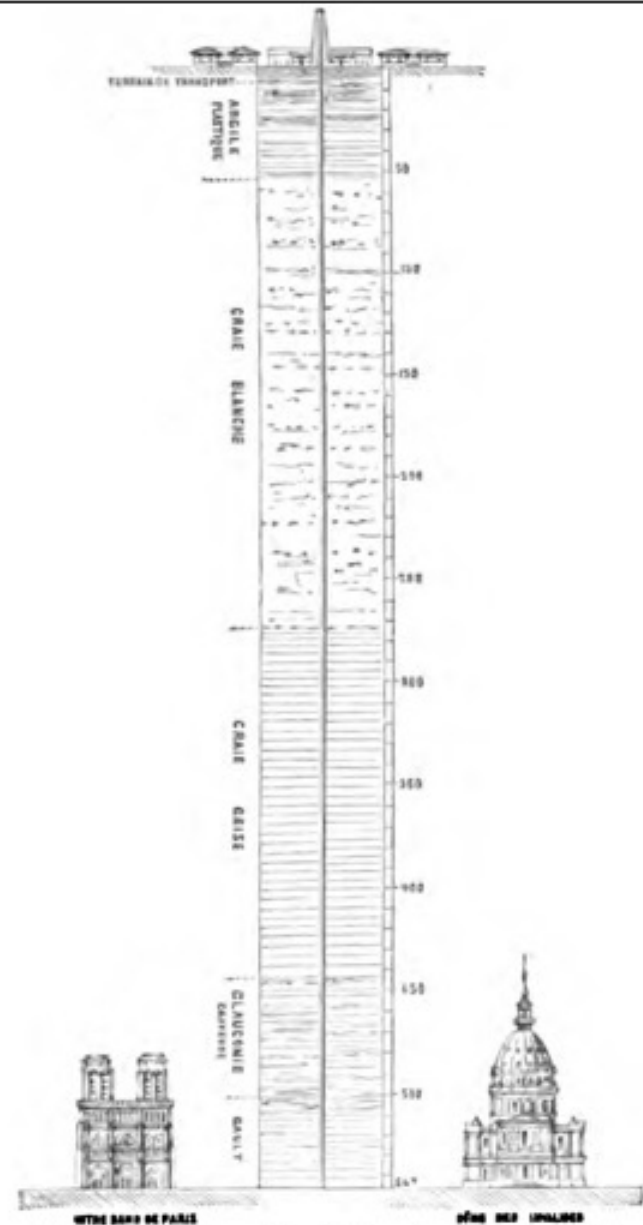


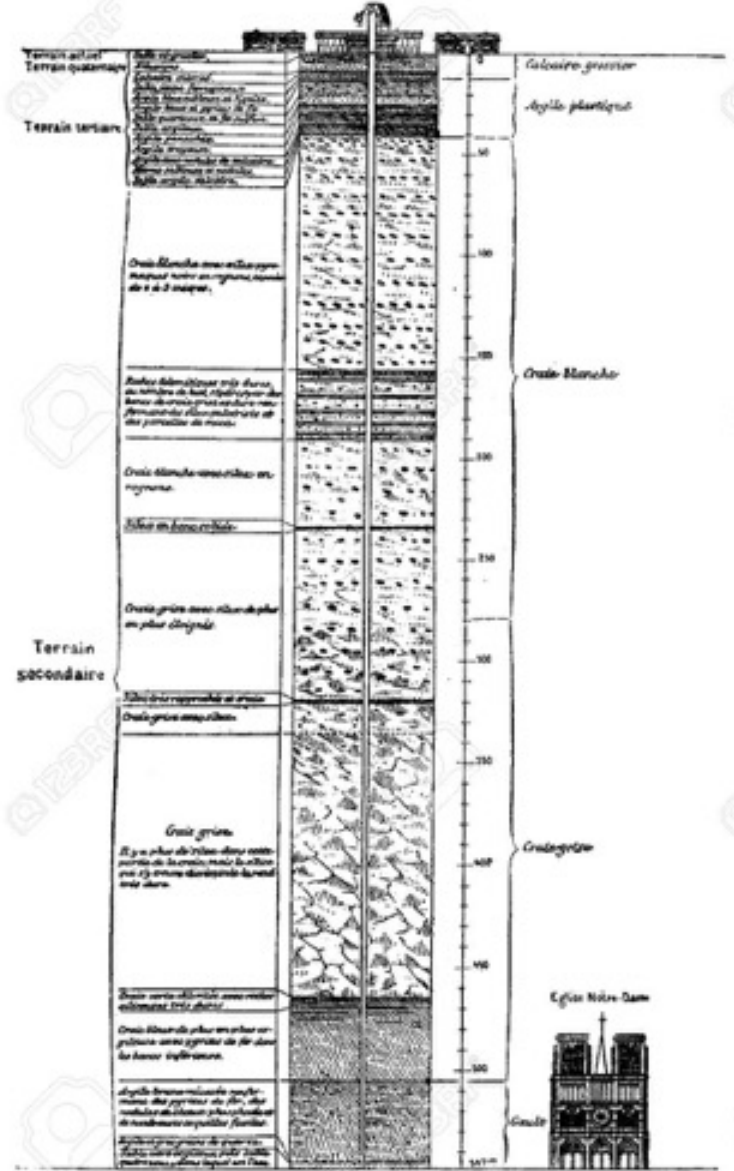
Fig. 8. — Coupe du sondage de Grenelle, d'après M. Mulot.

## Puits artésiens



### Puits artésien de Grenelle, 1841

Nappe phréatique de l'Albien, 548 m,  $T=30^{\circ}$  C

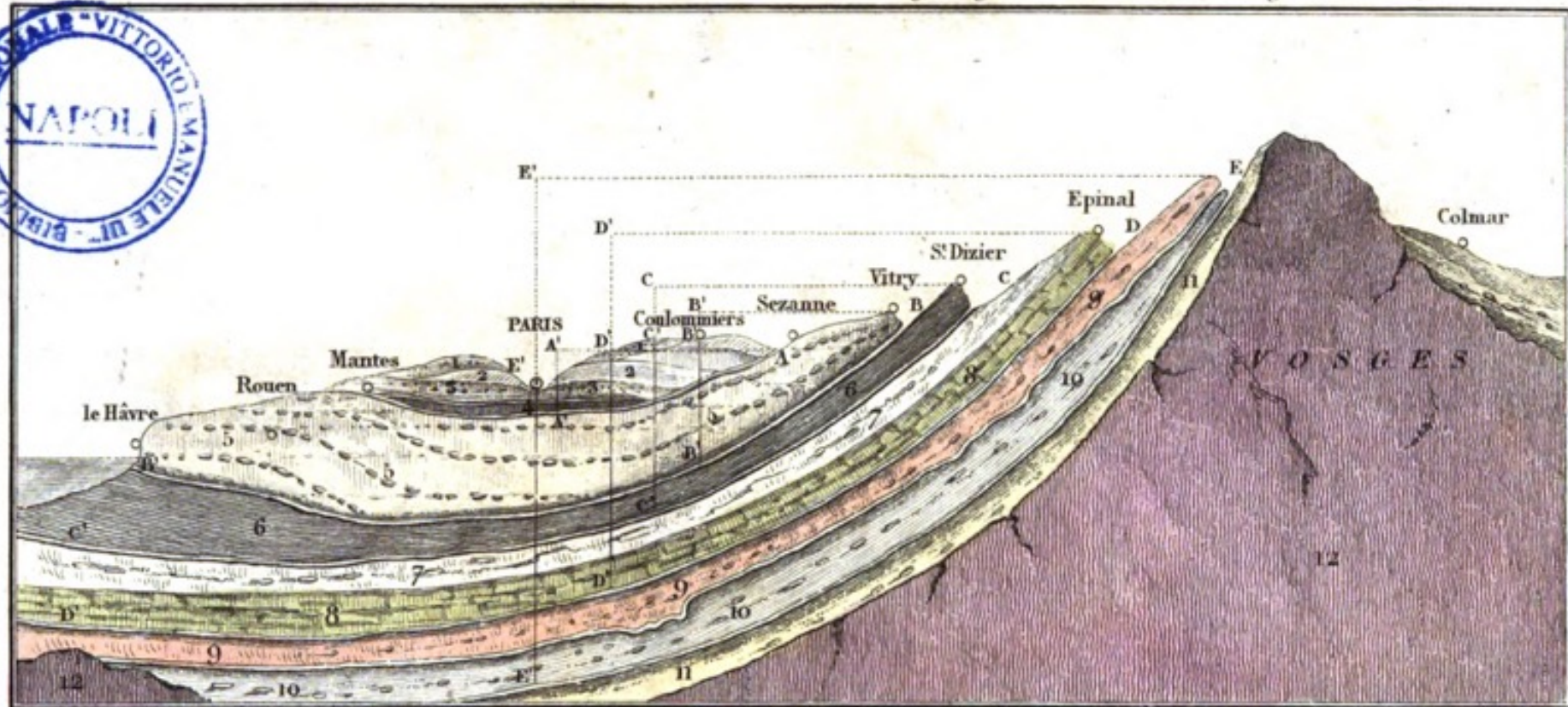


### Coupe géologique du puits de Grenelle



# Puits artésiens

*Application de la théorie des puits forés à la coupe oryctognostique des Vosges au Havre.*

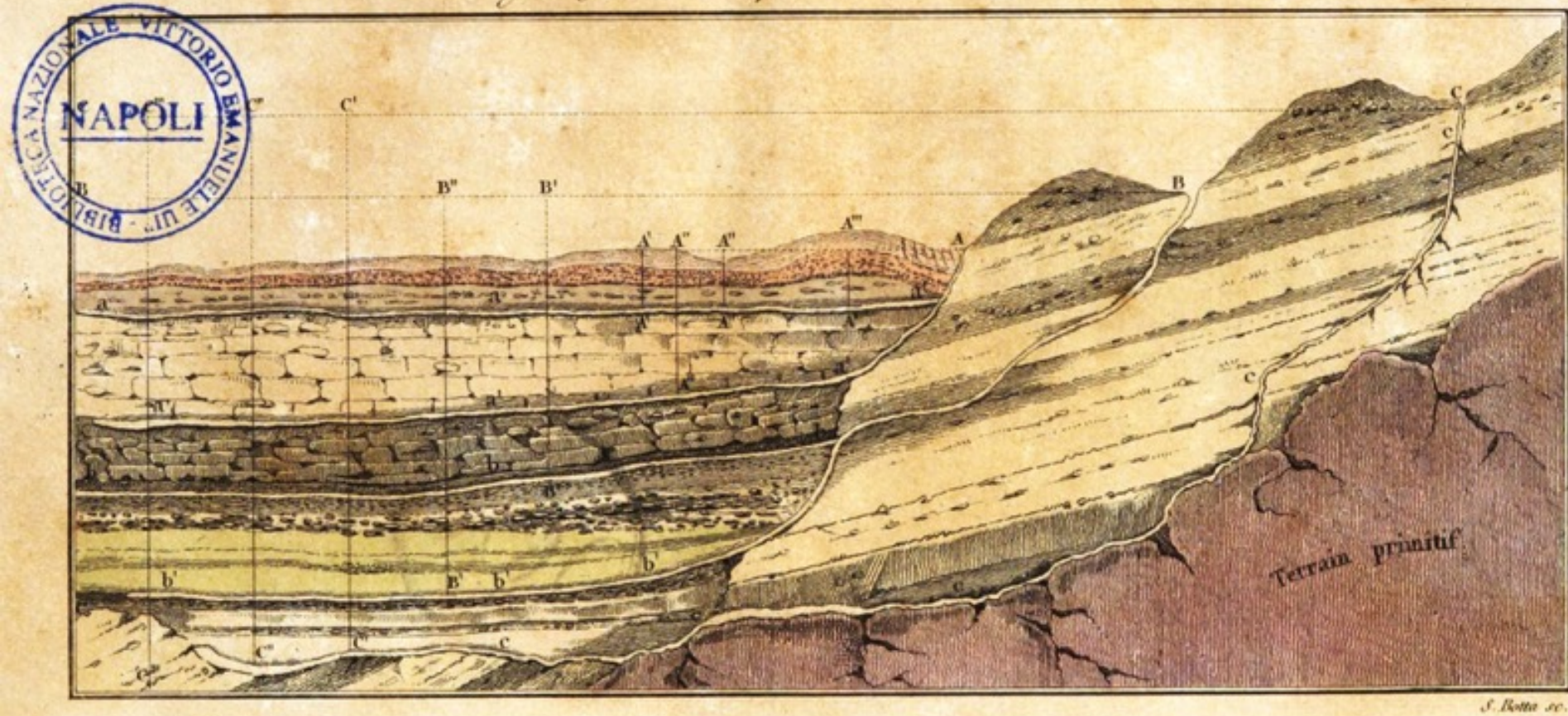


Coupe du bassin de Paris par Héricart de Thury, inventeur de l'artésianisme (1829)



# Puits artésiens

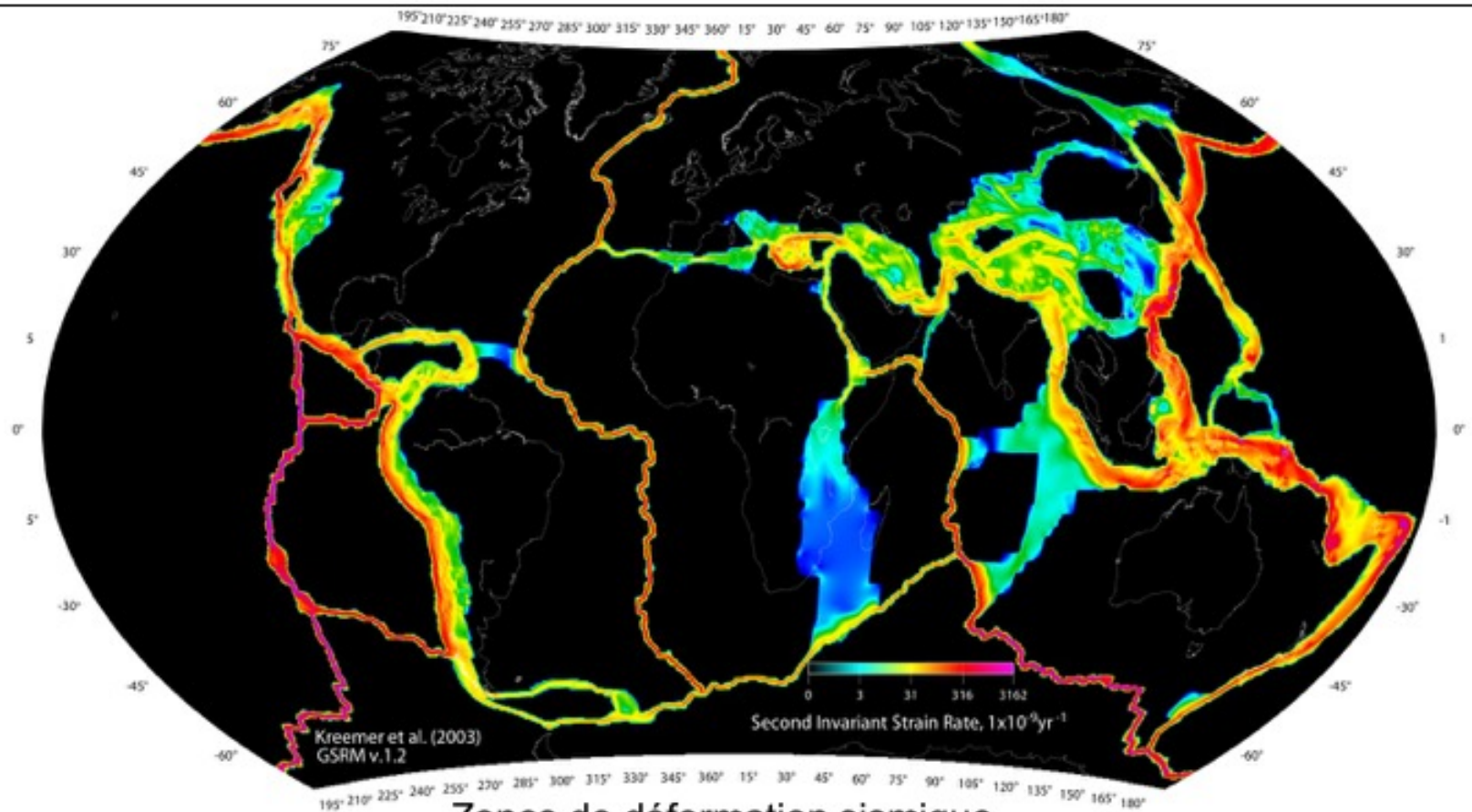
*Théorie des fontaines jaillissantes des puits forés suivant la méthode Artésienne.*



Théorie de l'artésianisme par Héricart de Thury, (1829)



# La tectonique des plaques



Zones de déformation sismique

Contexte géodynamique	Laves extrusives	Laves intrusives
Subduction	0,6	8
Dorsales	3	18
Points chauds océaniques	0,4	2
Points chauds continentaux	0,1	1,5

Volumes de laves émises en  $\text{km}^3/\text{an}$

# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

## Introduction

- Constat : la Terre libère de la chaleur
- Manifestations directes d'évacuation de la chaleur :
  - volcanisme
  - hydrothermalisme
  - énergie géothermique exploitée par l'homme
- Manifestations indirectes :
  - mouvement des plaques tectoniques
  - ouverture des océans, formation des chaînes de montagnes
  - séismes, tsunami
  - ... la plupart des phénomènes associés à la tectonique des plaques
- Peut-on mesurer la chaleur ?
  - > mesures de température en profondeur
- Peut-on quantifier la libération de chaleur ?
  - > mesures du flux de chaleur sortant

## ➤ 1. La Terre libère de la chaleur

### 1.1. Mesures des températures en profondeur

⇒ géotherme, gradient géothermique

### 1.2. Mesures du flux de chaleur à la surface de la Terre

### 1.3. Flux de chaleur et contexte géodynamique

### 1.4. Bilan global



# Les mines les plus profondes du monde

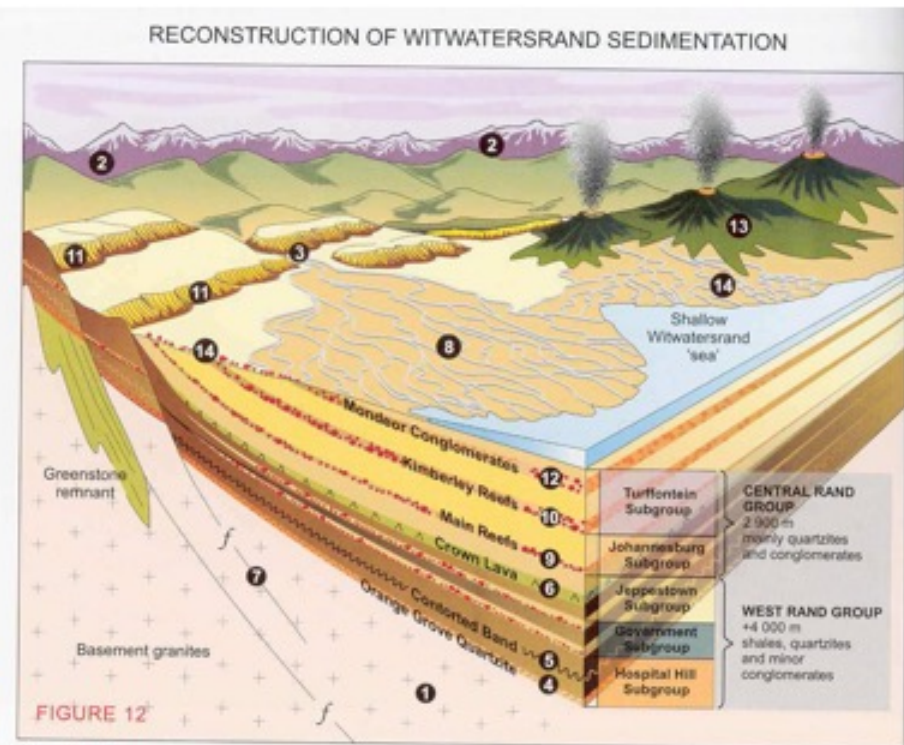


FIGURE 12  
An artist's impression of the formation of Witwatersrand Supergroup at the end of sedimentation



Conglomérat aurifère à galets de quartz

## Mines d'or du Witwatersrand (Afrique du sud)

- exploitation de conglomérats aurifères (2,9 milliards d'années, Archéen)
- ~31% de l'or mondial a été extrait du Witwatersrand (rand = monnaie)

# Les mines les plus profondes du monde



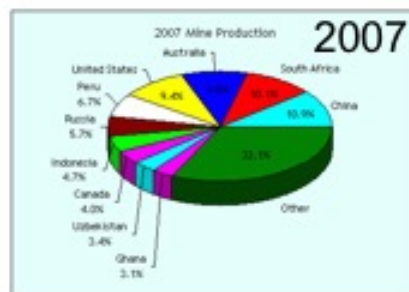
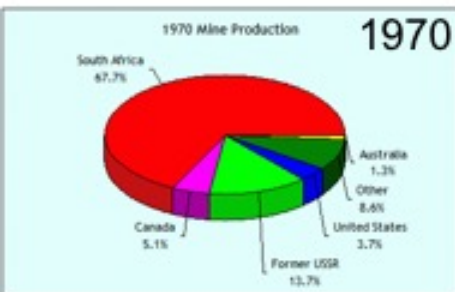
Exploitation à ciel ouvert de Kalgold



Puits de mine (Joel)



Usine à glace



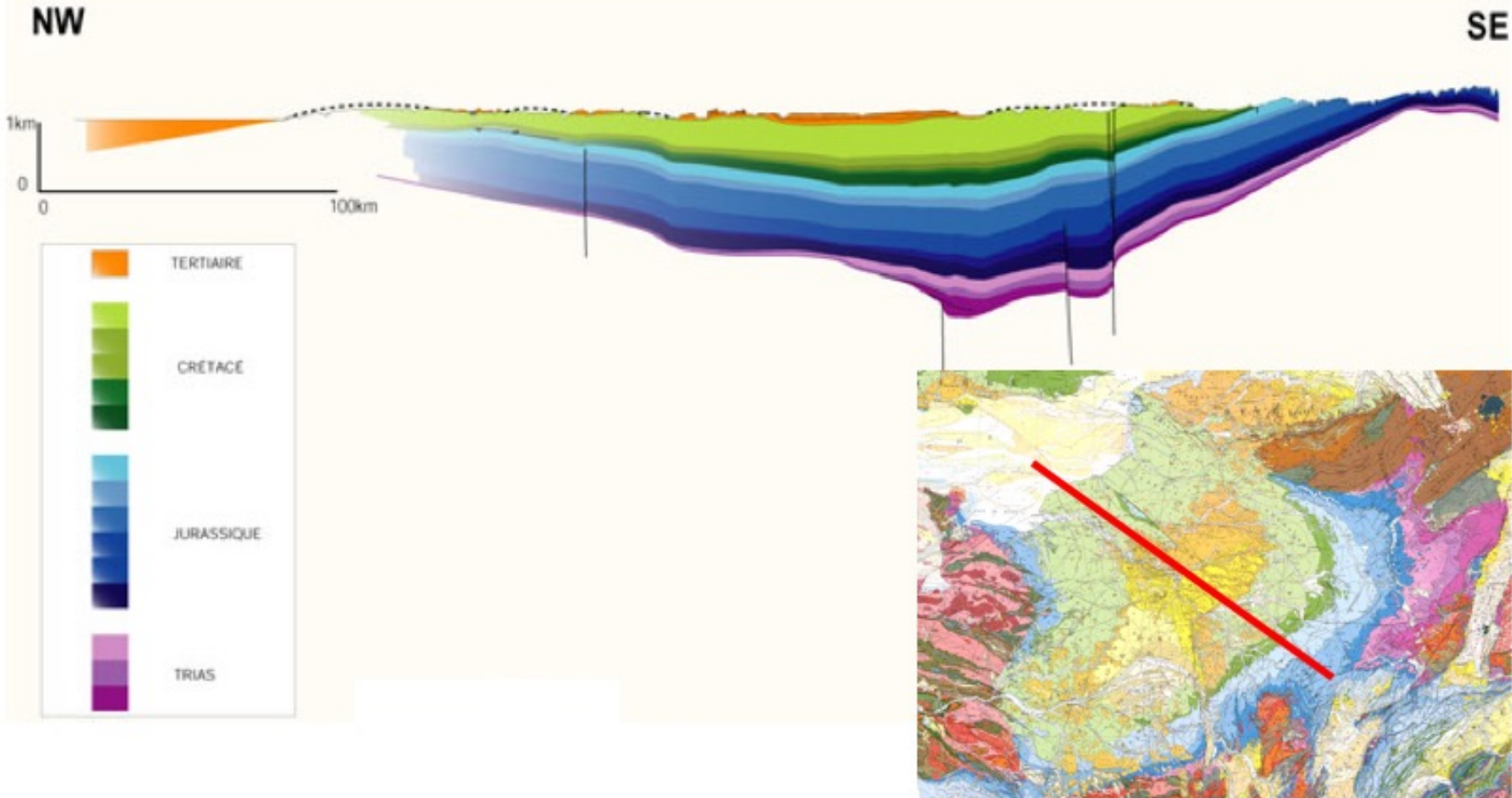
Production d'or mondiale

## Mines d'or du Witwatersrand (Afrique du sud)

- exploitation jusqu'à 3800 m (prévu au-delà de 4000 m)
- température des roches > 60°C ---> **gradient faible ~12°C/km**
- système de refroidissement coûteux avec des usines à glace

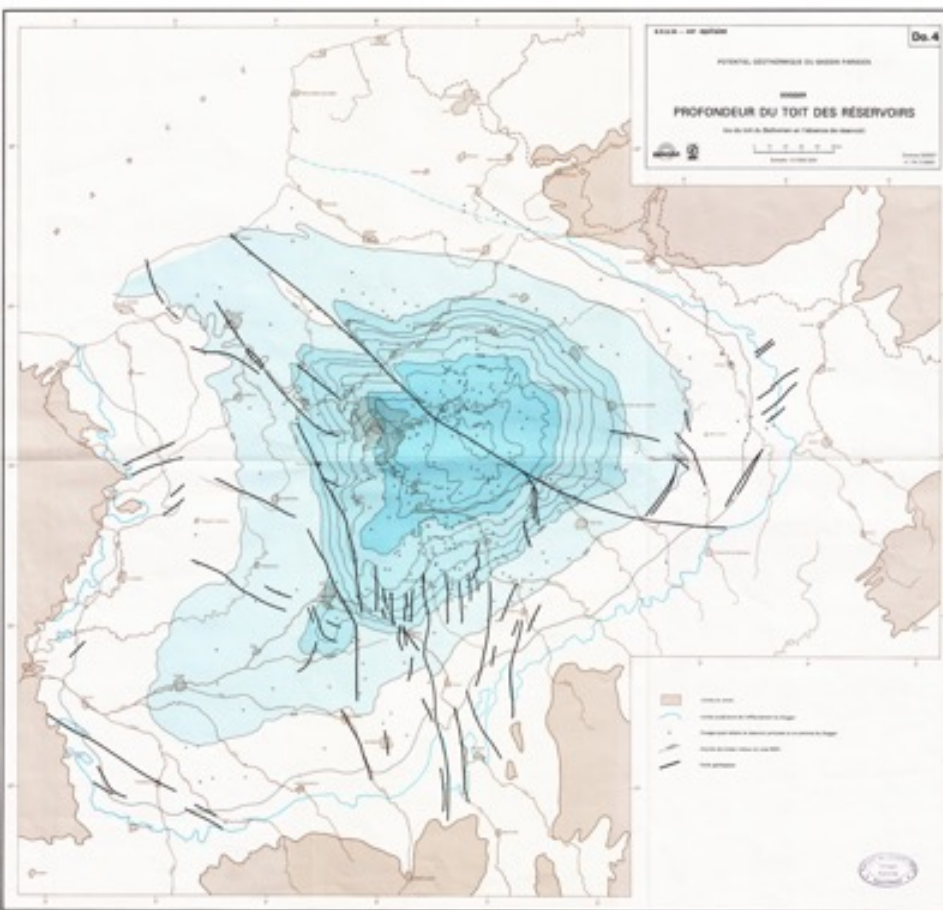


# Gradient géothermique du bassin de Paris

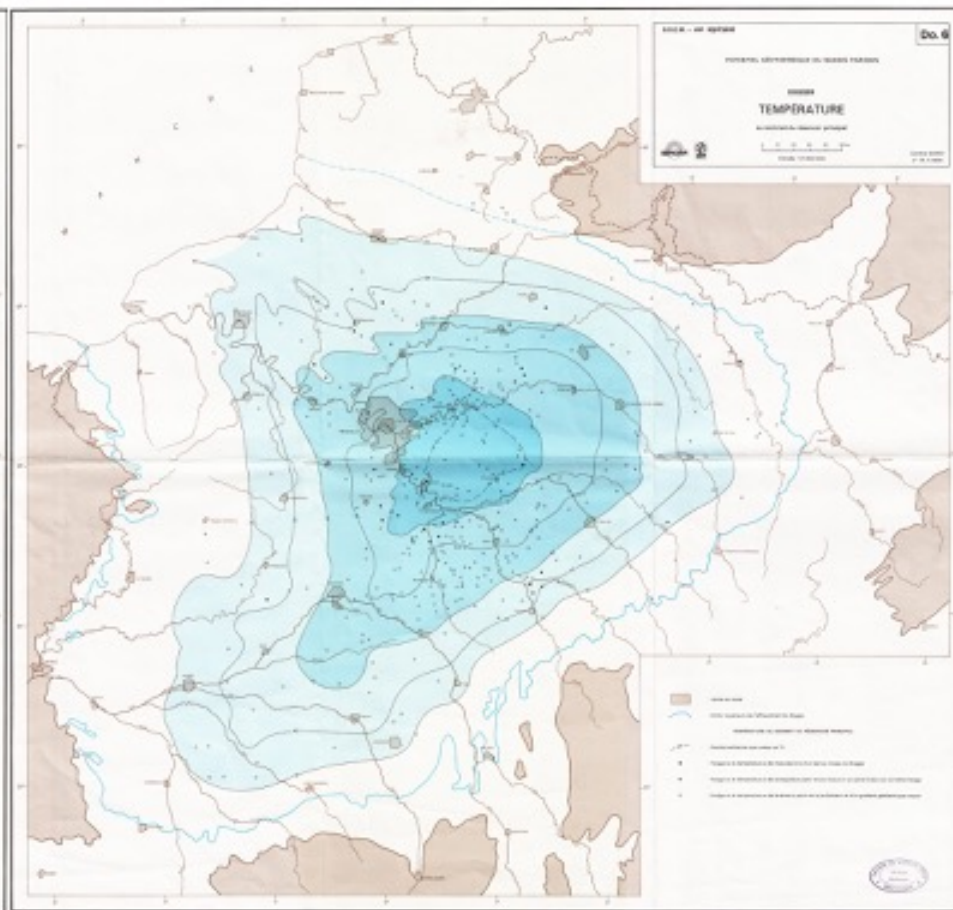


- structure géologique simple et régulière
- 1400 forages pétroliers profonds

# Profondeur et température des aquifères



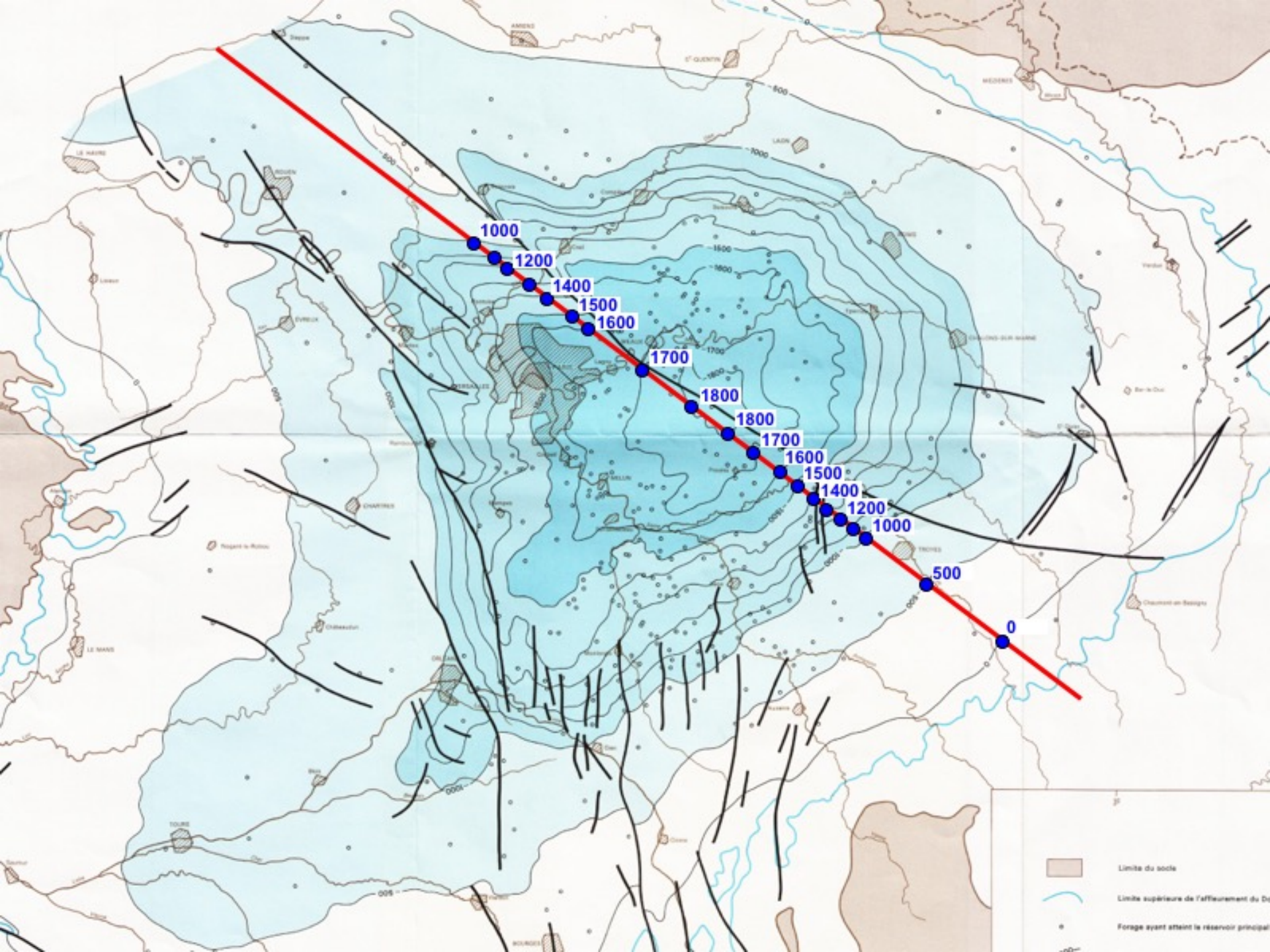
Profondeur du toit du réservoir



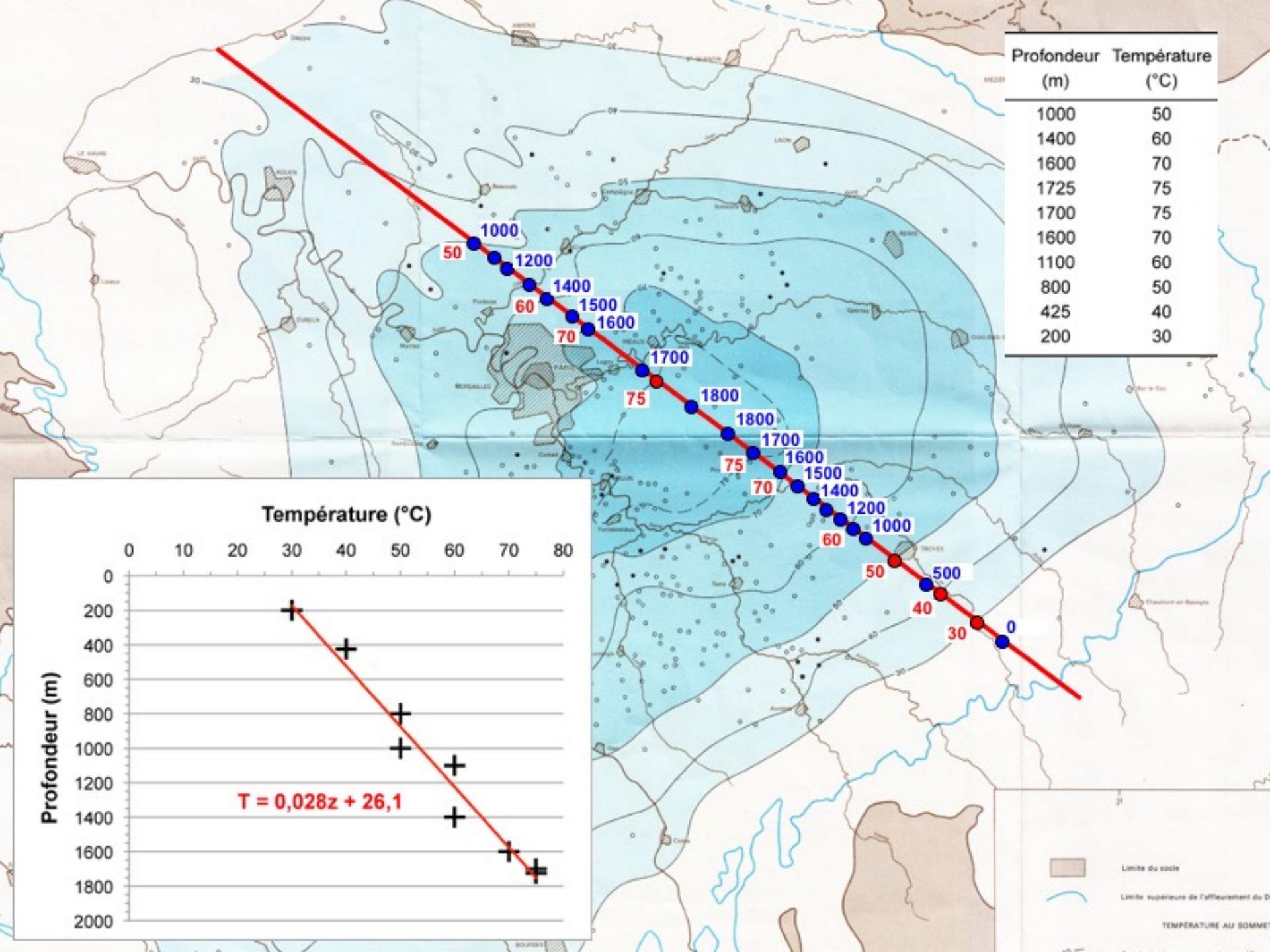
Température du réservoir

Jurassique moyen (Dogger)

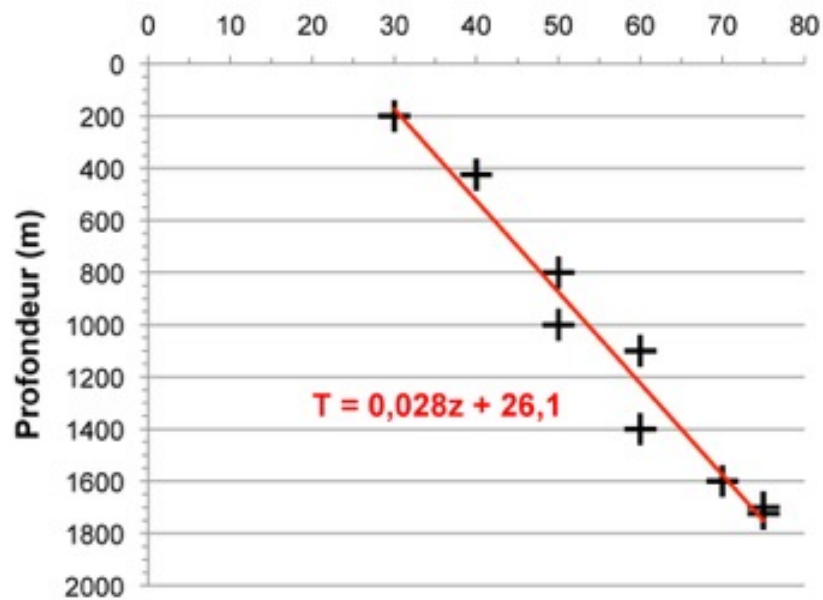








Température (°C)

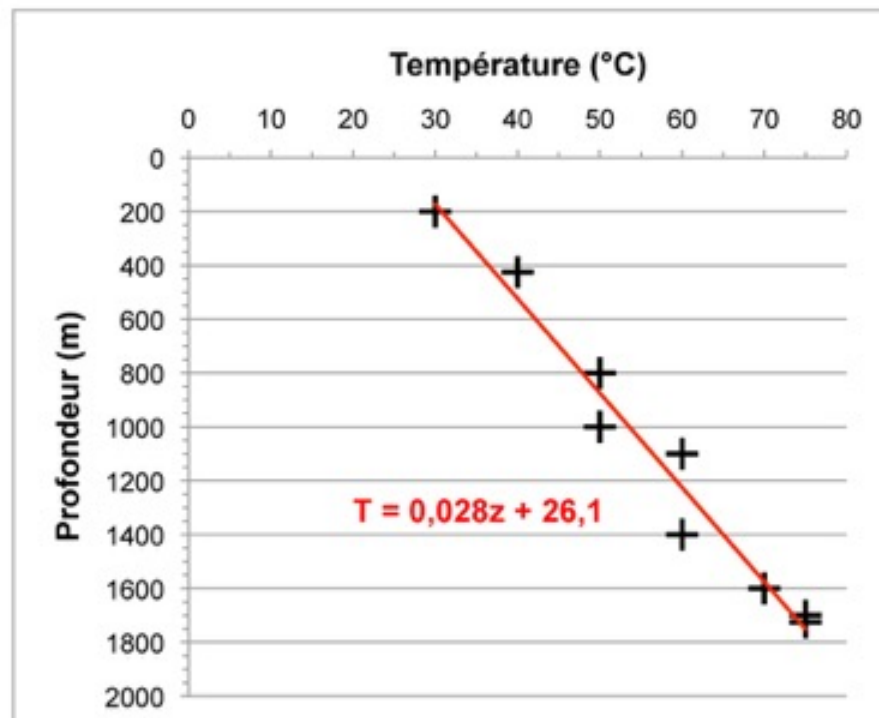




# Gradient géothermique

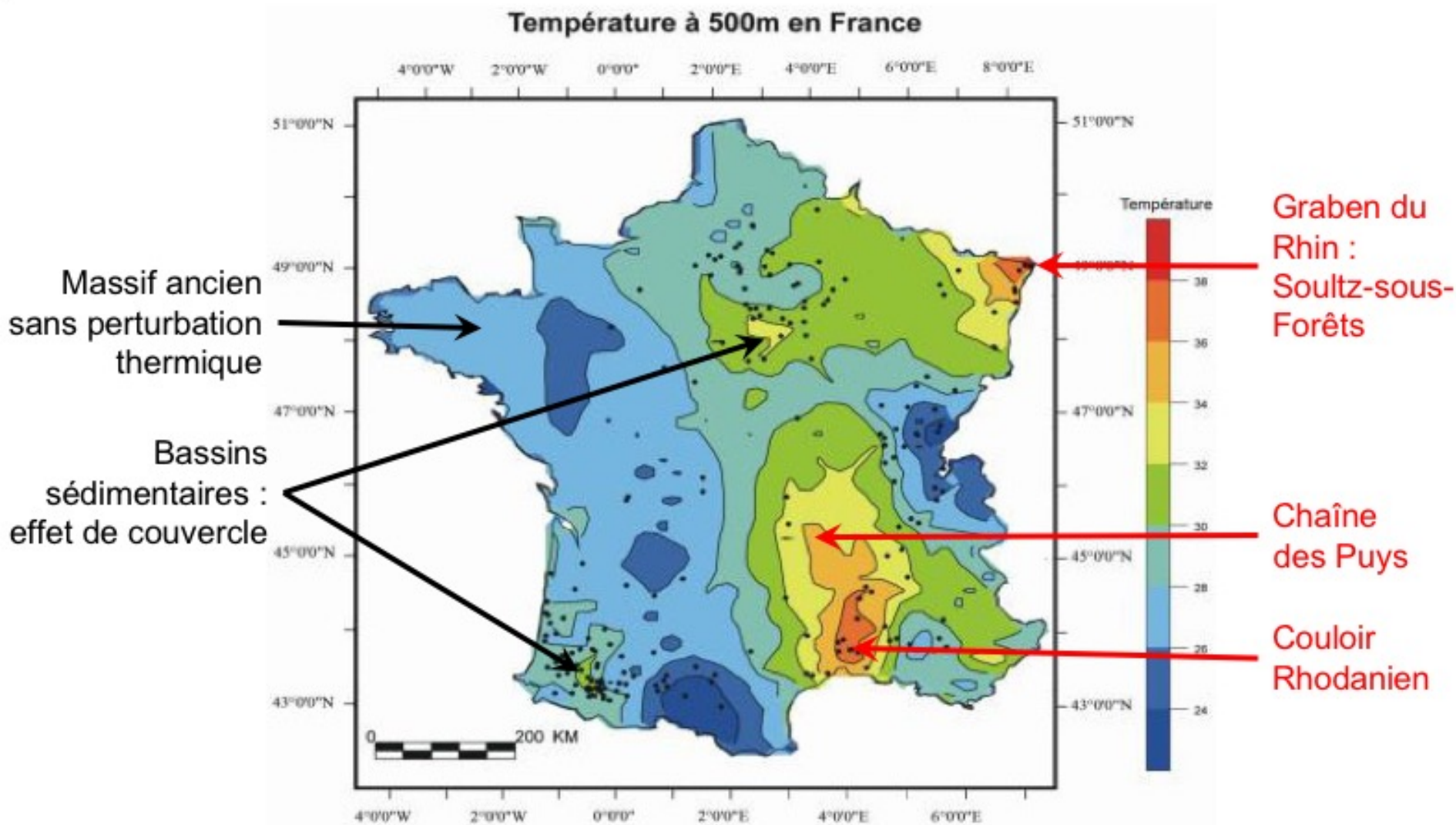
Evolution de la température avec la profondeur  
Bassin de Paris, nappe du Dogger

Profondeur (m)	Température (°C)
1000	50
1400	60
1600	70
1725	75
1700	75
1600	70
1100	60
800	50
425	40
200	30



- la température augmente de  $\sim 28^\circ$  par kilomètre
- **gradient géothermique** =  $28^\circ\text{C/km}$
- température de surface  $\sim 26^\circ\text{C}$  (moyenne pour la Terre :  $14^\circ\text{C}$ )
- **géotherme** : courbe  $T = f(z)$
- le **gradient géothermique** est la pente du **géotherme**

# Gradient géothermique fonction du contexte géologique/géodynamique



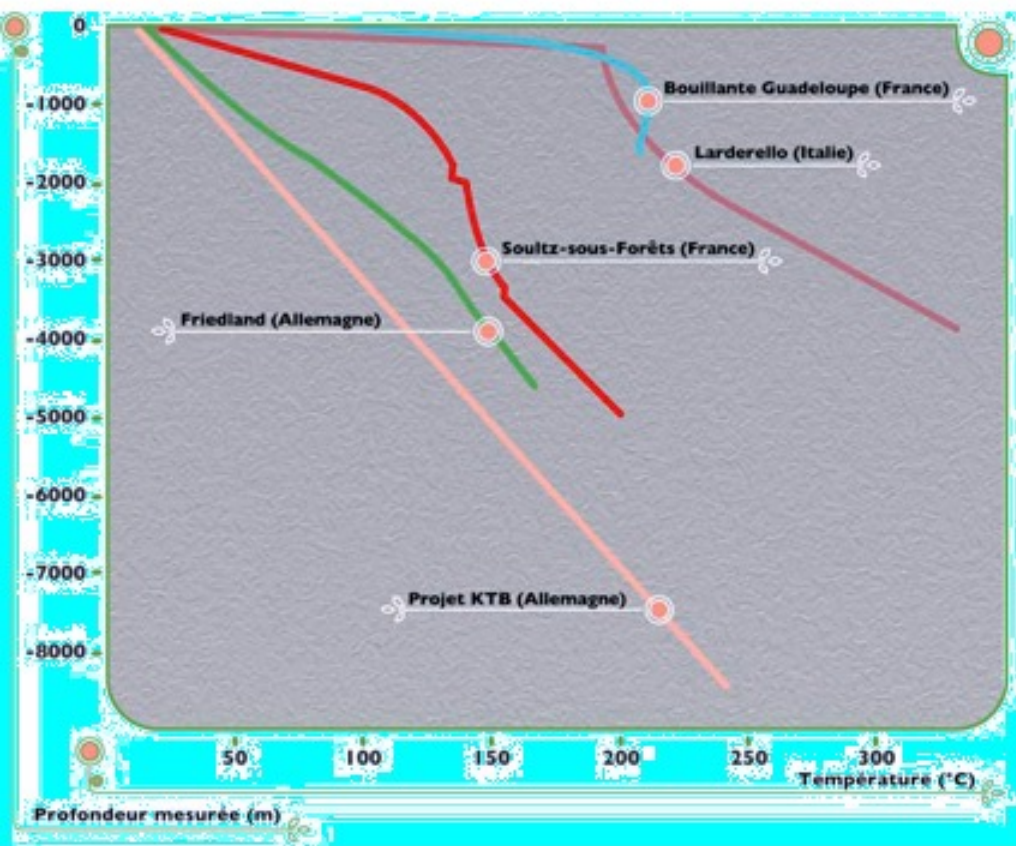
## Températures à 500 m

Bonté et Guillou-Frotier, BRGM, 2006

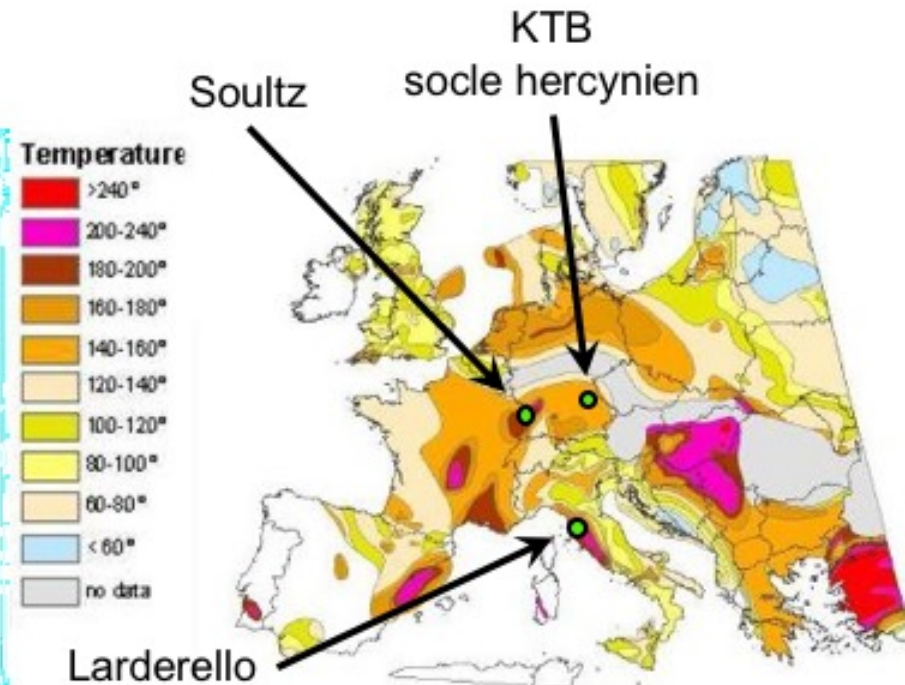
[http://sigminesfrance.brgm.fr/geophy\\_flux.asp](http://sigminesfrance.brgm.fr/geophy_flux.asp)



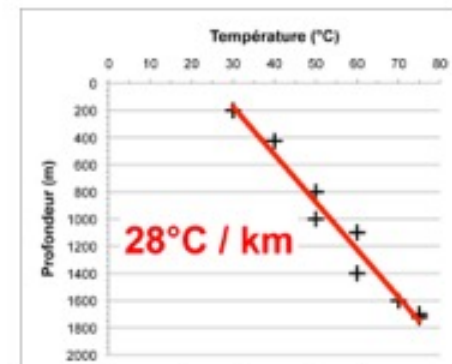
# Géothermes en surface



Géothermes de sites remarquables

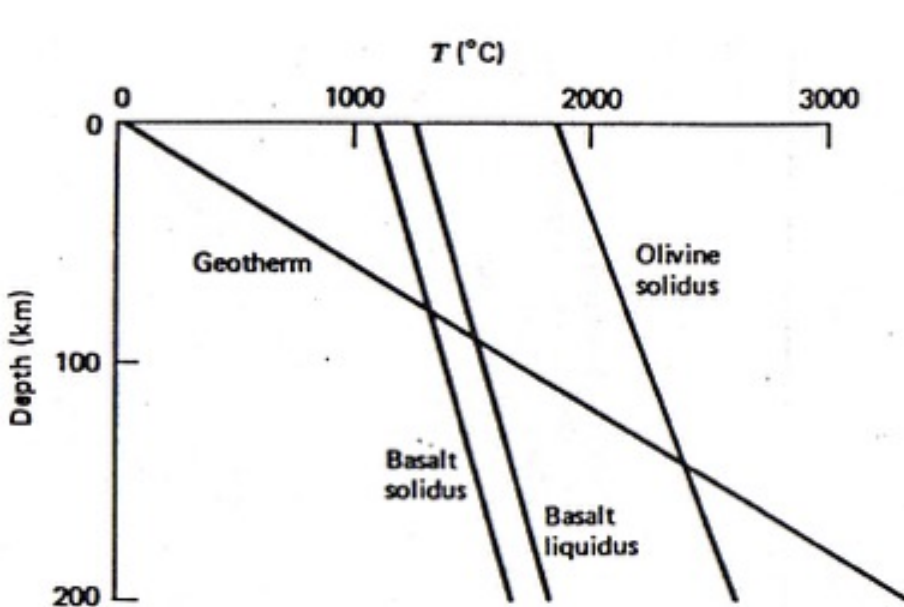


Carte des températures à 5000 m

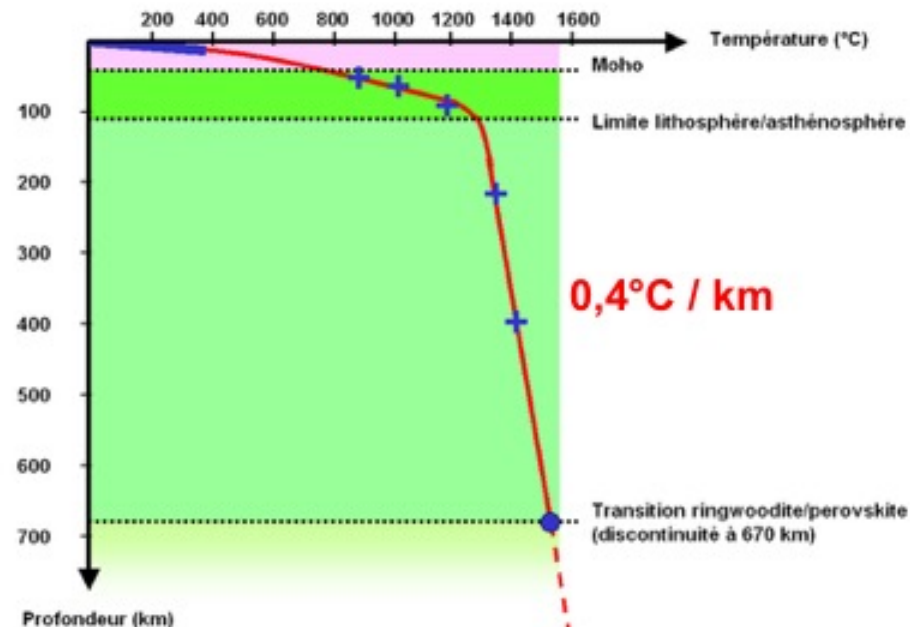


Bassin de Paris

# Le géotherme en profondeur



Profil de température dans la Terre  
avec gradient géothermique constant  
⇒ fusion du manteau ?  
⇒ mécanisme de transport de chaleur  
plus efficace



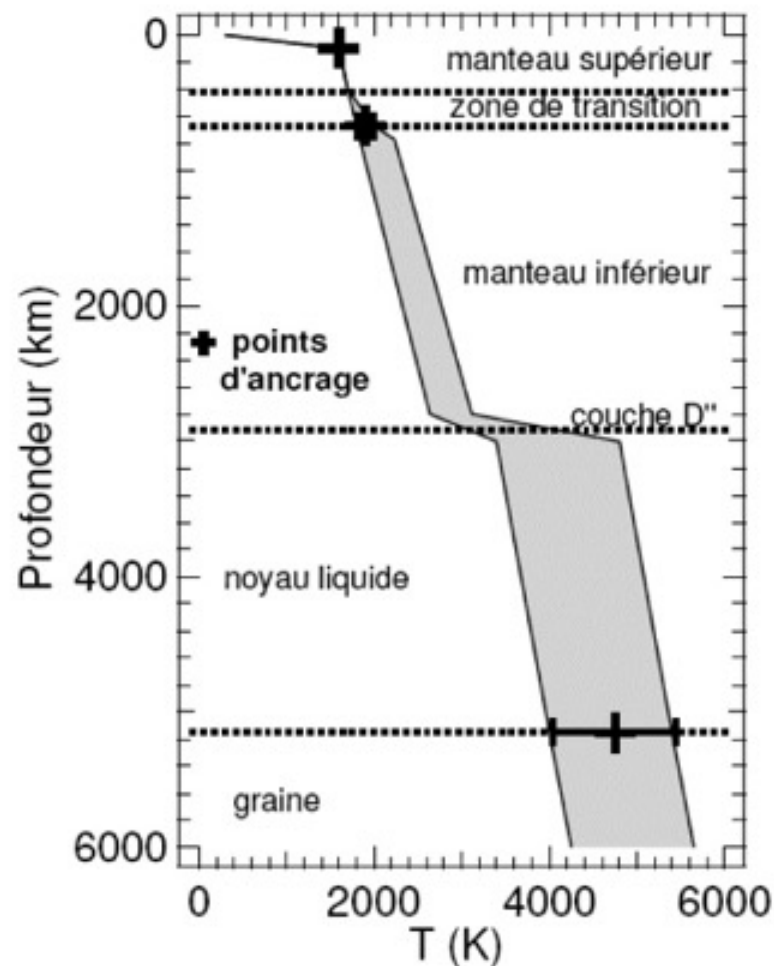
- Gradient superficiel mesuré dans les mines et forages
- + Données tirées des enclaves mantelliques
- Température au niveau de la transition ringwoodite/perovskite

## Points d'ancrage

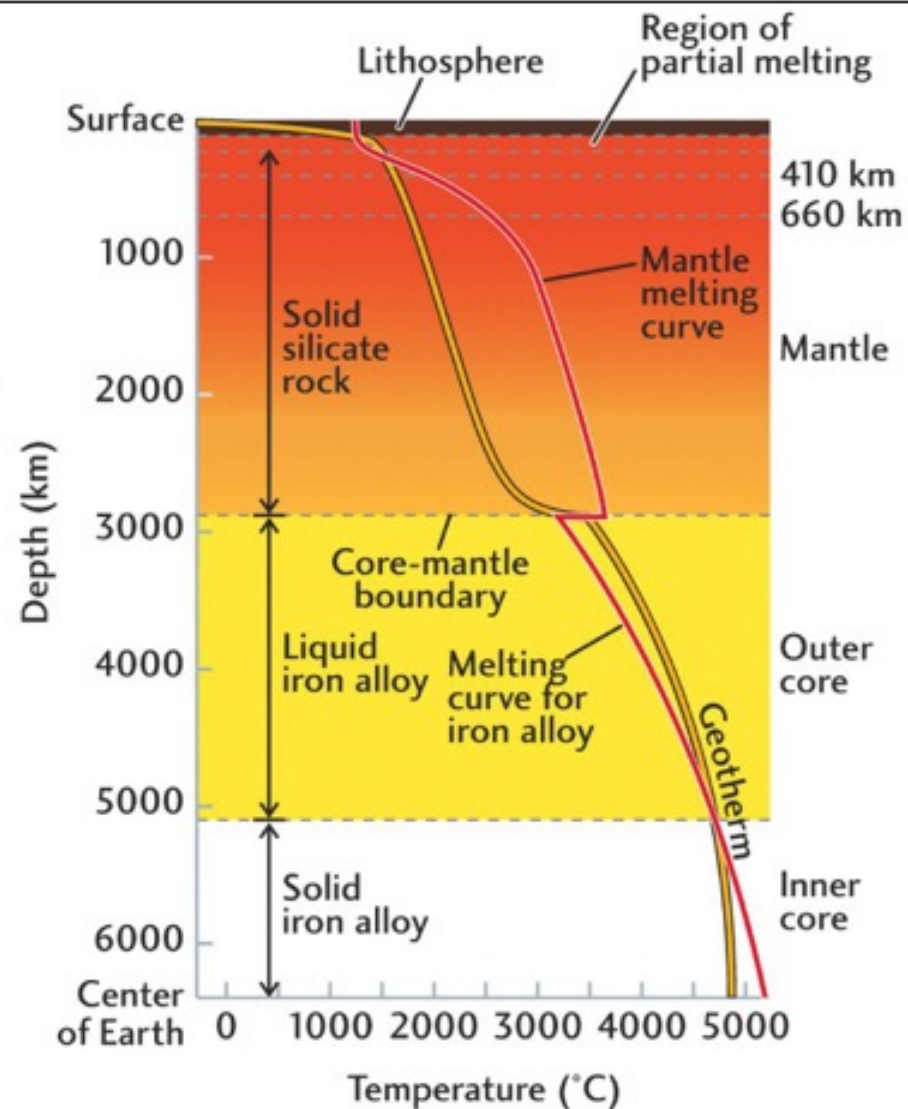
- enclaves de péridotites : 70 km,  $1000^{\circ}\text{C}$
- base lithosphère : 100 km,  $1300^{\circ}\text{C}$
- transition spinelle-pérovskite :  
670 km,  $1600^{\circ}\text{C} \pm 100^{\circ}\text{C}$
- limite noyau-graine :  
5150 km,  $4500^{\circ}\text{C} \pm 1000^{\circ}\text{C}$
- gradient adiabatique



# Le géotherme en profondeur

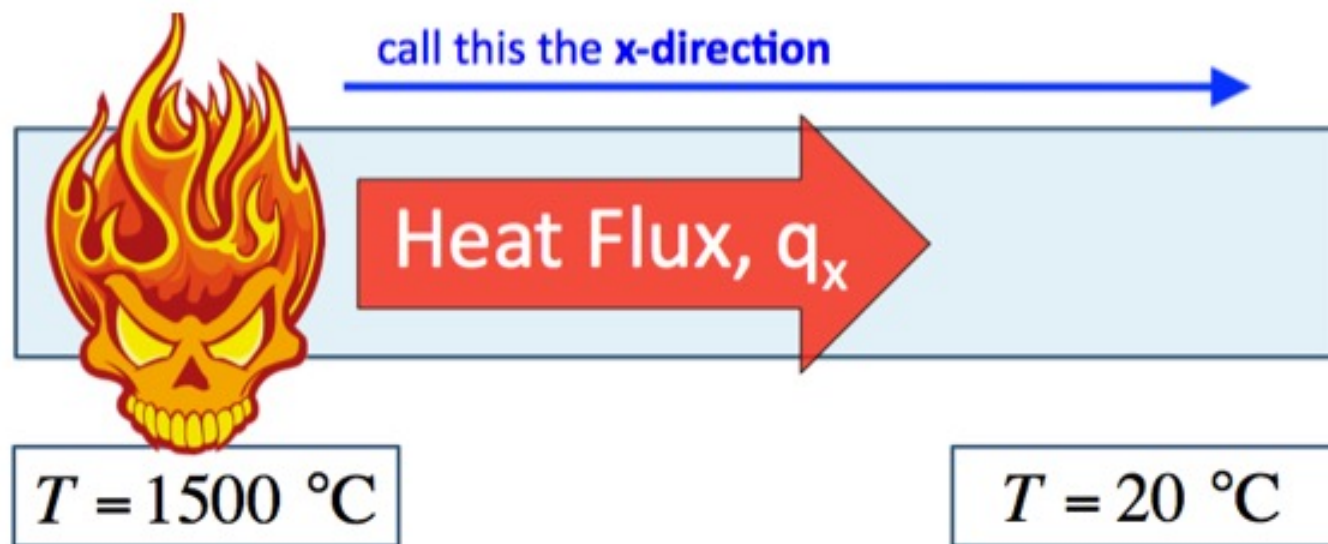


Géotherme calculé à partir de 3 points d'ancrage et du gradient adiabatique



Géotherme et solidus (fusion partielle) dans la Terre

## 1.2. Flux de chaleur

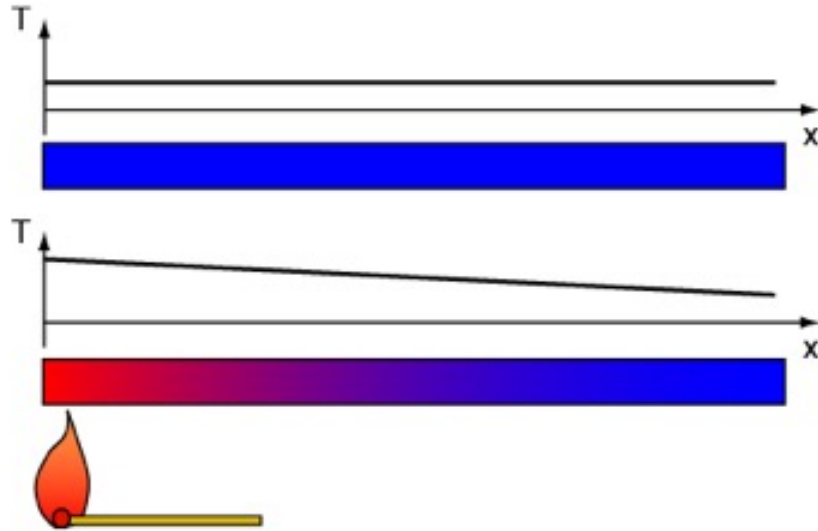


$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$

BO : « Un flux thermique atteint la surface en provenance des profondeurs de la Terre. »  
Le flux thermique est proportionnel à la pente du géotherme.



## 1.2. Flux de chaleur



➤ Transfert de chaleur du chaud vers le froid

➤ Loi de Fourier :

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

T en K

q en W/m<sup>2</sup>

➤ k : conductivité thermique

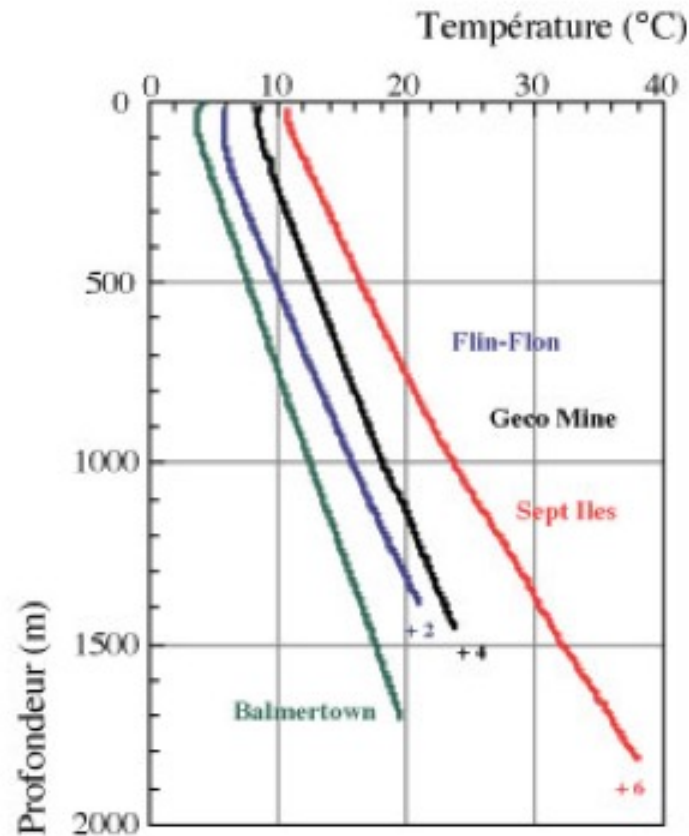
➤ Heat Flow Unit :

$$1 \text{ HFU} = 1 \mu\text{cal cm}^{-2}\text{s}^{-1} = 41.8 \text{ mW m}^{-2}$$

BO : « Un flux thermique atteint la surface en provenance des profondeurs de la Terre. »  
Le flux thermique est proportionnel à la pente du géotherme.

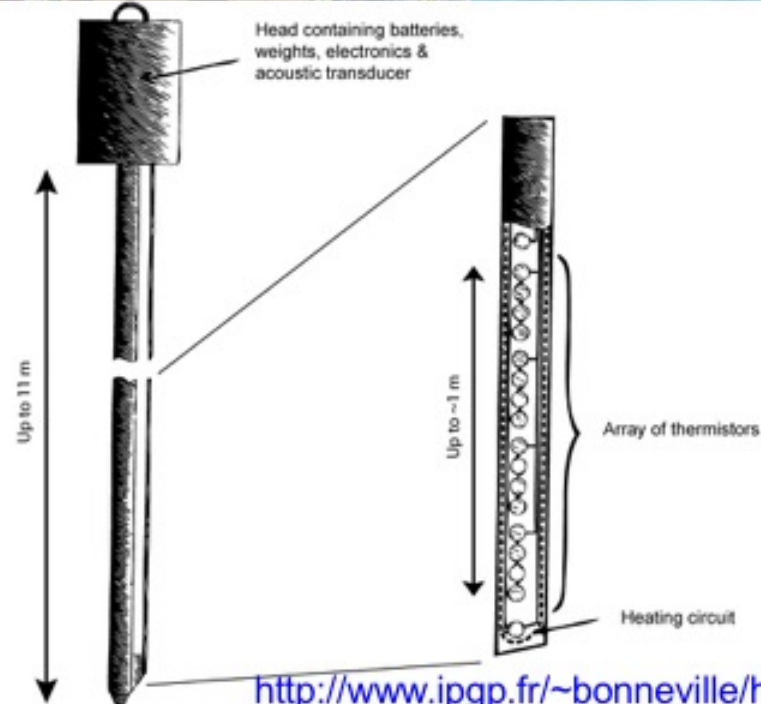
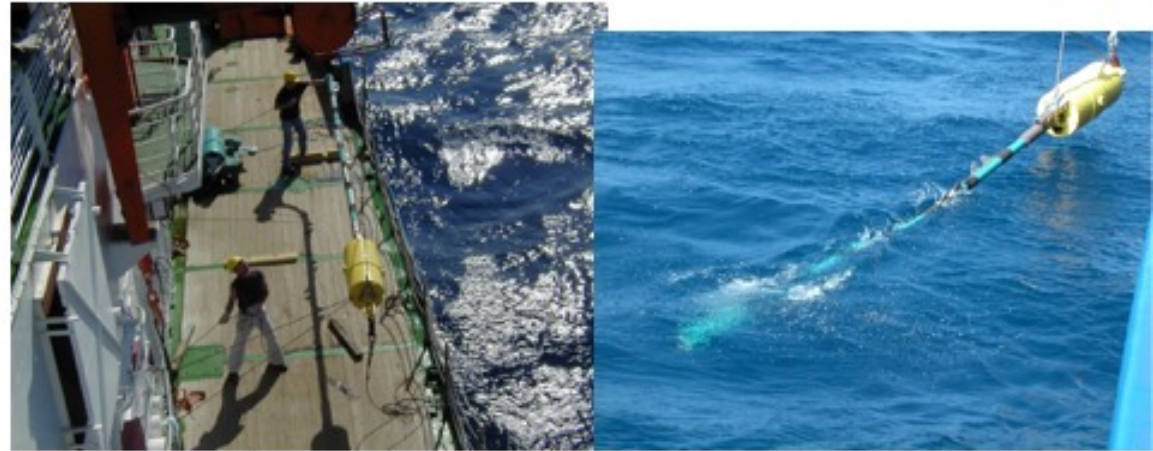
# Mesure du flux géothermique

Sur les continents



Profils de températures mesurées  
dans des forages profonds  
du bouclier canadien ( $\sim 12^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )

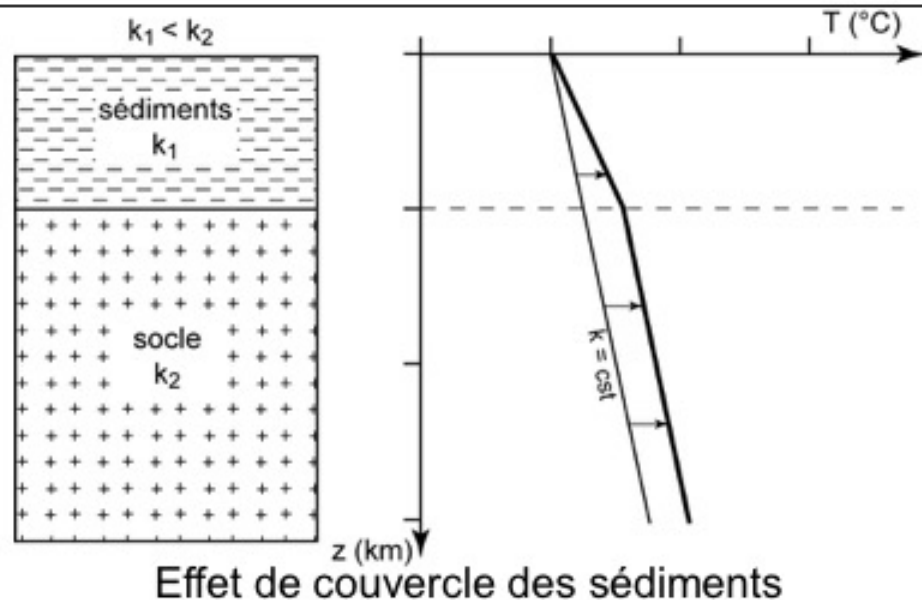
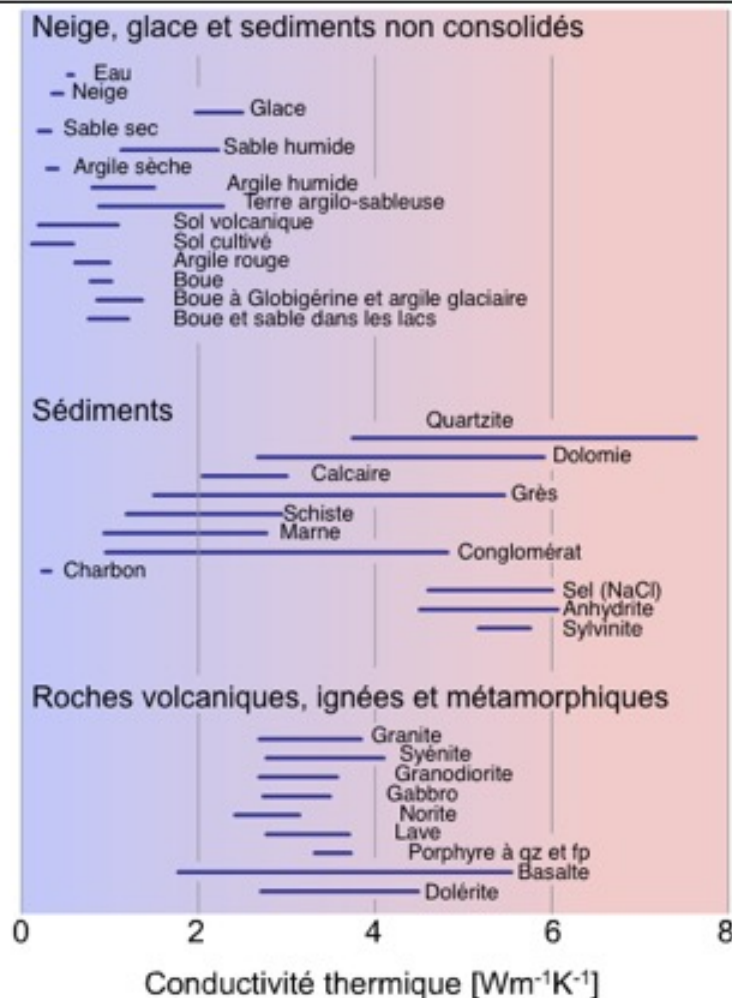
Dans les océans



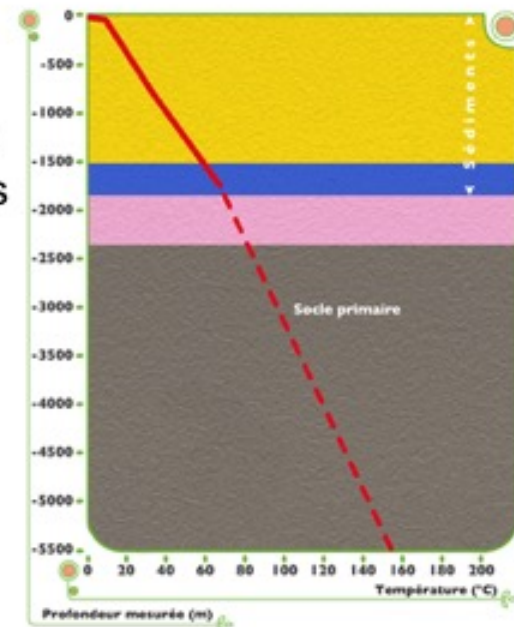
<http://www.ipgp.fr/~bonneville/heat-flow3.html>



# Conductivité thermique



## Géotherme du Bassin de Paris

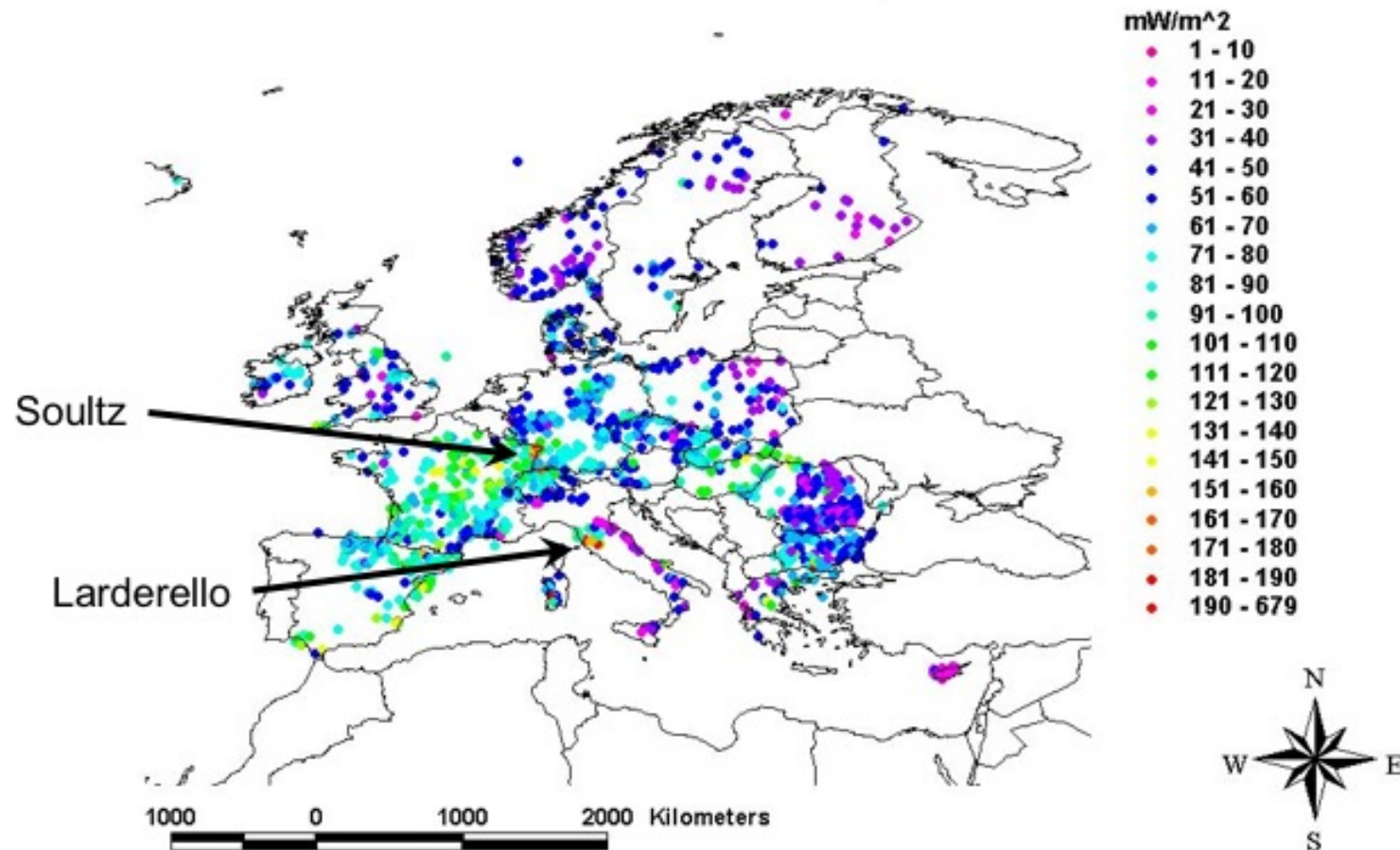


- sédiments :  $\sim 2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- socle :  $\sim 3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- lithosphère continentale :  $\sim 2,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- péridotites :  $3,8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- $k$  diminue quand porosité augmente

# Flux géothermique sur les continents

THE GLOBAL HEAT FLOW DATABASE : <http://www.heatflow.und.edu/index2.html>

## Europe



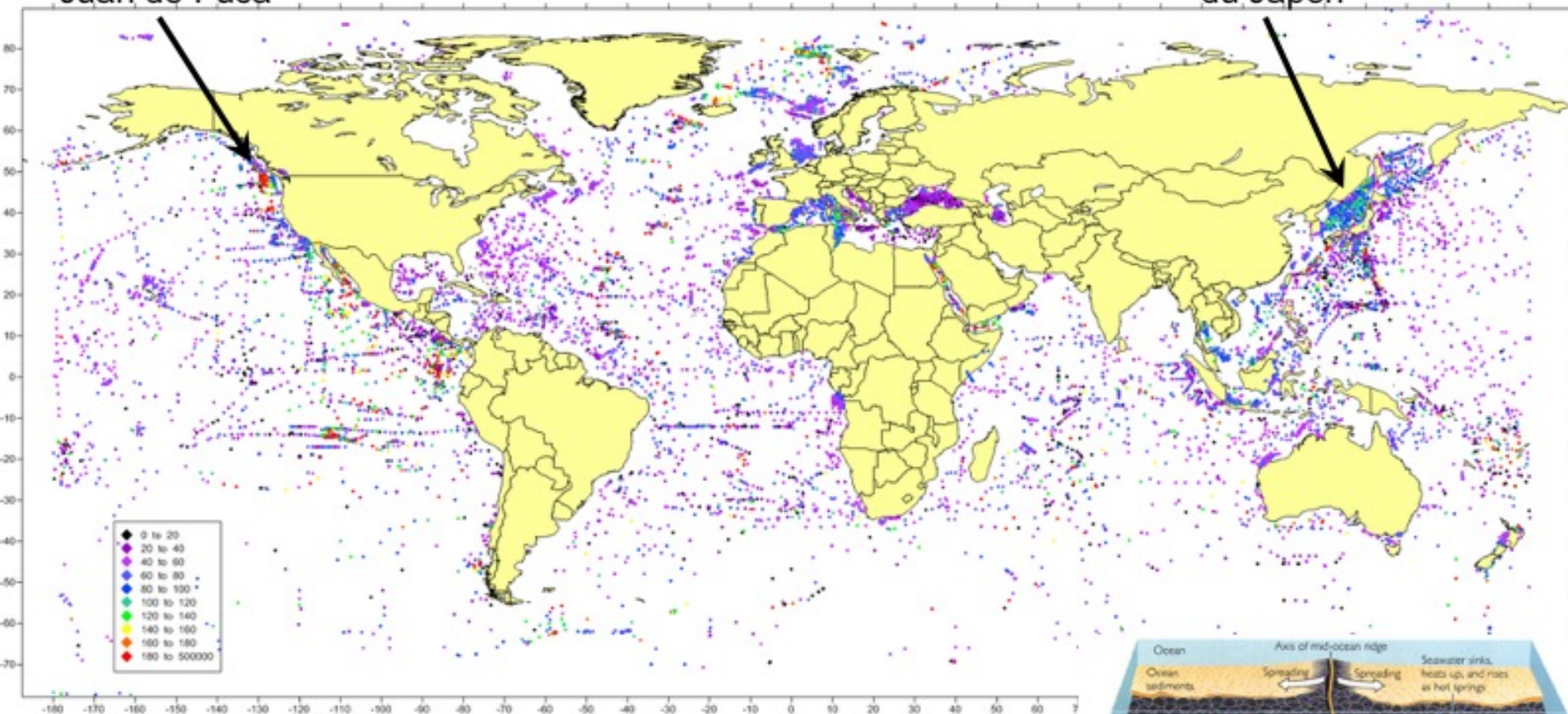
- 35.523 mesures de flux de chaleur (janvier 2011)
- flux moyen sur les continents :  **$65 \pm 1,6 \text{ mW.m}^{-2}$**
- $\sim 1500 \text{ m}^2$  pour allumer une ampoule de 100 watts (1/3 terrain de foot)



# Flux géothermique dans les océans

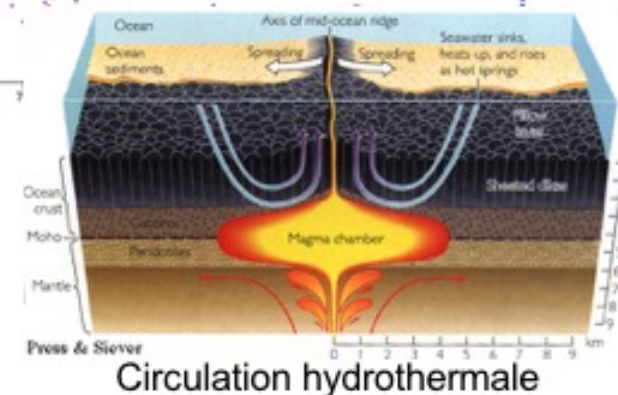
Dorsale  
Juan de Fuca

Mer  
du Japon



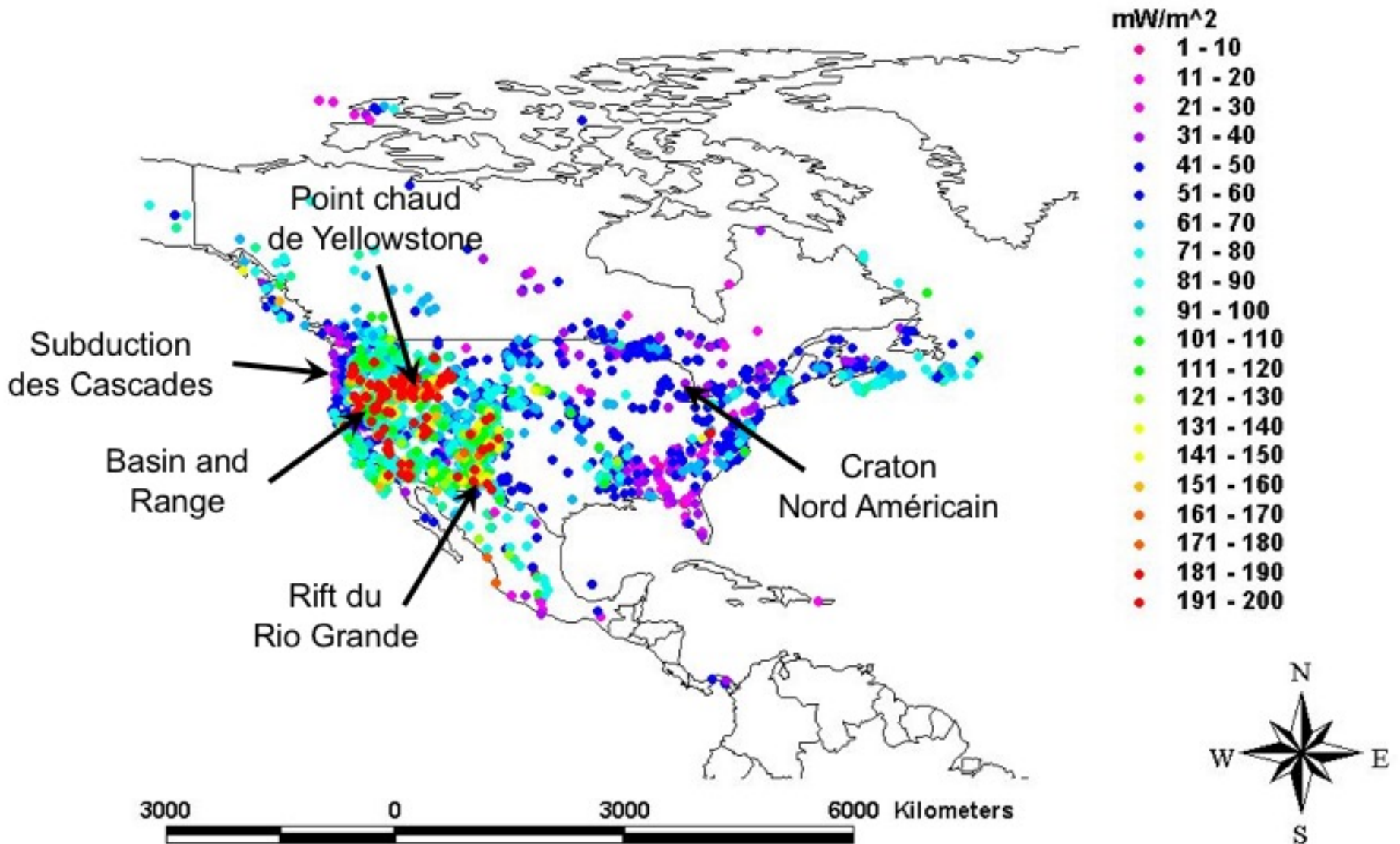
- 23.013 mesures de flux de chaleur
- flux moyen mesuré dans les océans :  $\sim 67 \text{ mW.m}^{-2}$
- flux évacué par hydrothermalisme :  $\sim 33 \text{ mW.m}^{-2}$
- flux moyen dans les océans :  **$101 \pm 2,2 \text{ mW.m}^{-2}$**

(Pollack et al., Review of Geophysics, 1993)



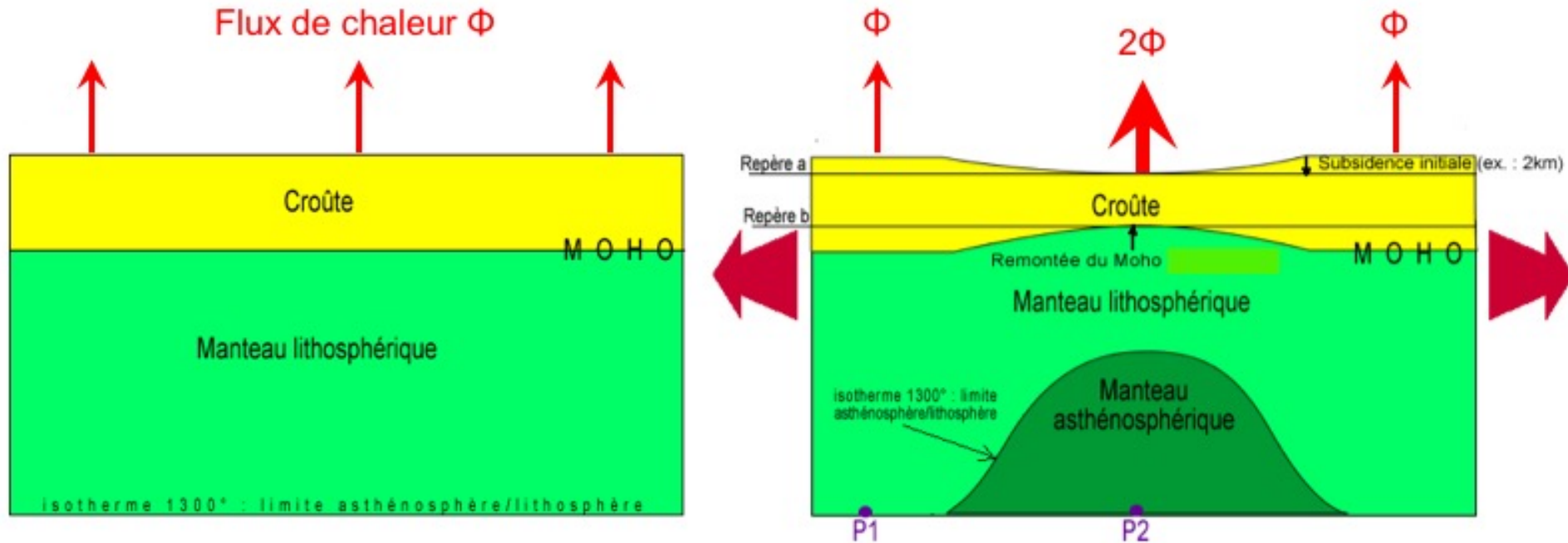
# 1.3. Flux géothermique et contexte géodynamique

## North America





# Contexte de rifting continental



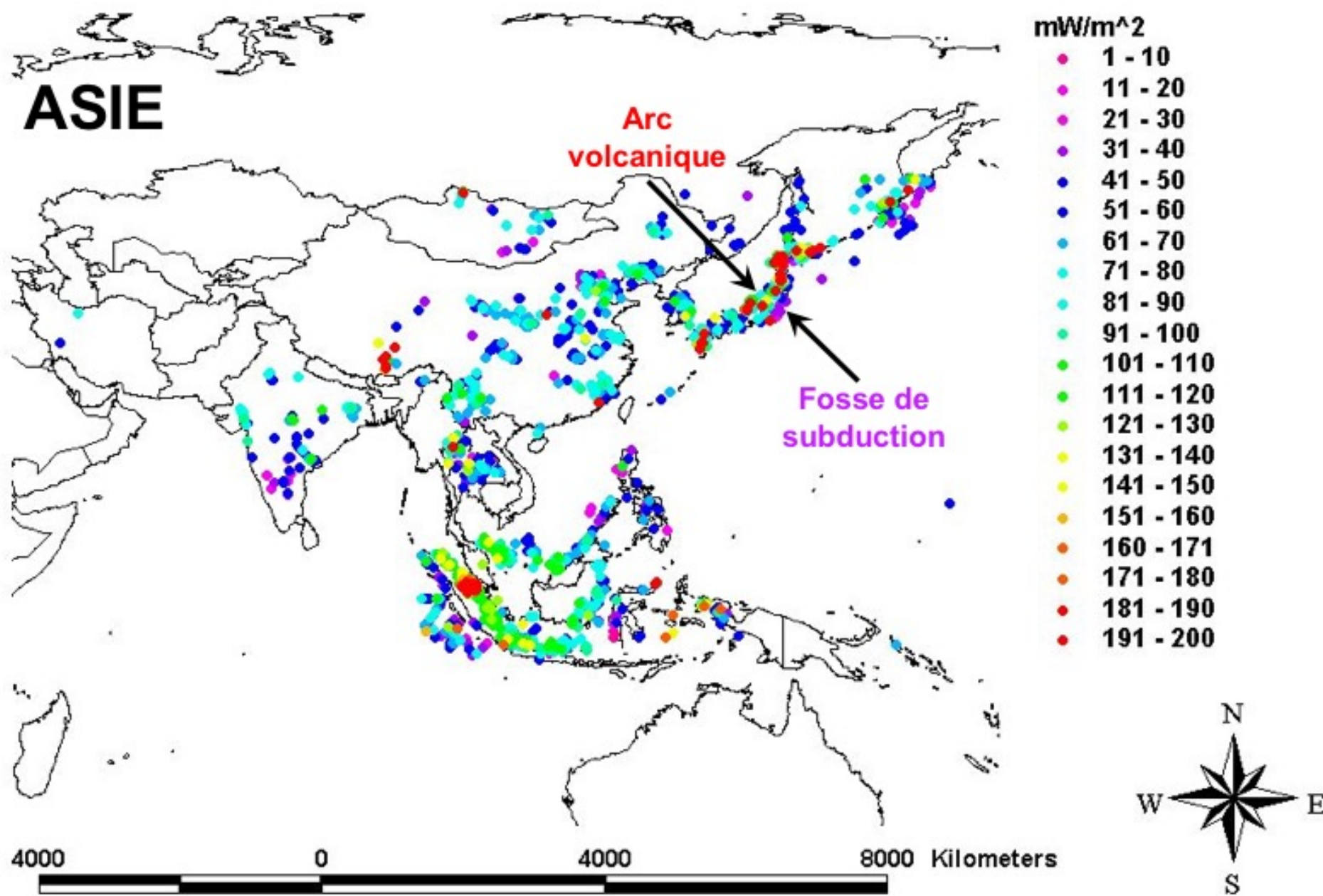
## Etat initial

- lithosphère à l'équilibre thermique
- base lithosphère : isotherme 1300°C

## Rifting

- étirement de la lithosphère
- amincissement homogène : épaisseur /2
- remontée des isothermes
- gradient thermique x2
- **le flux de chaleur double dans le rift**

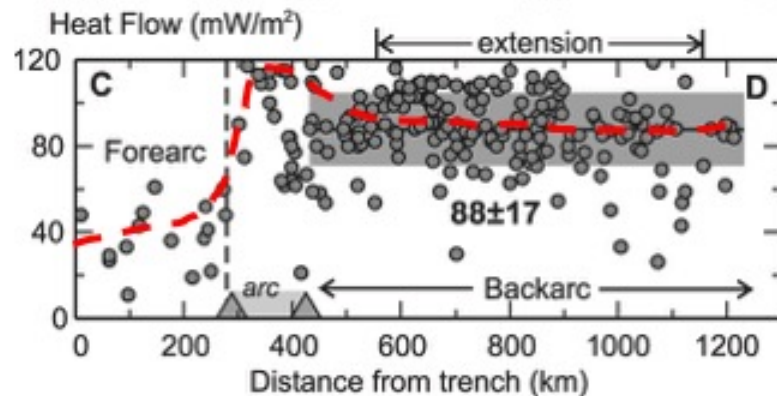
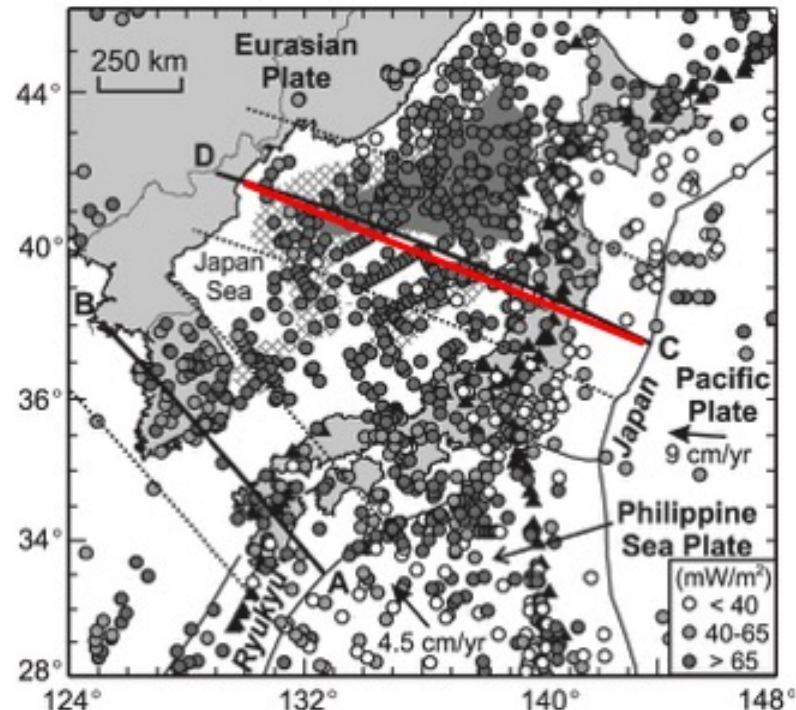
# Flux géothermique et contexte géodynamique



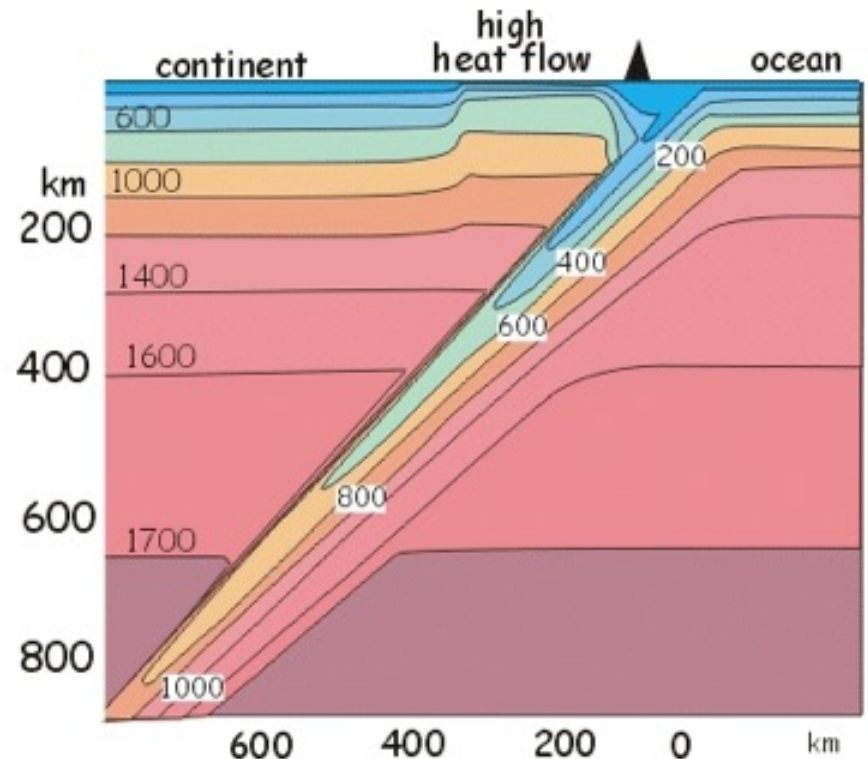


# Flux géothermique et contexte géodynamique

Fosse de subduction du Japon



Currie et Hyndman, JGR, 2006

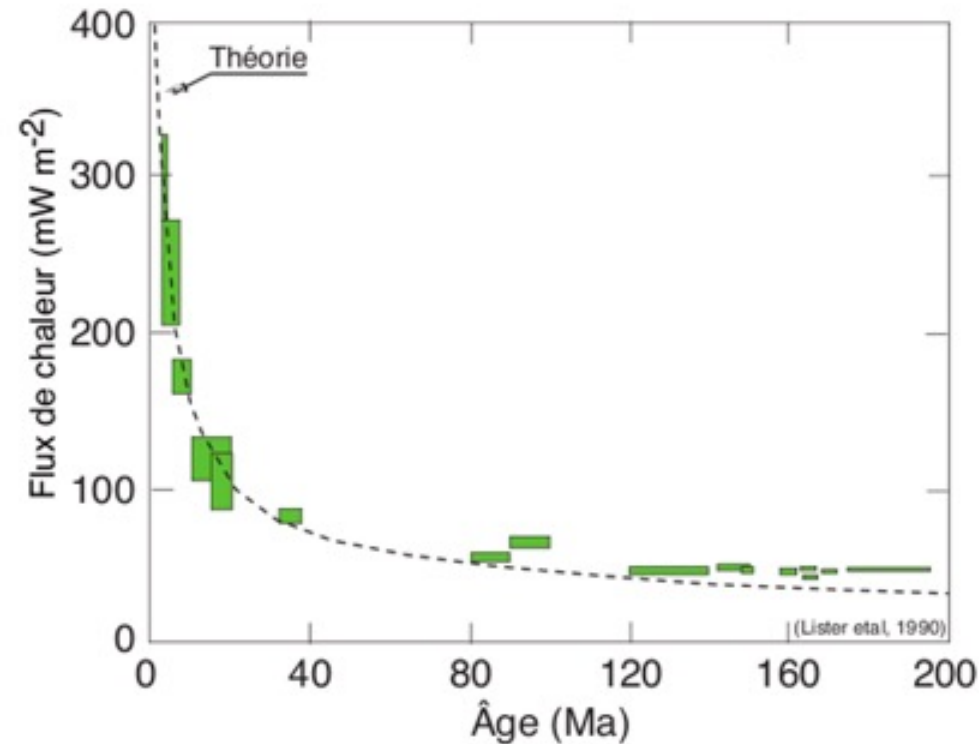


Structure thermique d'une zone de subduction

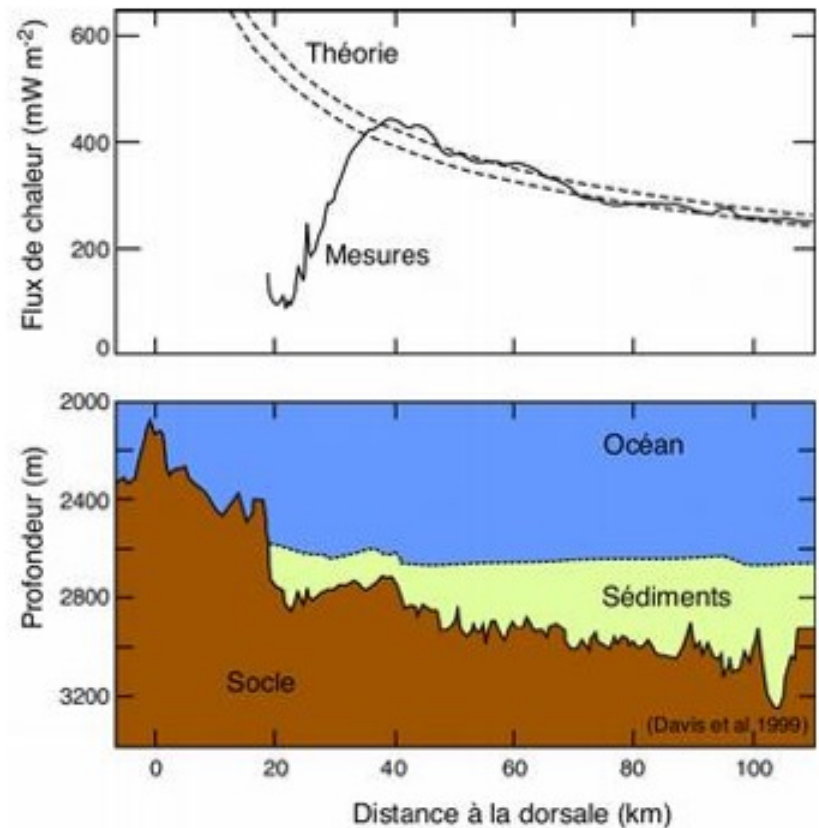
- fosse : flux = f (âge lithosphère plongeante)
- avant-arc : flux faible, matériel froid en subduction
- arc volcanique : flux localement très fort
- bassin arrière-arc : flux élevé

# Flux géothermique et contexte géodynamique

## Flux géothermique dans les océans



Compilation des données  
de flux de chaleur océanique  
en fonction de l'âge de la croûte



Flux de chaleur sur le flanc Est  
de la dorsale Juan de Fuca (Pacifique Nord)

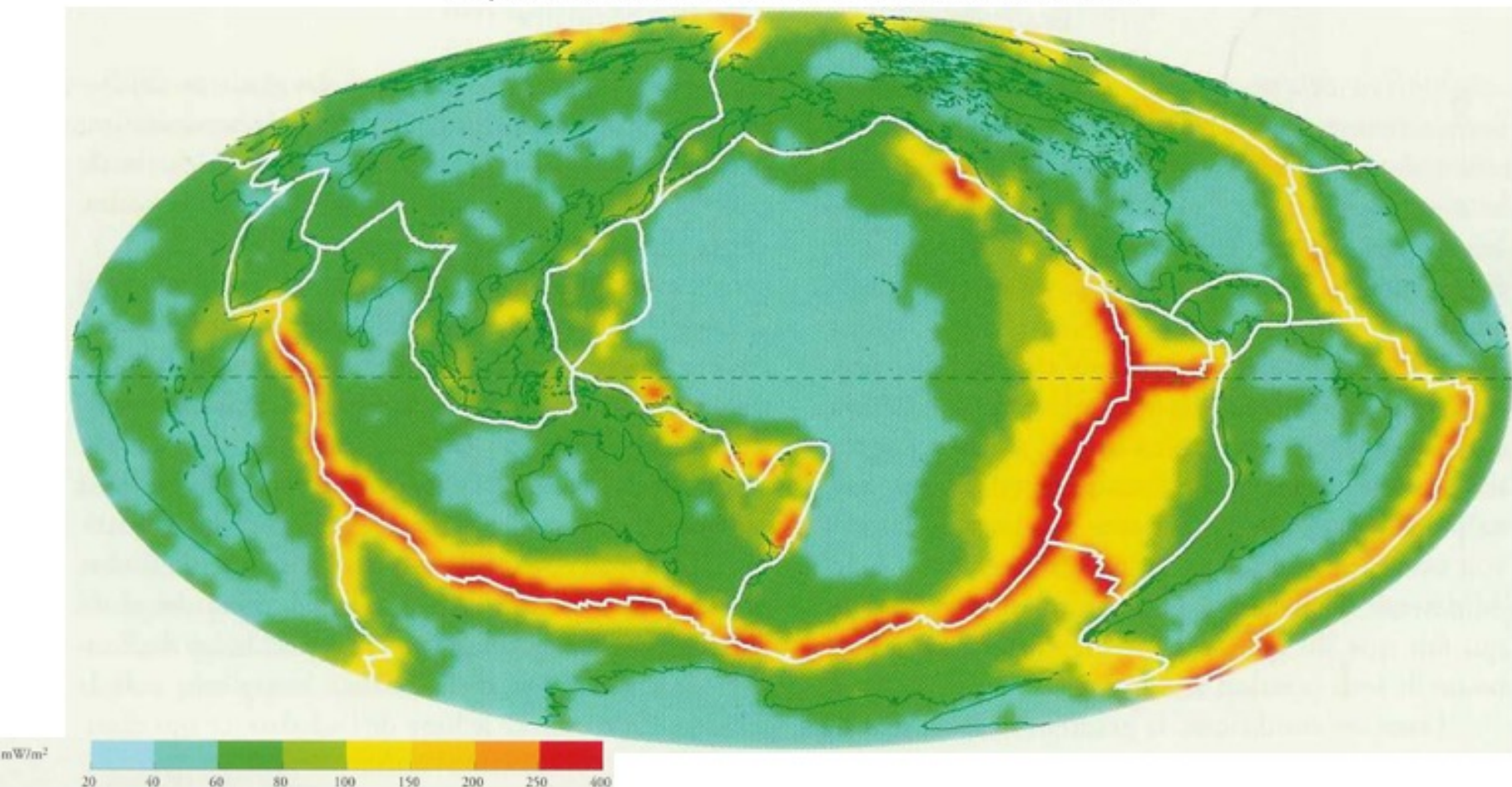
Chaque boîte représente la variabilité des données  
dans la tranche d'âge considérée.



# Flux géothermique et contexte géodynamique

## Carte globale du flux géothermique en surface

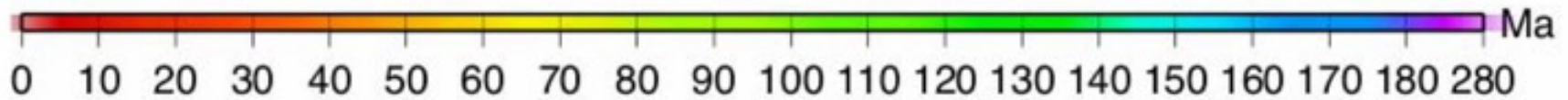
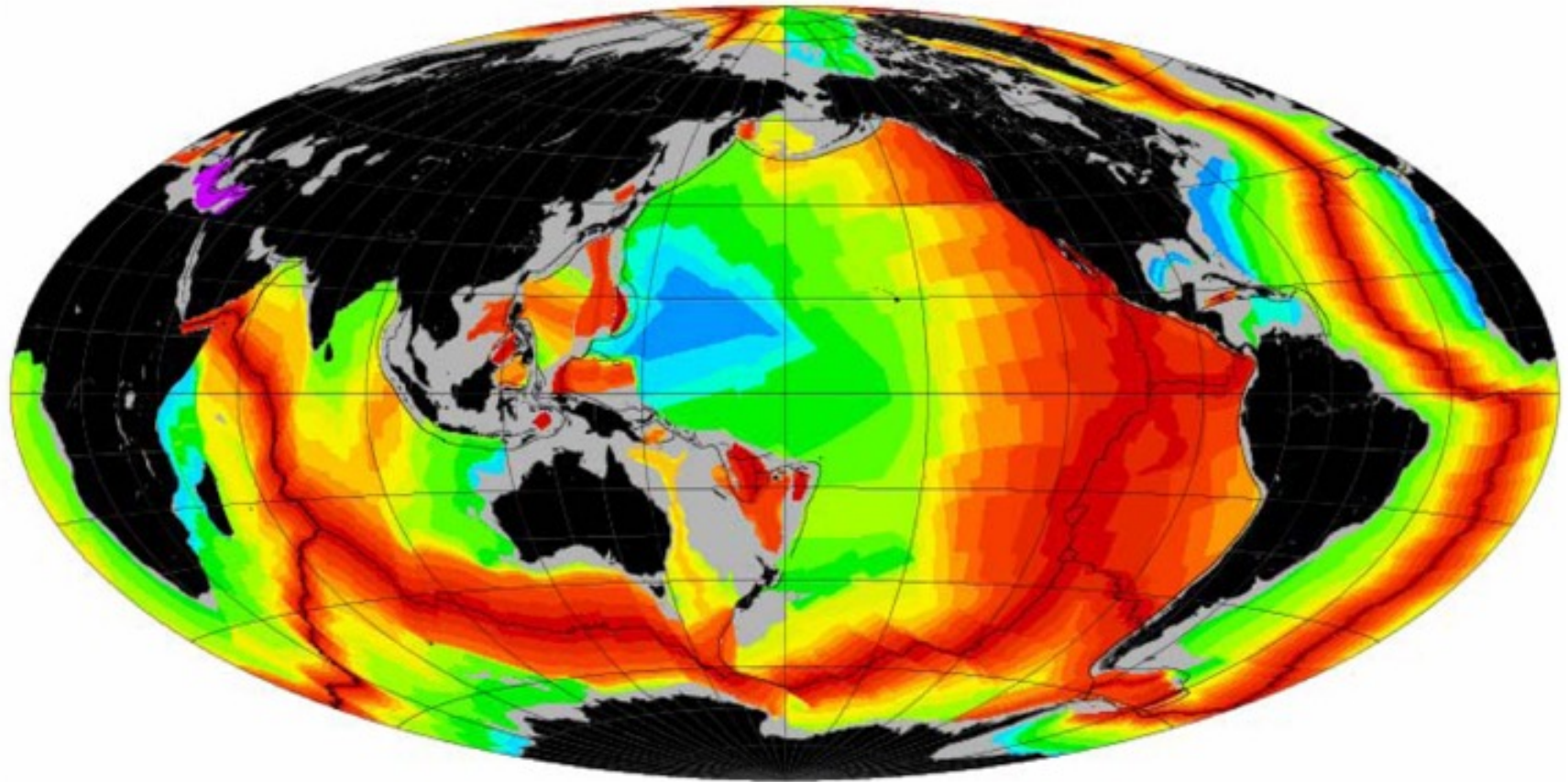
D'après Pollack et al., 1993 dans Nataf et Sommeria, 2000



- continents froids, océans chauds surtout aux dorsales
- des dorsales plus chaudes (rapides)
- dans les océans le flux décroît en s'éloignant de l'axe de la dorsale
- flux fort associé au volcanisme des zones de subduction

# Flux géothermique et contexte géodynamique

Carte globale de l'âge du plancher océanique

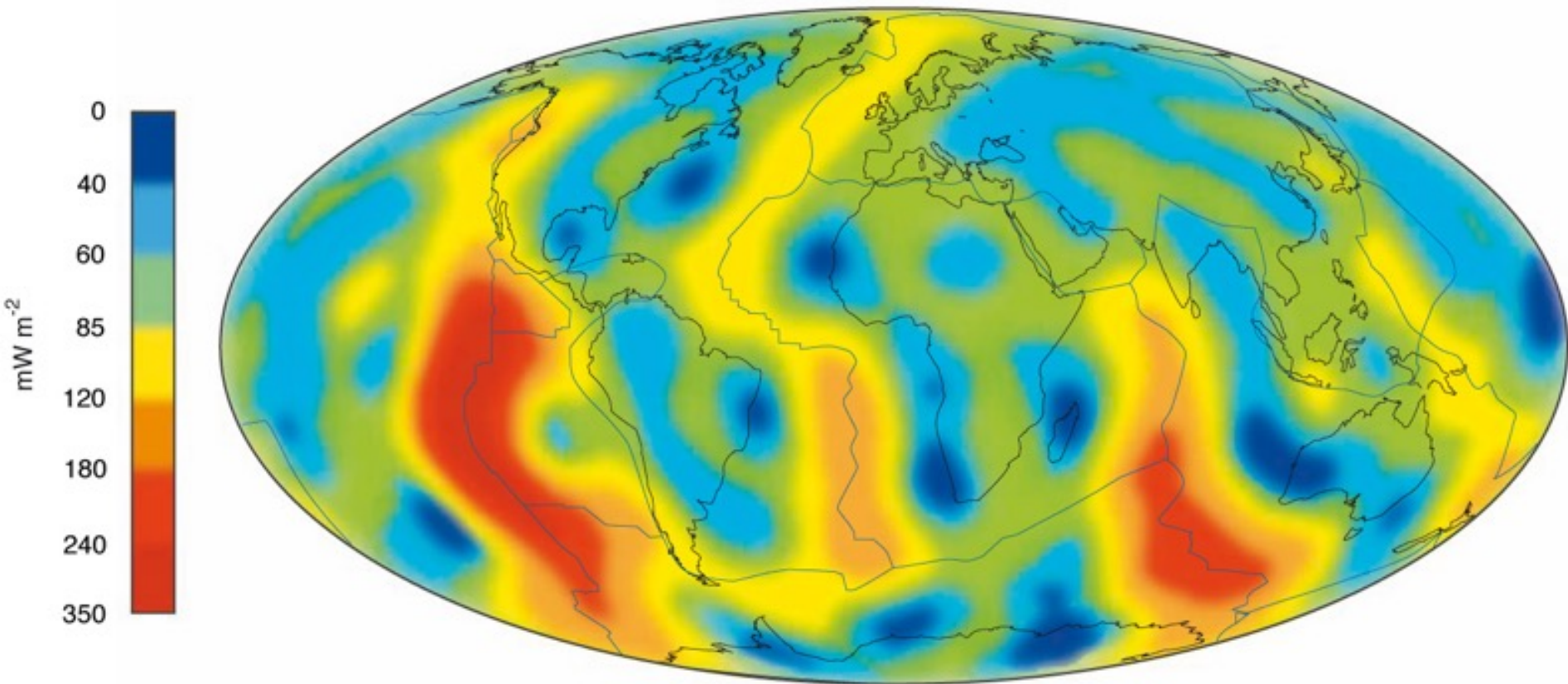




# Flux géothermique et contexte géodynamique

Carte globale du flux géothermique en surface

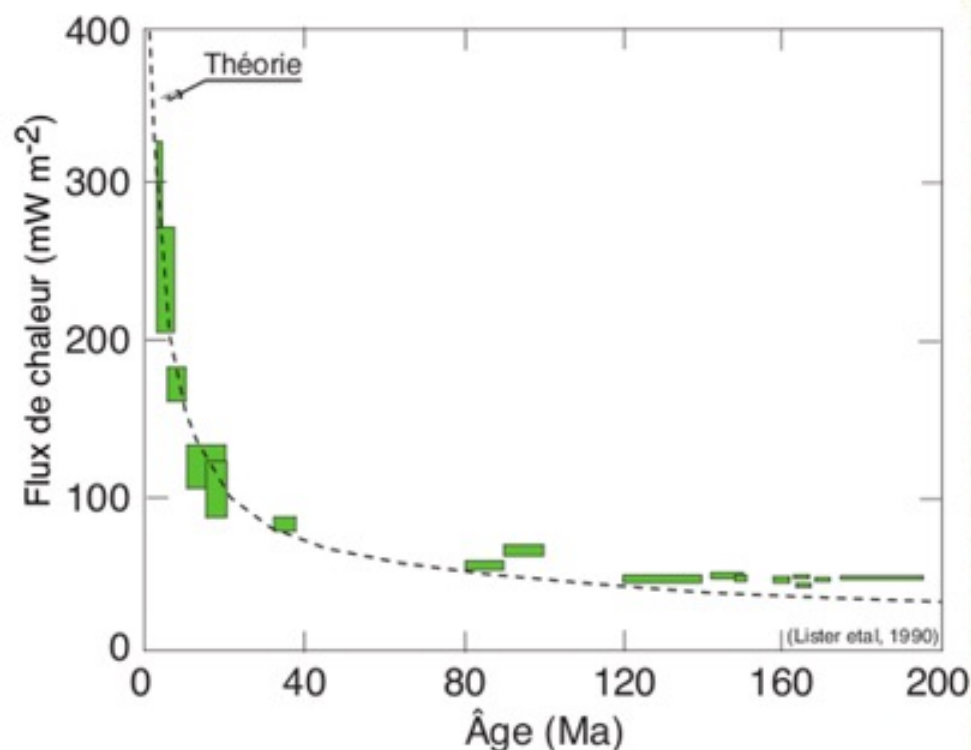
Pollack et al., 1993



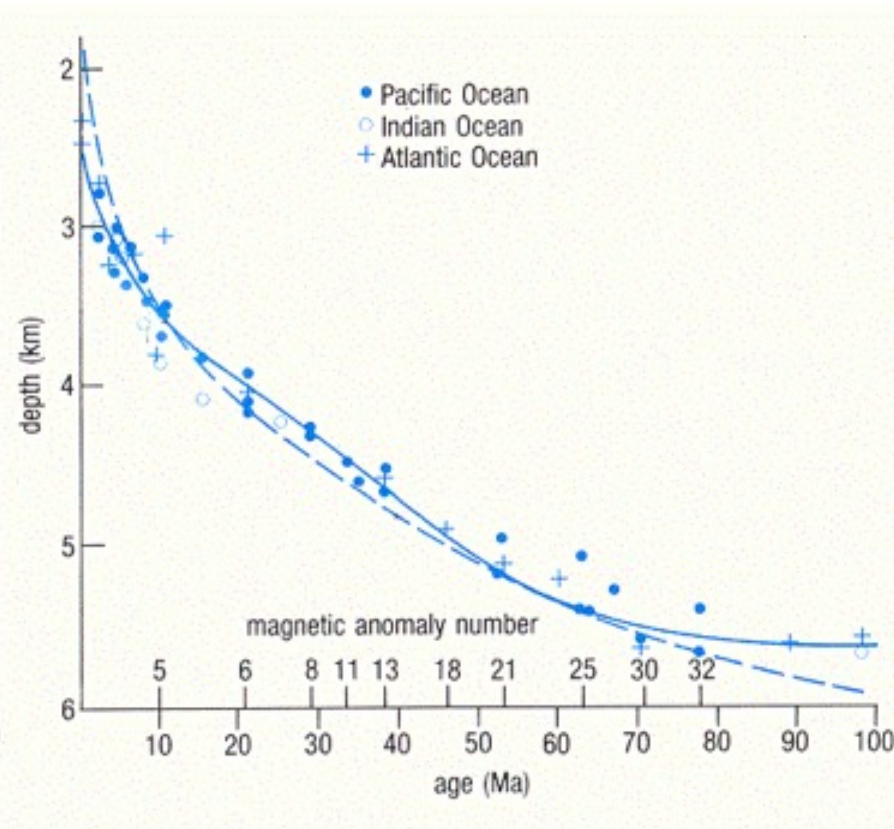
# Flux géothermique et contexte géodynamique

## Flux géothermique dans les océans

La relation âge-flux de chaleur



La relation âge-profondeur



**Compilation des données de flux chaleur océanique et de profondeur en fonction de l'âge de la croûte**

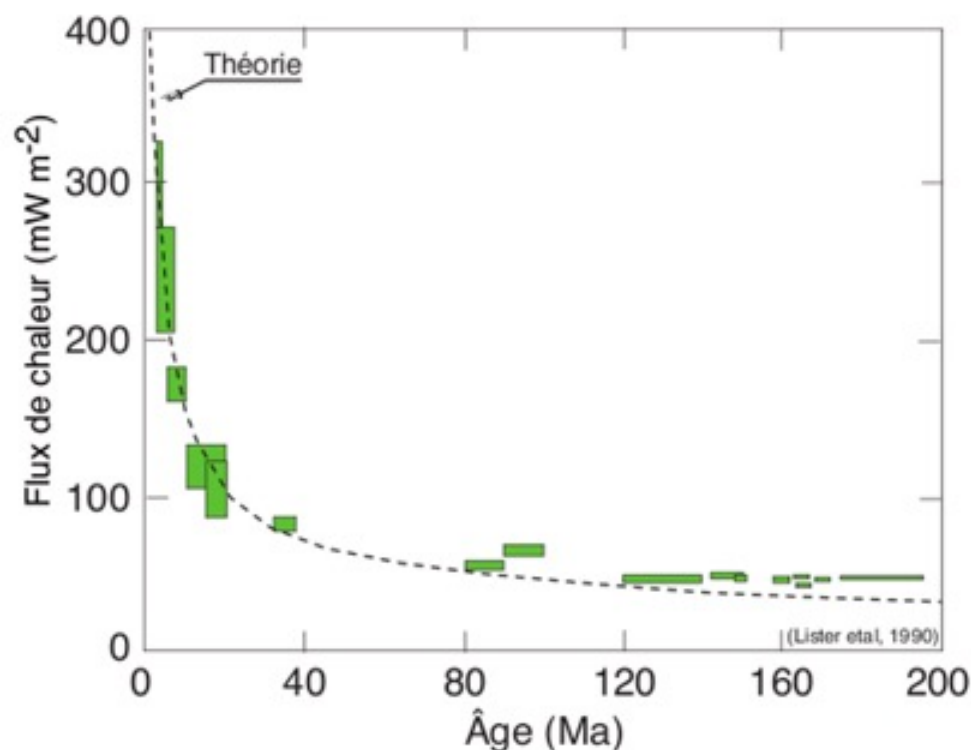
Pointillé : courbe théorique basée sur les modèles thermiques de refroidissement de la croûte océanique  
Trait plein : meilleur fit des données



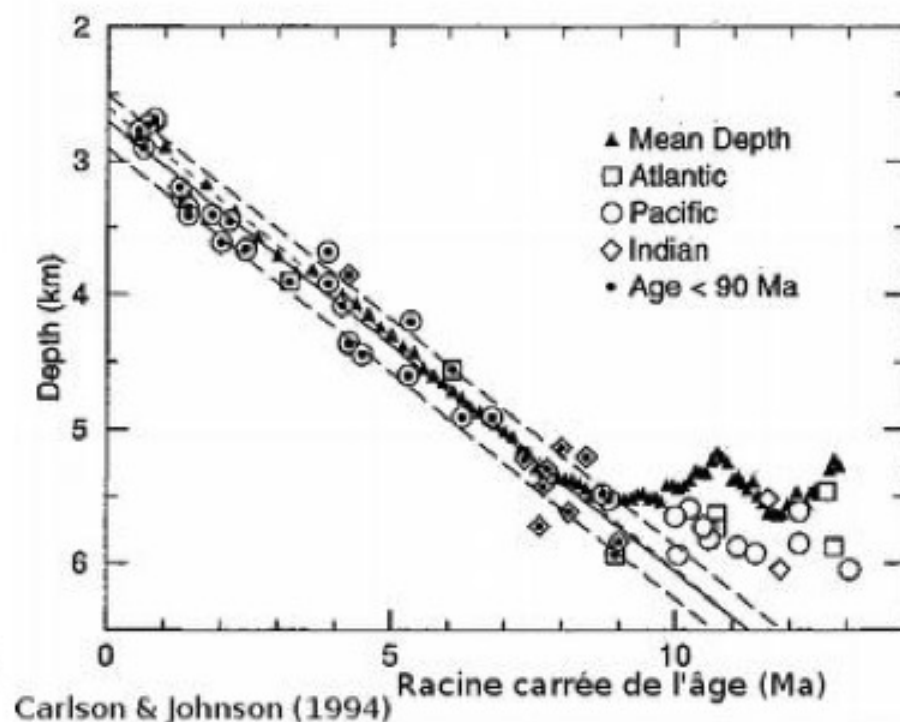
# Flux géothermique et contexte géodynamique

## Flux géothermique dans les océans

### La relation âge-flux de chaleur



### La relation âge-profondeur

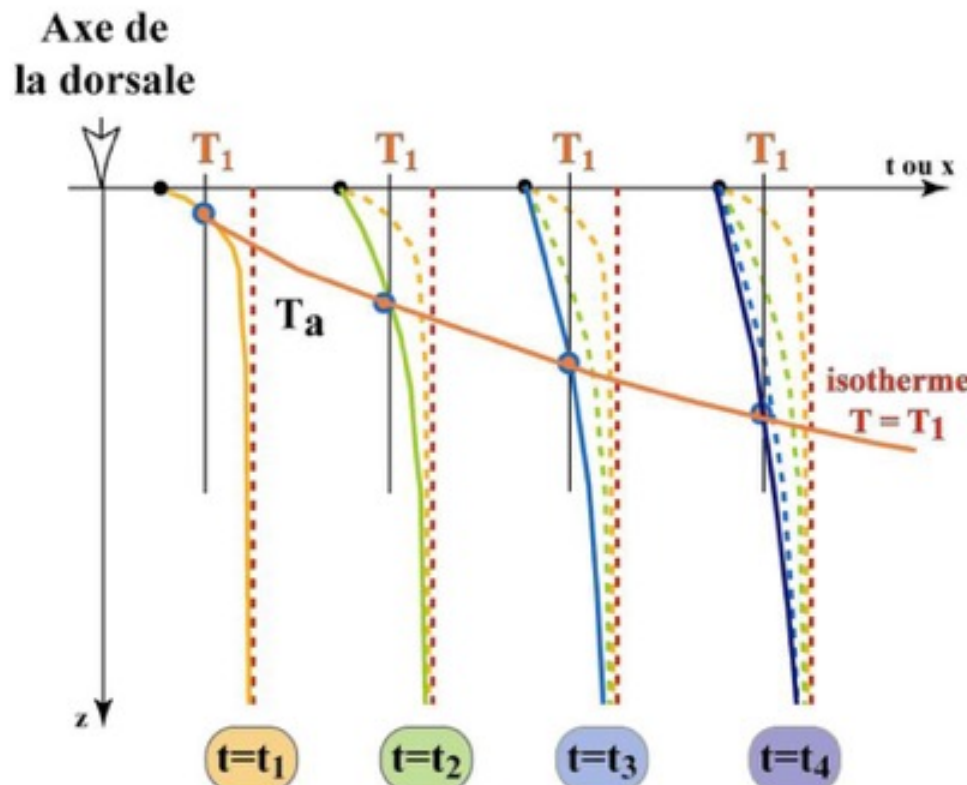
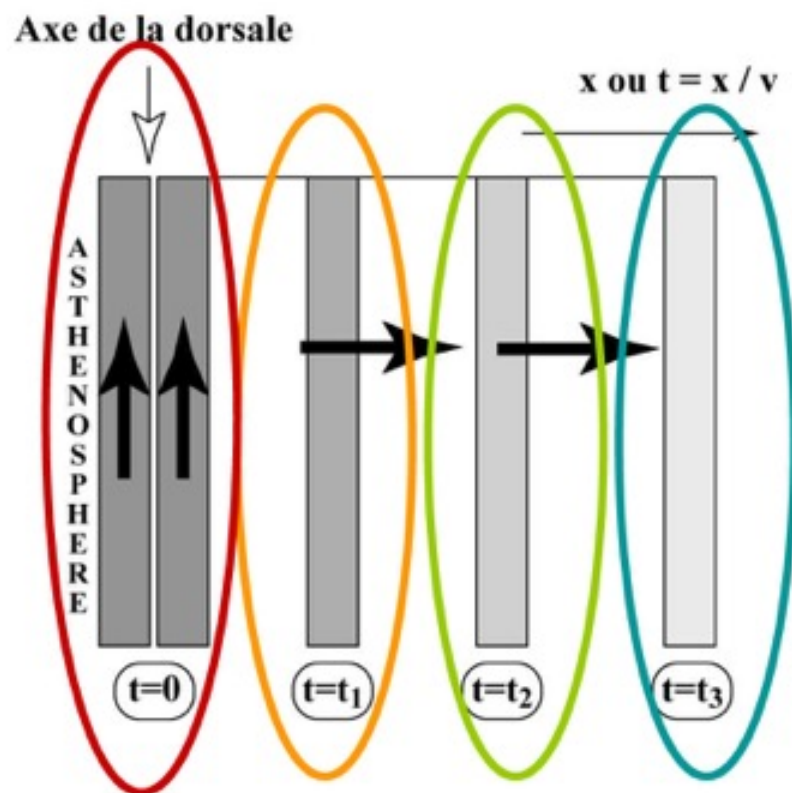


## Compilation des données de flux chaleur océanique et de profondeur en fonction de l'âge de la croûte

Pointillé : courbe théorique basée sur les modèles thermiques de refroidissement de la croûte océanique  
Trait plein : meilleur fit des données

# Flux géothermique et contexte géodynamique

## Flux géothermique dans les océans



## Modèle thermique de lithosphère océanique

- une colonne d'asthénosphère monte très rapidement (remontée adiabatique) à l'axe de la dorsale
- elle s'écarte à demi-vitesse d'expansion
- elle se refroidit par la surface (la température du fond des océans étant très constante entre 0 et 2°C)
- la lithosphère s'épaissit et subside

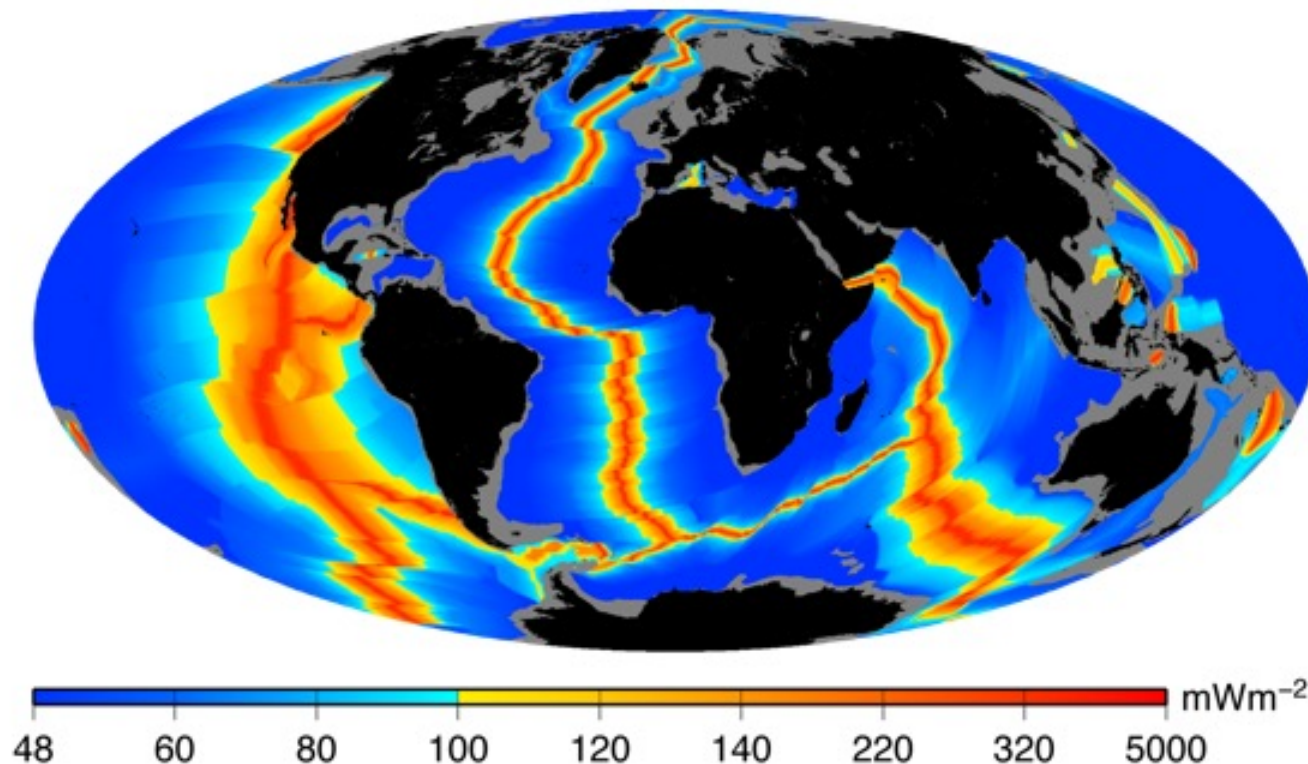


# Flux géothermique et contexte géodynamique

Flux géothermique dans les océans

Profondeur =  $cste \sqrt{\text{âge}}$

Flux de chaleur =  $cste / \sqrt{\text{âge}}$

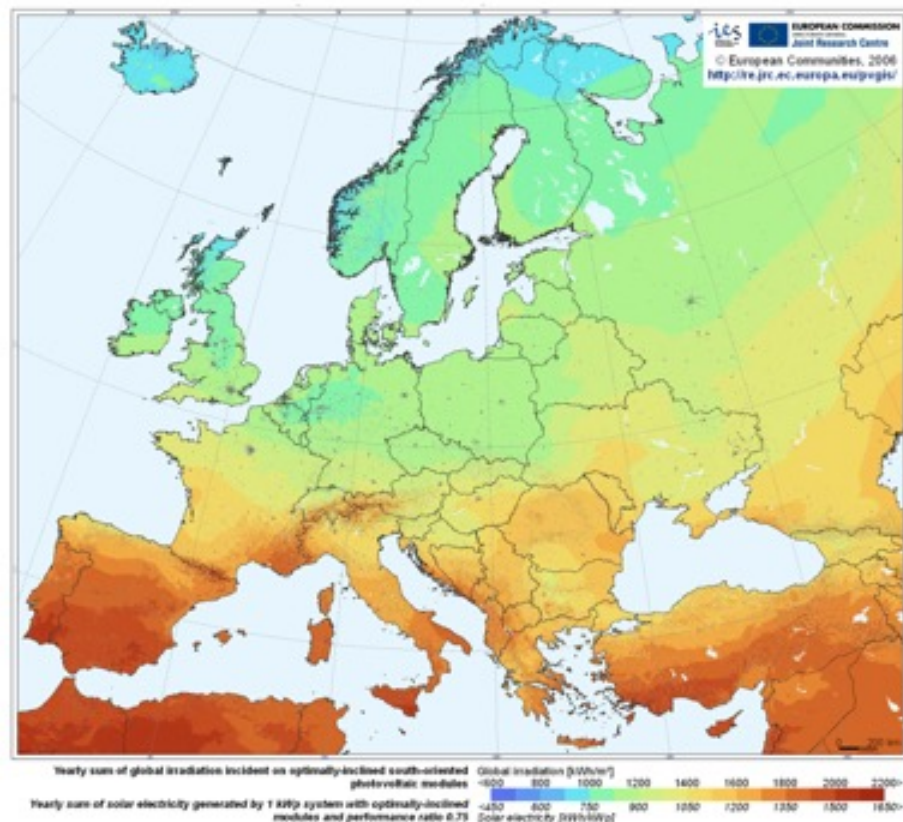


Flux de chaleur théorique calculé à partir de l'âge du plancher océanique

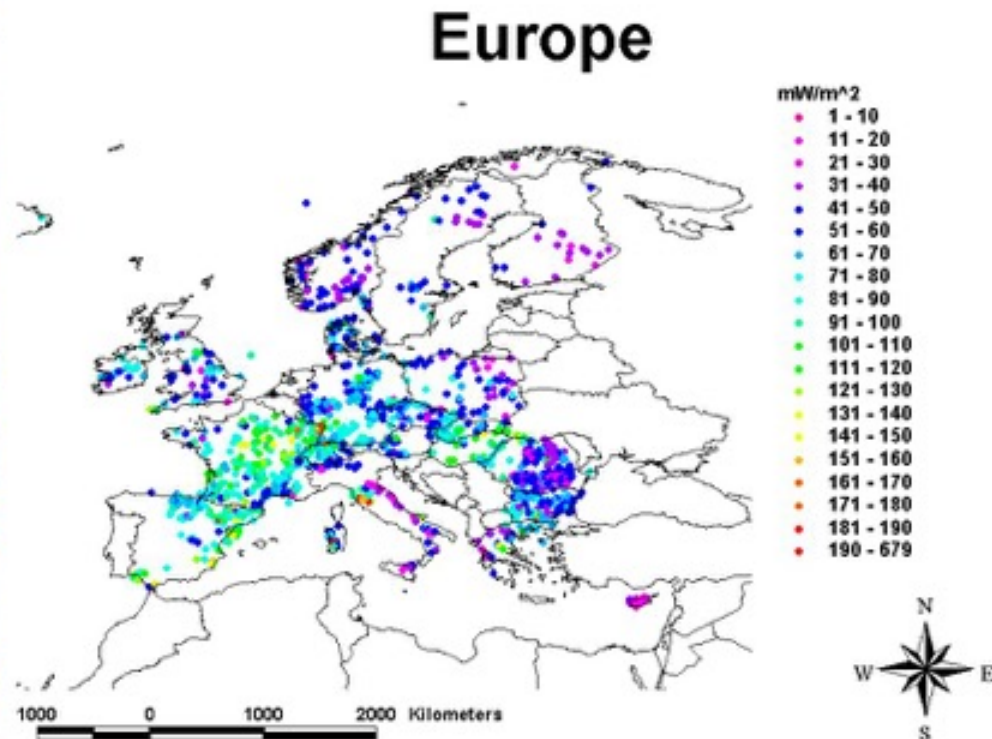
# 1.4. Bilan : flux géothermique global

## Comparaison flux solaire/géothermique

- Flux moyen global (océans + continents) : **87 mW.m<sup>-2</sup>**
- Puissance totale dissipée à la surface de la Terre : **44 TW (10<sup>12</sup> W)**  
calcul du flux global =  $4\pi(6371 \cdot 10^3)^2 \times 87 \cdot 10^{-3} = 44,4 \cdot 10^{12} \text{ W}$
- Flux d'énergie solaire : **~340 W.m<sup>-2</sup>** (~4000 fois plus)



Irradiation solaire annuelle (kWh.m<sup>-2</sup>)  
moyennée sur 10 ans (1981-1990)



Flux géothermique (mW.m<sup>-2</sup>)



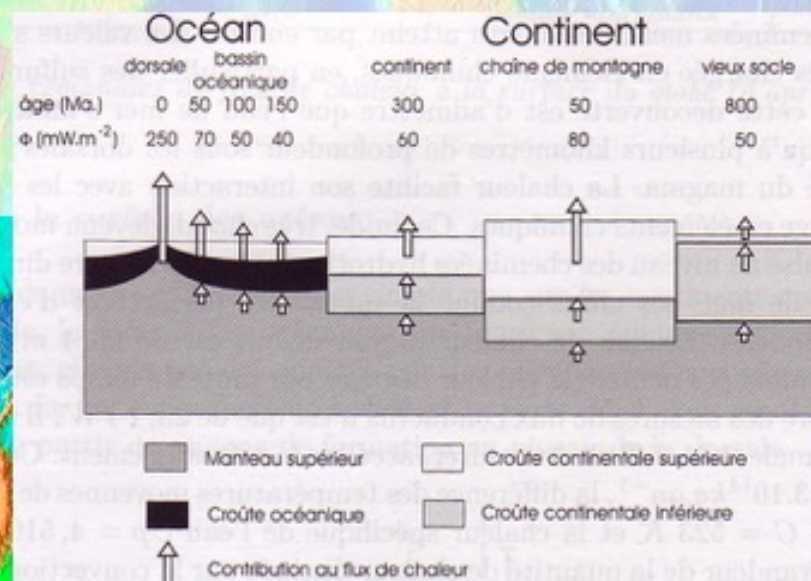
# Bilan : flux géothermique global

## Chaleur libérée par les océans et les continents

- Chaleur libérée par la croûte océanique (60% de la surface du globe)  
 $101.10^{-3} \times 4\pi \xi (6371.10^3)^2 \times 60\% = \mathbf{30,9 \text{ TW}}$
- Chaleur libérée par la croûte continentale (40% de la surface du globe)  
 $65.10^{-3} \times 4\pi \xi (6371.10^3)^2 \times 40\% = \mathbf{13,3 \text{ TW}}$

## Inégalité océans/continents

- Croûte océanique : **60%** de la surface du globe évacue **70%** de la chaleur
- Croûte continentale : **40%** de la surface du globe évacue **30%** de la chaleur
- Différence accentuée si on tient compte de la radioactivité dans la croûte continentale
- L'essentiel de la chaleur provenant du manteau est évacuée dans les océans par la formation de la lithosphère océanique aux dorsales et par son refroidissement
- Corollaire : plus la chaleur à évacuer est importante, plus le taux d'accrétion moyen est élevé
- D'où vient la chaleur ?
- Comment est-elle évacuée ?





# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

## Introduction

- Manifestations de la chaleur : volcanisme, hydrothermalisme...
- Exemples d'utilisation de la chaleur géothermique par l'Homme

## ➤ 1. La Terre libère de la chaleur

- 1.1. Mesures des températures en profondeur ⇒ géotherme, gradient géothermique
- 1.2. Mesures du flux de chaleur à la surface de la Terre
- 1.3. Flux de chaleur et contexte géodynamique
- 1.4. Bilan global

## ➤ 2. Exploitation de l'énergie géothermique

- 2.1. Géothermie basse température dans le bassin de Paris
- 2.2. Géothermie haute température à Soultz (Bouillante, Larderello,...)
- 2.3. Géothermie très basse température

## ➤ 3. La Terre produit de la chaleur par radioactivité

- 3.1. Découverte de la radioactivité
- 3.2. Les 4 radioéléments naturels producteurs de chaleur
- 3.3. Autres sources de chaleur

## ➤ 4. La dissipation de la chaleur est le moteur de la tectonique des plaques

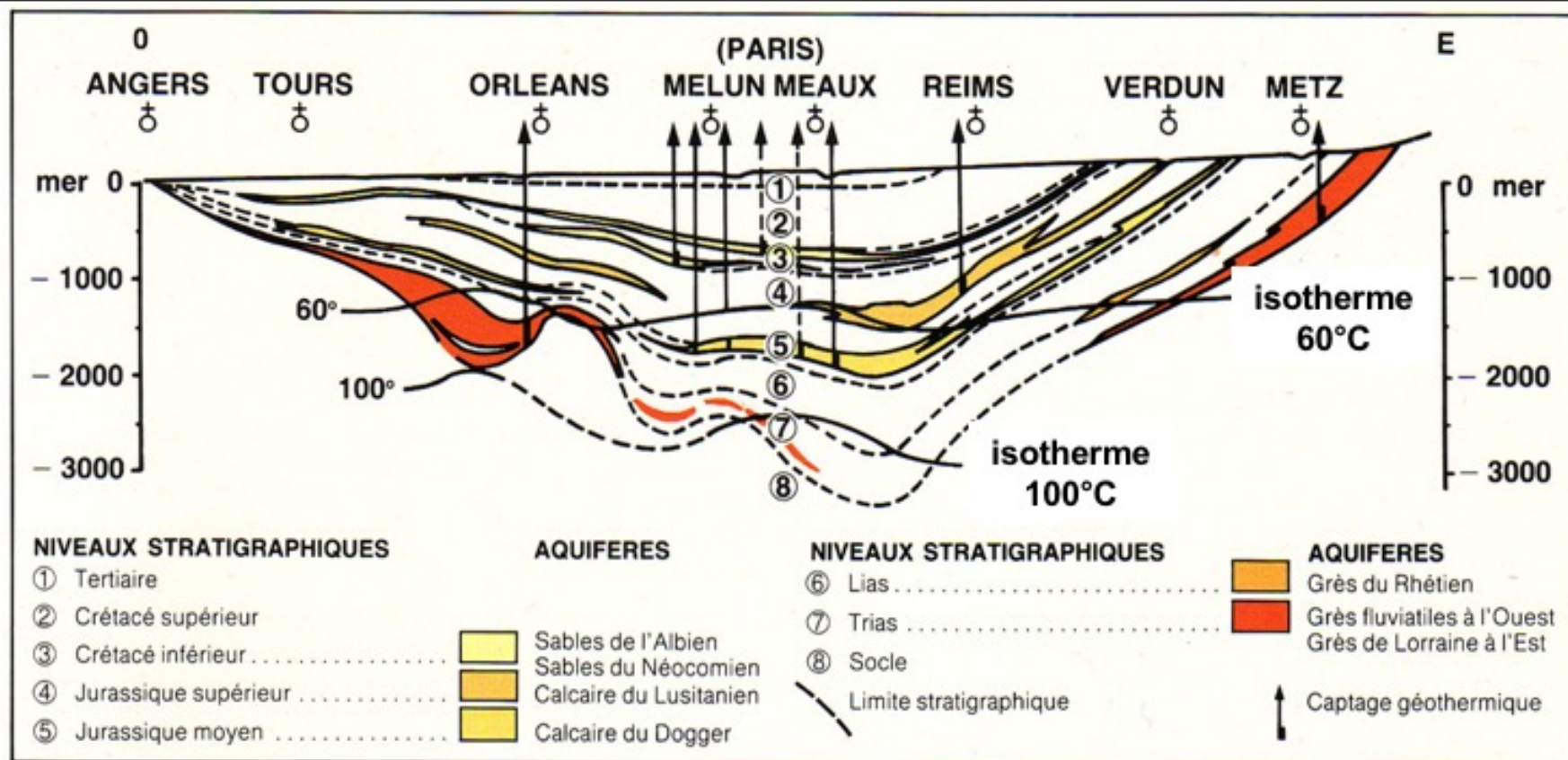
- 4.1. Conduction
- 4.2. Convection
- 4.3. La dissipation de la chaleur de la Terre est le moteur de la tectonique des plaques

## Conclusion

- Schéma bilan
- Avantages de l'énergie géothermique



## 2.1. Géothermie basse température dans le BP



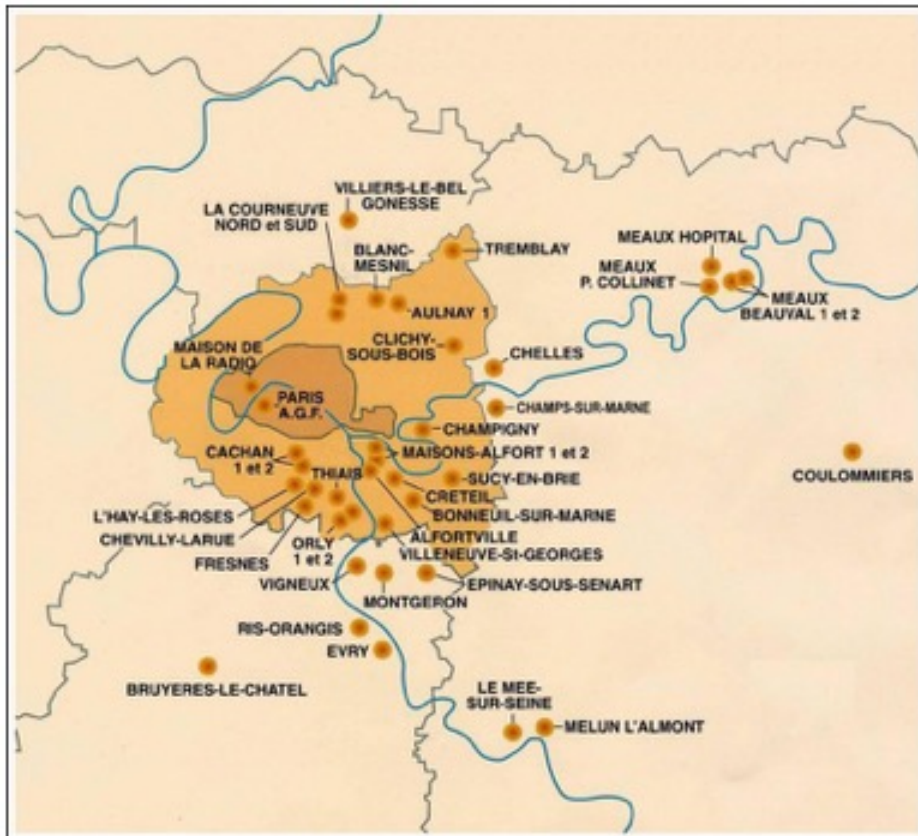
Âge      T max.  
(°C)

### Principaux aquifères du BP

- 80% des stations géothermiques en France sont dans le BP
- 95% des stations géothermiques du BP exploitent la chaleur du Dogger

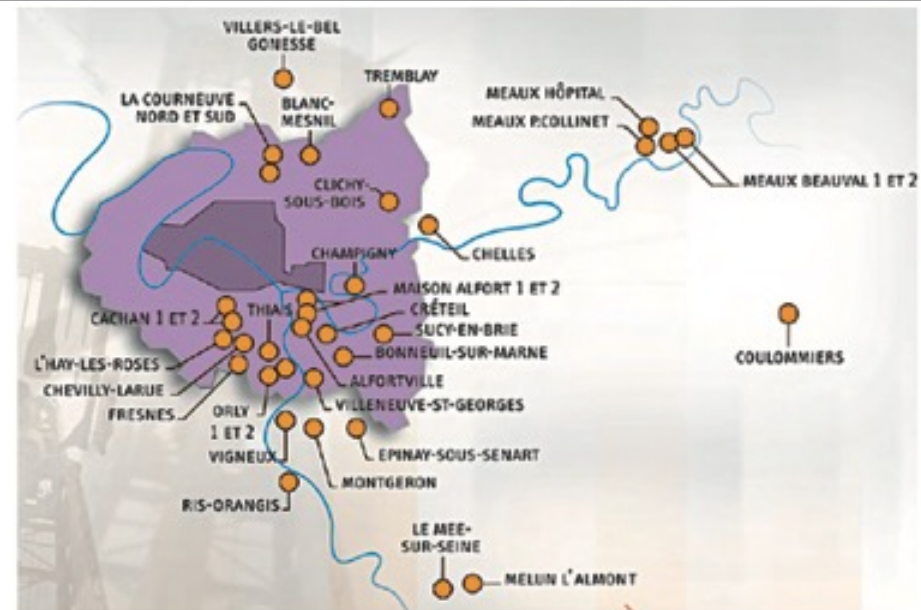
Albien	40
Néocomien	45
Lusitanien	65
Dogger	85
Rhétien	80
Trias	110

# Ressources géothermiques en IdF



46 opérations en Ile-de-France :  
chauffage urbain

Maison de la Radio :  
depuis 1963, chauffage et climatisation  
avec l'eau de l'aquifère de l'Albien  
puisée à 27° C et rejetée à 7° C



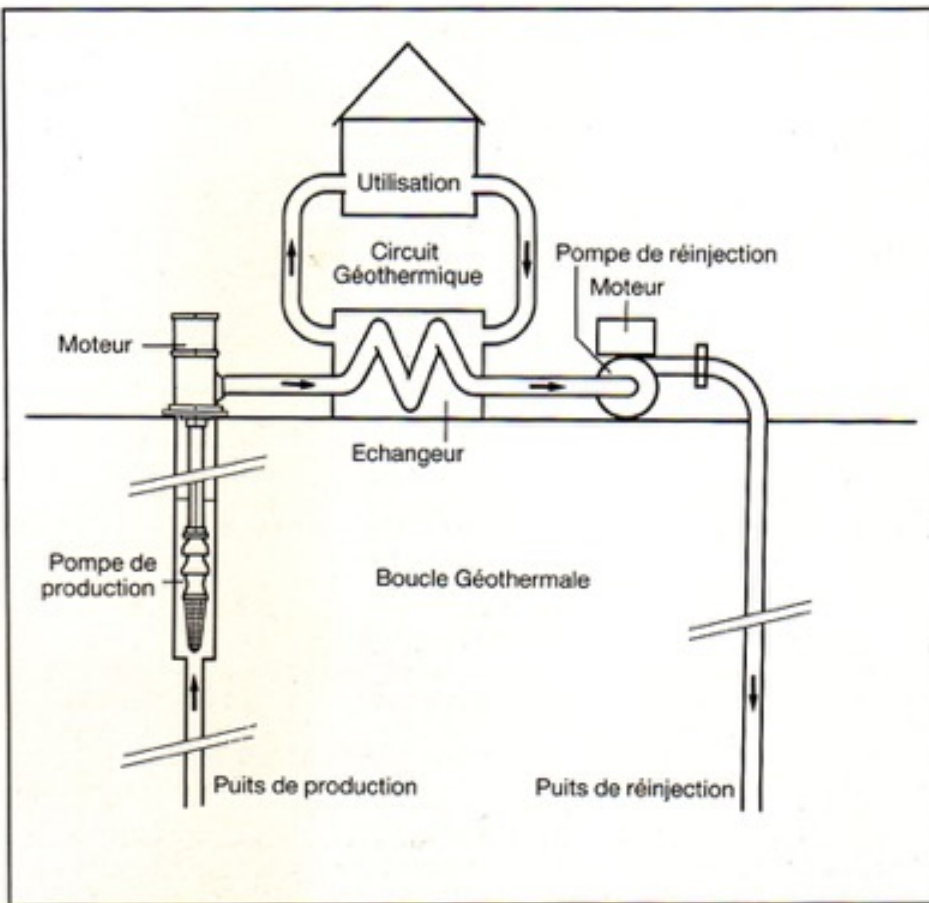
Opérations exploitant de Dogger





# Sortie exploitation géothermique en IdF

- aquifère du Dogger : calcaires oolitiques et graveleux poreux
- profondeur max. : ~2000 m
- température max. : 85°C
- nappe fortement chargée en sels dissous corrosifs ---> réinjection



Le doublet géothermique

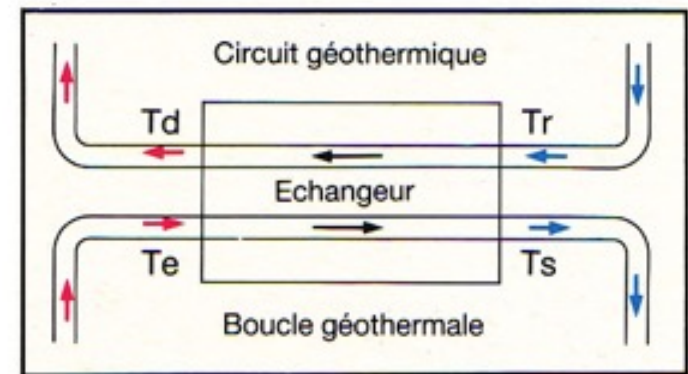


Schéma d'un échangeur

Le pincement, caractéristique des performances de l'échangeur, est égal à  $T_e - T_d$

# Forages géothermiques en France

85 opérations

D = exploitation en doublet

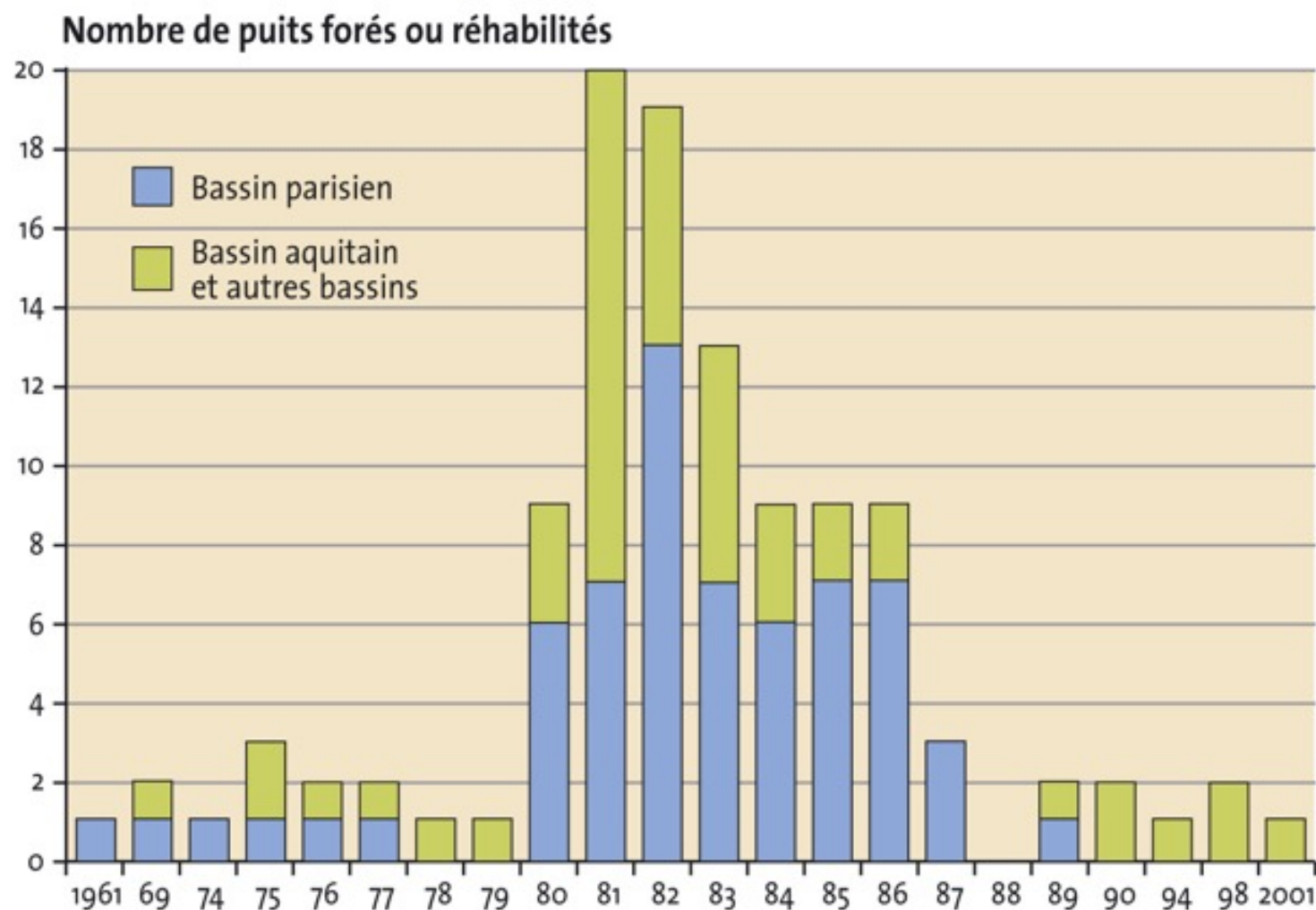
U = exploitation en puits unique



Bassin Parisien				Bassin Aquitain	Autres Régions
Île-de-France		Reste du Bassin Parisien			
Combs-sur-Seine (78)	U	Creil I (92)	2 x D	Mont-de-Marsan I (40)	U
Malun (Aisne) (77)	D	Beauvais (92)	D	Bordeaux Mériadeck (33)	U
Le Mée-sur-Seine (77)	D	Creil II (92)	D	Bordeaux Beraud (33)	U
Cergy-Pontoise (95)	D	Châteauneuf (36)	U	Pessac (33)	U
Coulommiers (77)	D			Marignac (33)	U
Montgeron (91)	D			Bordeaux Grand Parc (33)	U
La Courneuve Sud (93)	D			Mas le Taich (33)	U
Bruyère-le-Chatel (91)	U			Bordeaux Stadium (33)	U
Aulnay-sous-Bois (93)	D			Bordeaux base 106 (33)	U
Orly (94)	D				
Clichy-sous-Bois (93)	D				
Evry (91)	D				
Meaux Collinet (77)	D				
Meaux Hôpital (77)	D				
La Courneuve Nord (93)	D				
Achères (78)	D				
La Celle St Cloud (78)	D				
Meaux Beauval (77)	2 x D				
Sevran (93)	D				
Ris-Orangis (91)	D				
Paris Porte de Saint-Cloud (75)	D				
Blanc-Mesnil (93)	D				
Vaux-le-Pénil (77)	D				
Châtenay-Malabry (92)	D				
Garges-les-Gonnesse (95)	D				
Tremblay-les-Gonnesse (93)	D				
Ivry (94)	D				
Aulnay-sous-Bois (93)	D				
Paris La-Villette (75)	U				
Bondy (93)	D				
Cachan (94)	2 x D				
Vigneux (91)	D				
Epinay-sous-Sénart (91)	D				
Sucy-en-Brie (94)	D				
Maisons-Alfort I (94)	D				
Villiers-le-Bel - Gonnesse (95)	D				
Chevilly la Rue (94)	2 x D				
L'Hay-les-Roses (94)	D				
Créteil (94)	D				
Champigny (94)	D				
Bonneuil-sur-Marne (94)	D				
Chelles (77)	D				
Orly (94)	D				
Thiais (94)	D				
Maisons-Alfort II (94)	D				
Alfortville (94)	D				
<b>46 opérations</b>		<b>4 opérations</b>		<b>9 opérations</b>	
Villeneuve-la-Garenne (92)	D	Maliery (45)	U	Dax (40)	U
Fontainebleau (77)	D	Epervay (51)	U	Mont-de-Marsan II (40)	U
Fresnes (94)	D			Blagnac (31)	U
				Lamaze (32)	U
				Jonzac (17)	U
<b>3 opérations</b>		<b>2 opérations</b>		<b>5 opérations</b>	<b>1 opération</b>
Provins (77)	U	Reims (51)	U	Tarbes (80)	U
<b>1 opération</b>		<b>1 opération</b>		<b>1 opération</b>	<b>12 opérations</b>
<b>50 opérations</b>		<b>7 opérations</b>		<b>15 opérations</b>	<b>13 opérations</b>

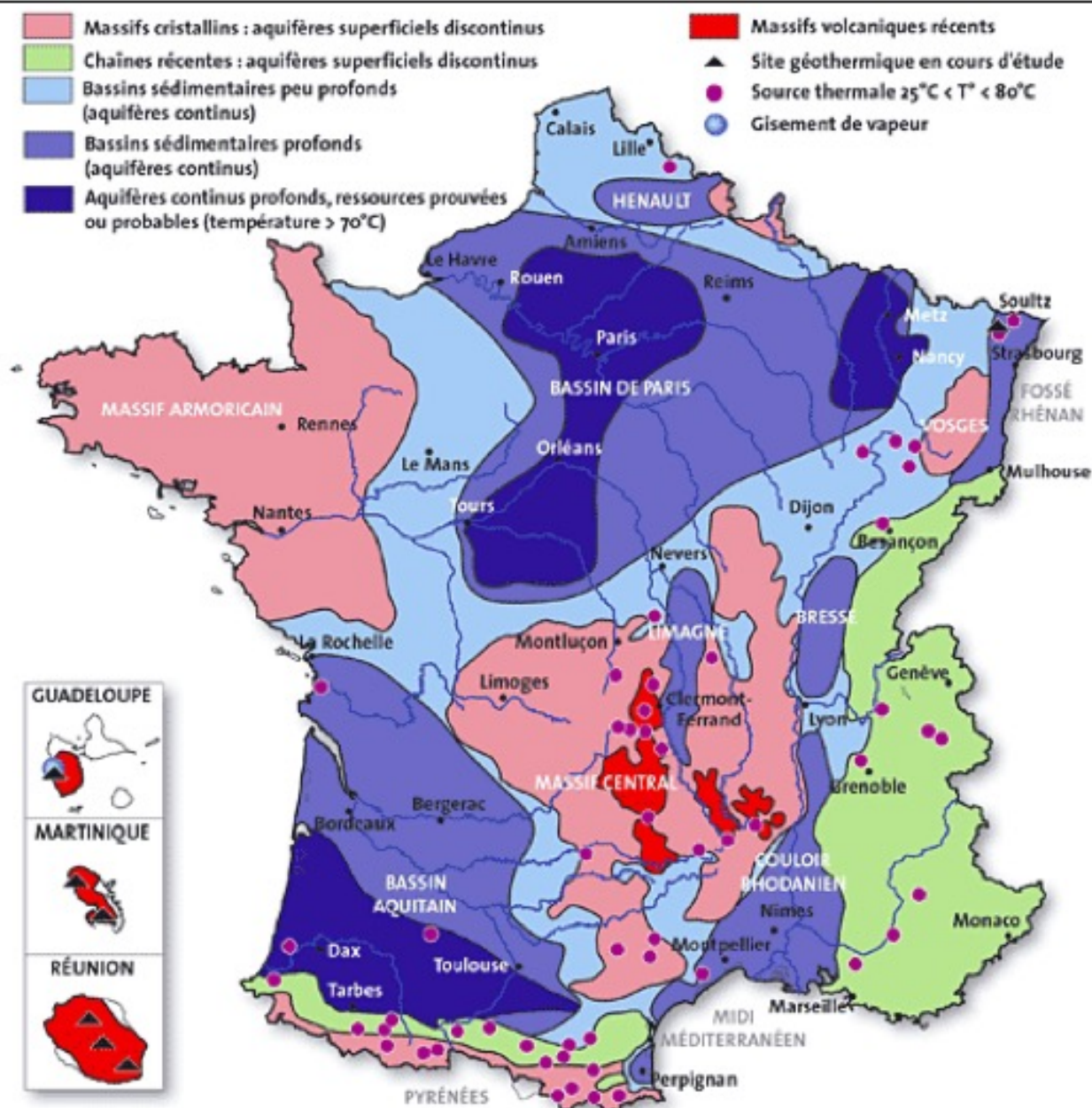


# Forages géothermiques de basse énergie



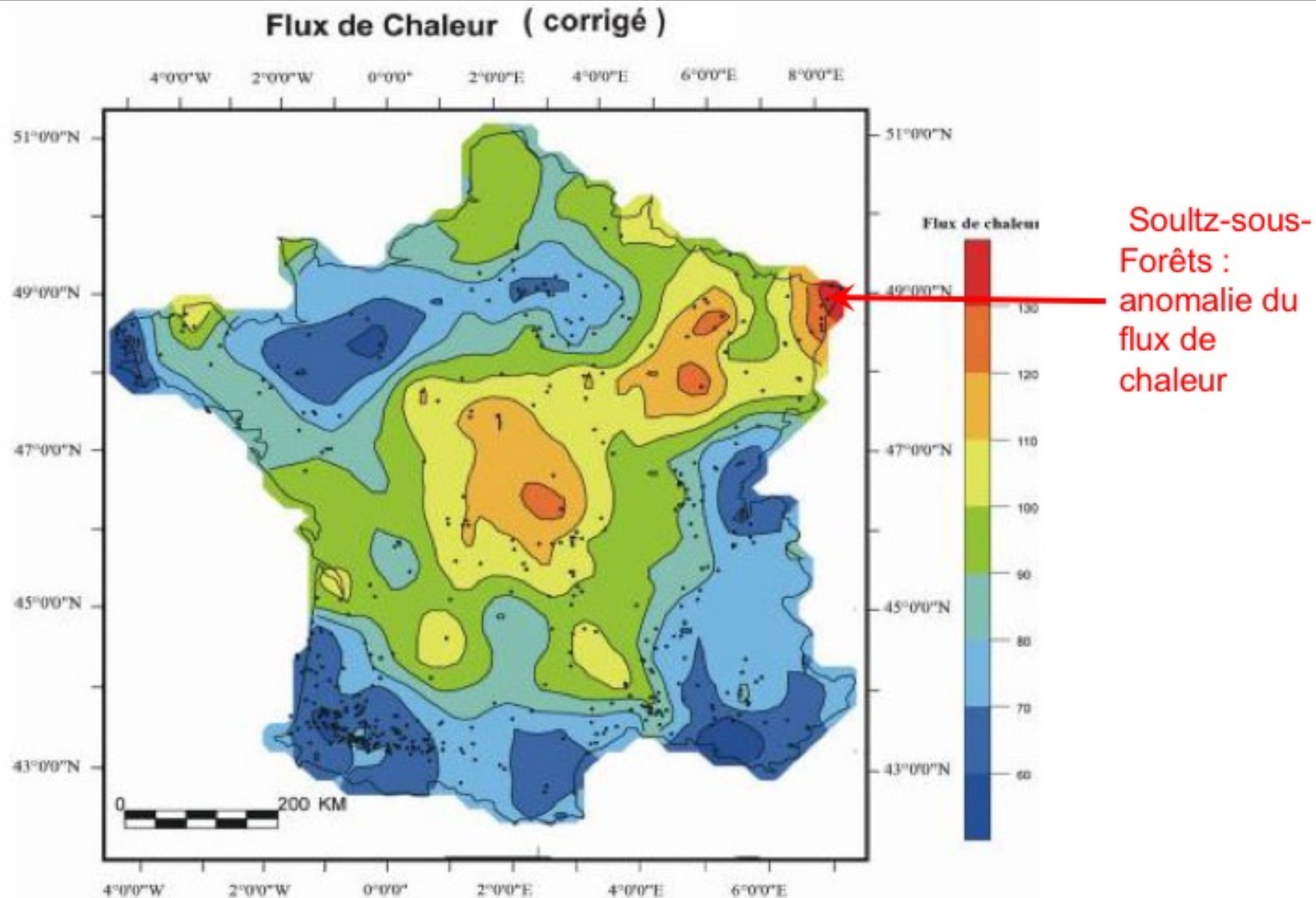
# Ressources géothermiques en France

- Ressources géothermiques liées à la présence d'aquifères
- 2 grands pôles de développement:
  - bassin de Paris
  - bassin aquitain
- Potentialités :
  - Alsace
  - Limagne
  - Bresse
  - couloir rhodanien
  - Languedoc
- Guadeloupe :
  - centrale de Bouillante

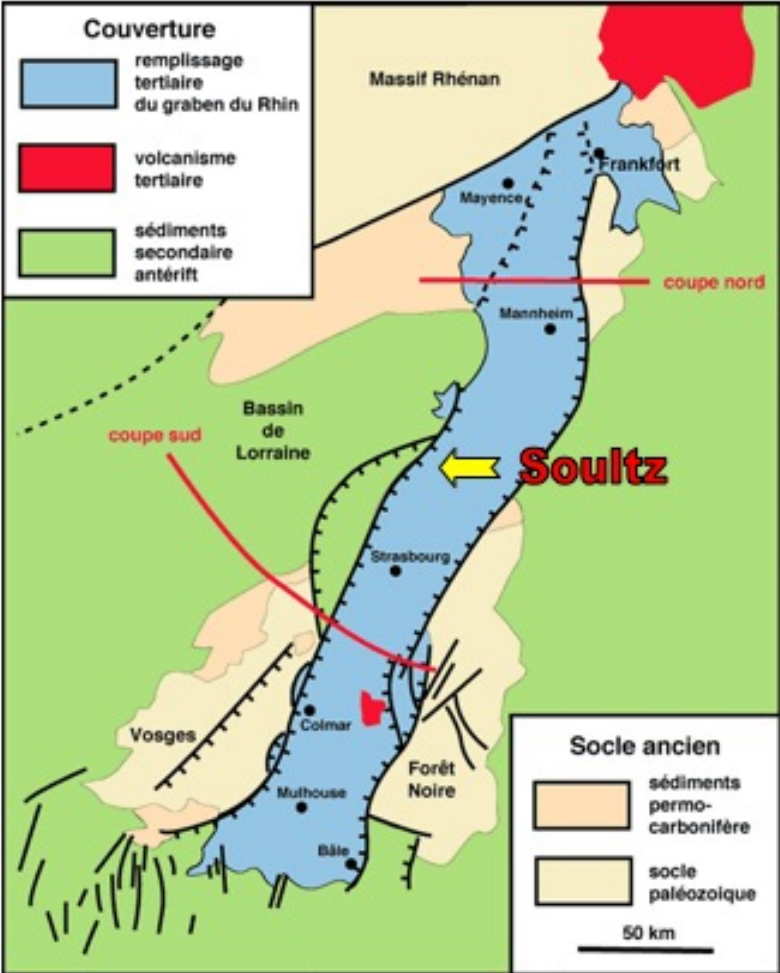




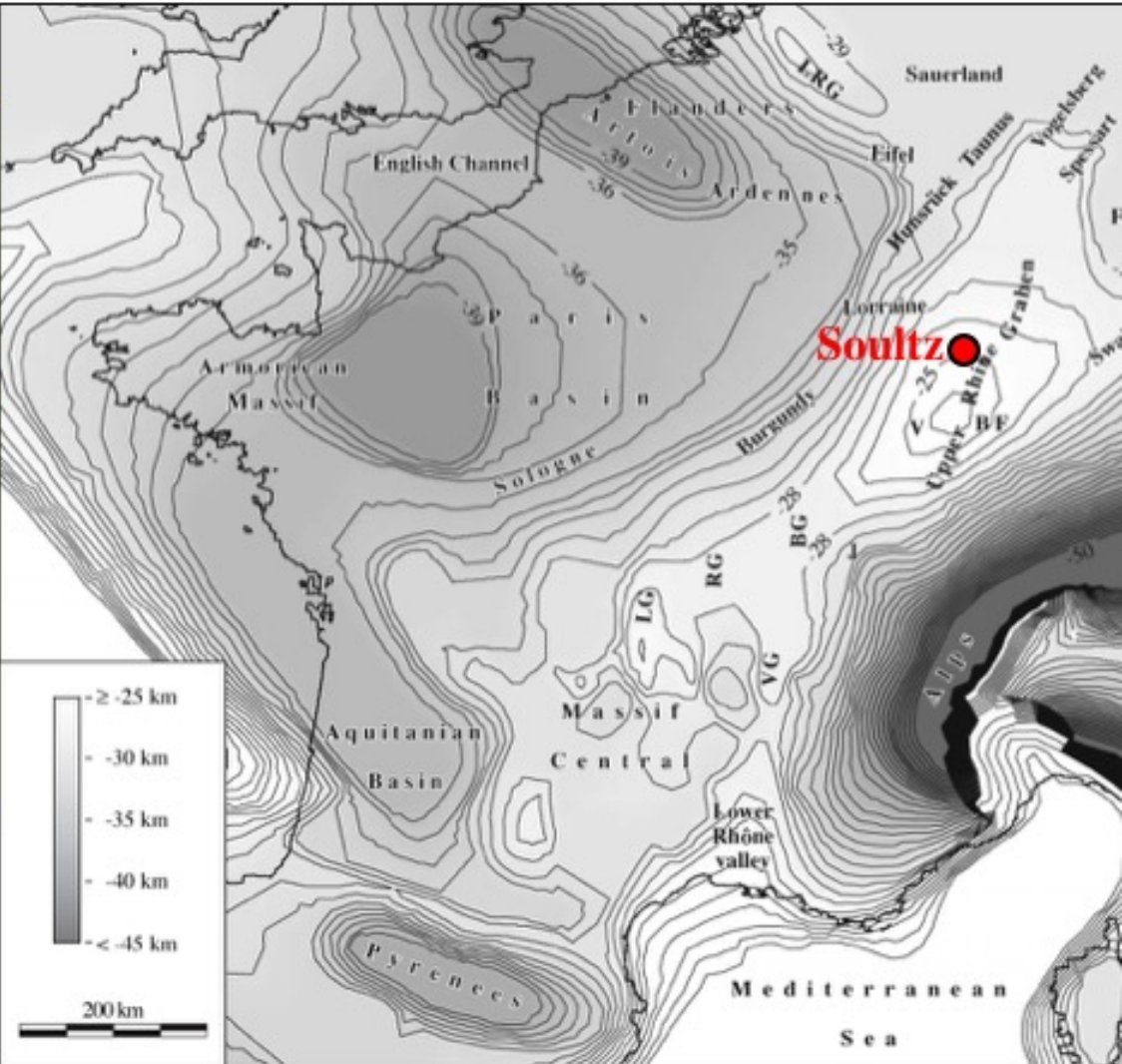
## 2.2. Géothermie haute température à Soultz



# Géothermie HT profonde à Soultz-sous-Forêts



Contexte tectonique

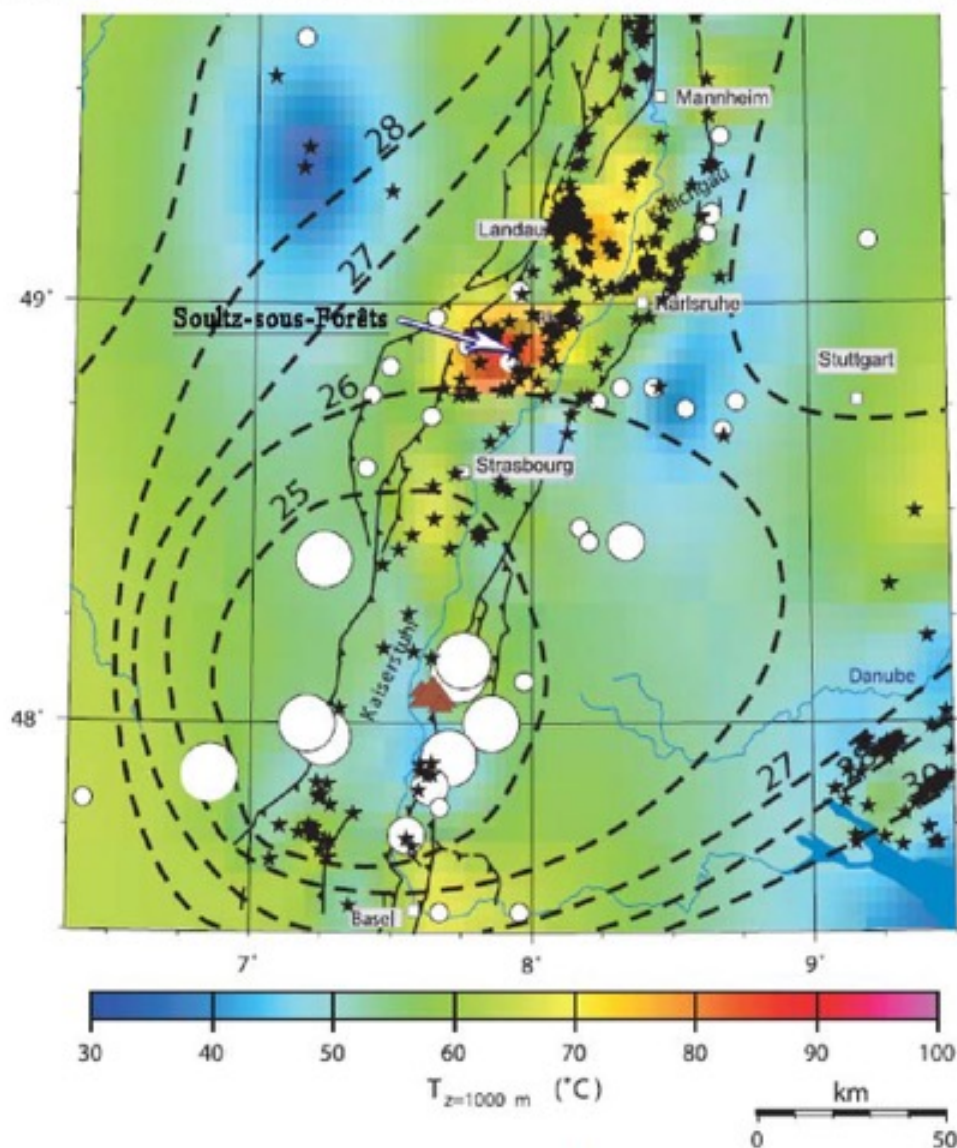


Profondeur du Moho



# Géothermie HT profonde à Soultz-sous-Forêts

Température mesurée à la profondeur de 1 000 m dans les forages du Fossé rhénan (d'après Clauser, 2002)



(★) : forage    - - - : profondeur du Moho en km    ▲ : édifices volcaniques anciens (Kaiserstuhl)  
O : les cercles indiquent par leurs diamètres le pourcentage d'hélium d'origine mantellique dans les eaux ou gaz souterrains



# Plan du site



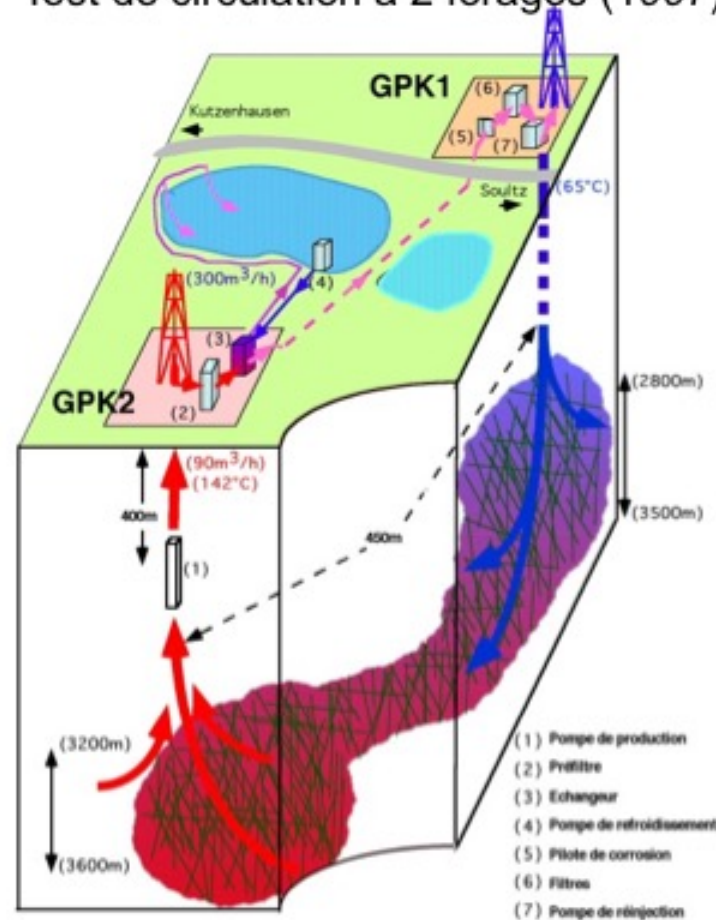


# Plateforme GPK2



# Tests d'injection et de circulation

Test de circulation à 2 forages (1997)

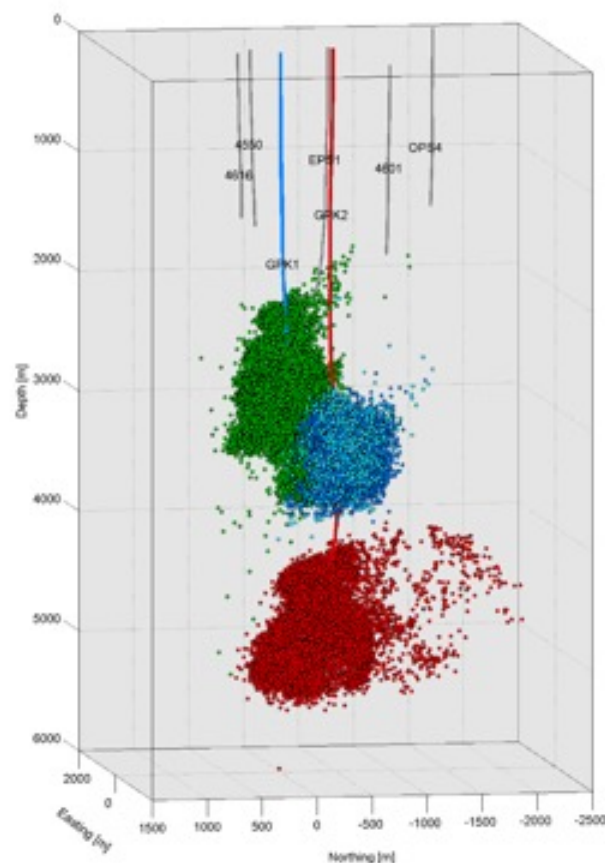


- Durée 4 mois, circulation parfaitement équilibrée de 90 m³/h
- Température de production régulièrement croissante (>142°C)
- Environ 30% du débit réinjecté retourné à court terme au puits de production
- Pas de corrosion ni colmatage

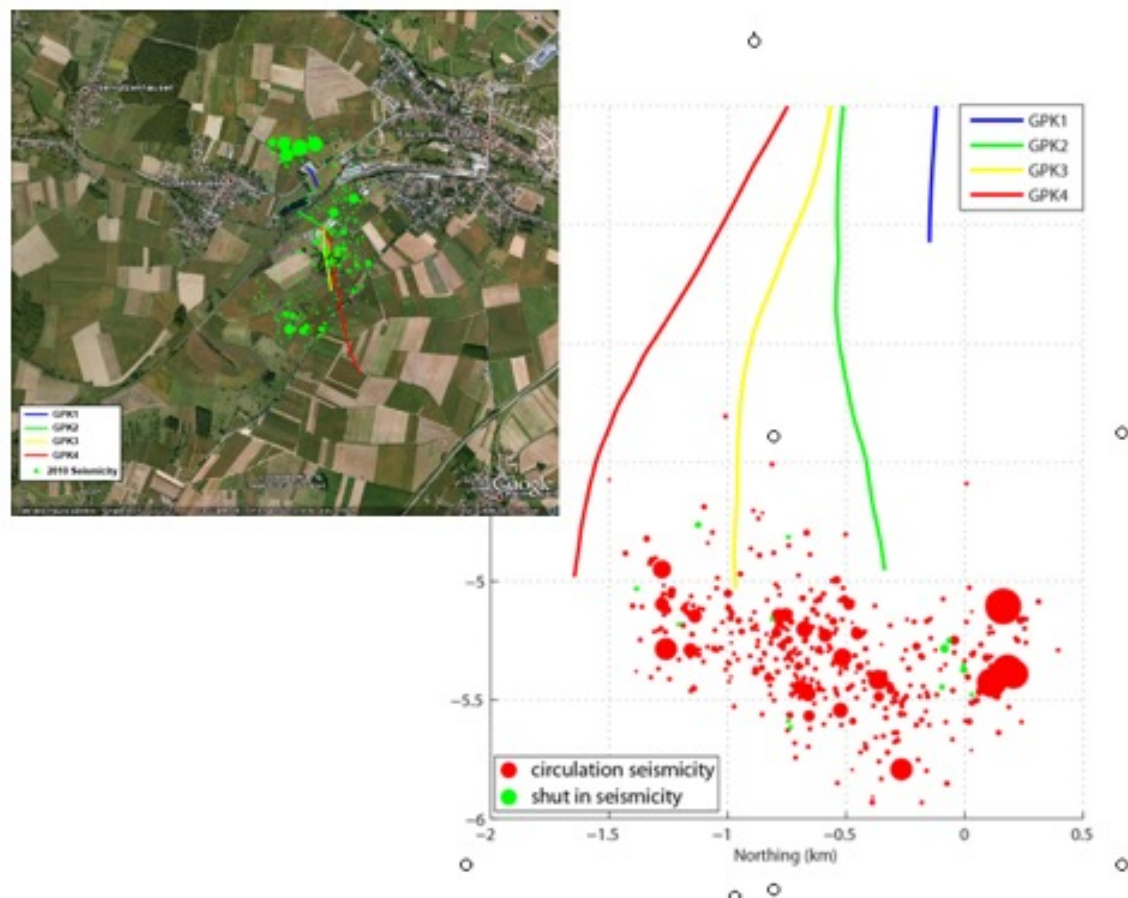


# Micro-sismicité induite

Micro-sismicité induite par injection  
en 1993, 1995-1996, 2000



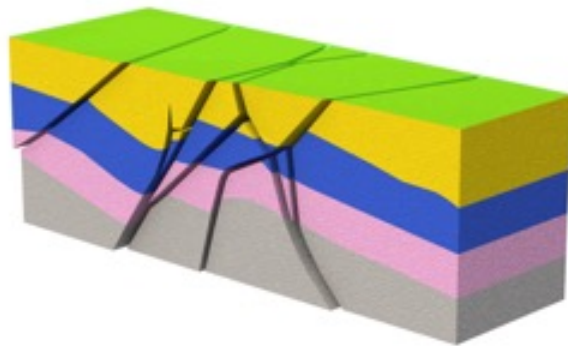
Micro-sismicité induite en 2010



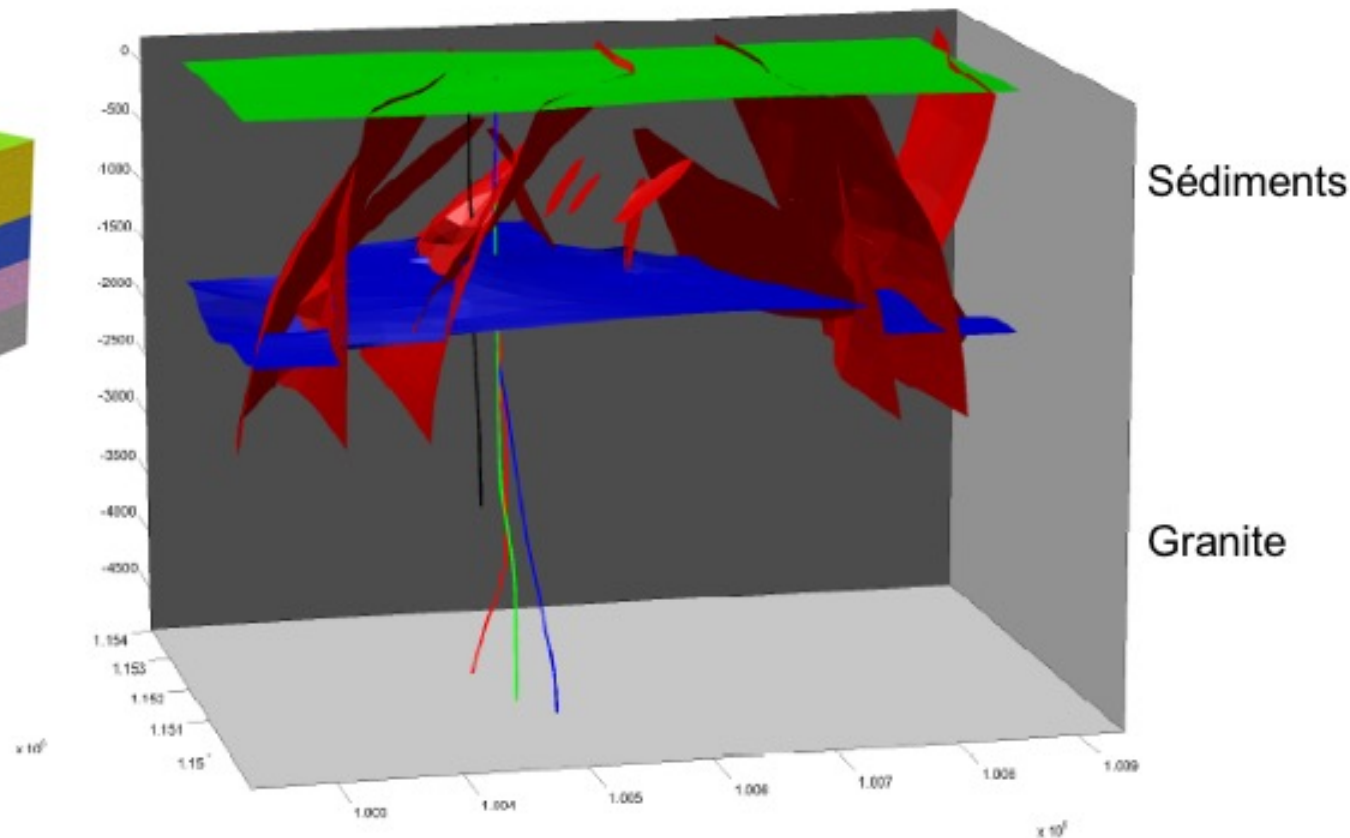
- Pendant la circulation de 2010, les événements micro-sismiques se développent toujours dans les mêmes zones profondes
- à Soultz, 45 000 microséismes de magnitude inférieure à 2 (magnitude max 2,9)
- à Bâle (Suisse), un séisme provoqué de magnitude 3,4 en 2006 : arrêt du projet

# Structure en profondeur à Soultz

Réseau de faille imagé par sismique réflexion



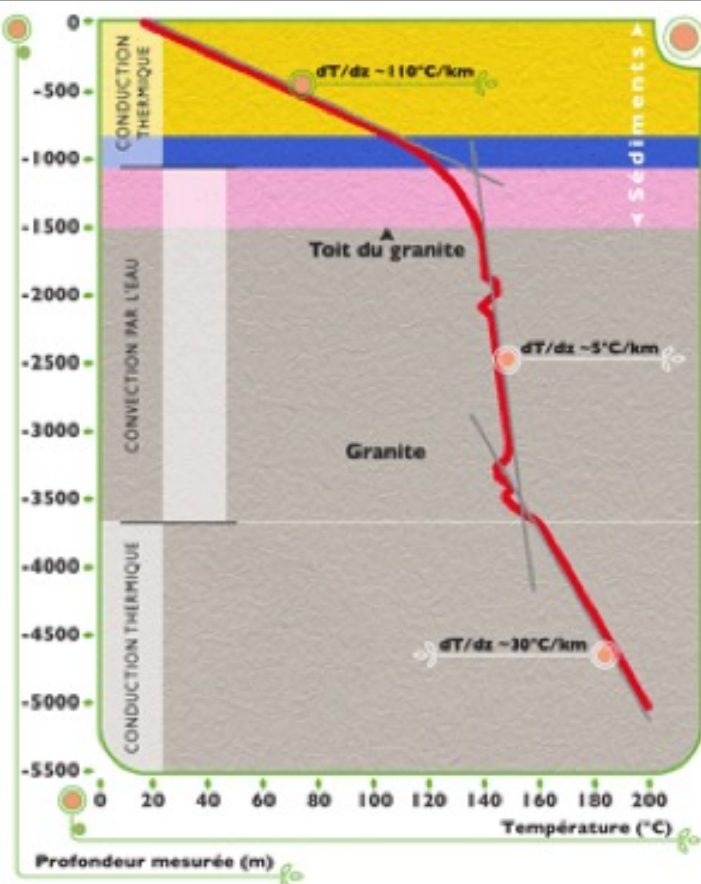
Structure locale



- Les failles dans les sédiments sont connues par l'exploration sismique et les forages pétroliers
- L'image des failles dans le granite n'est pas connue

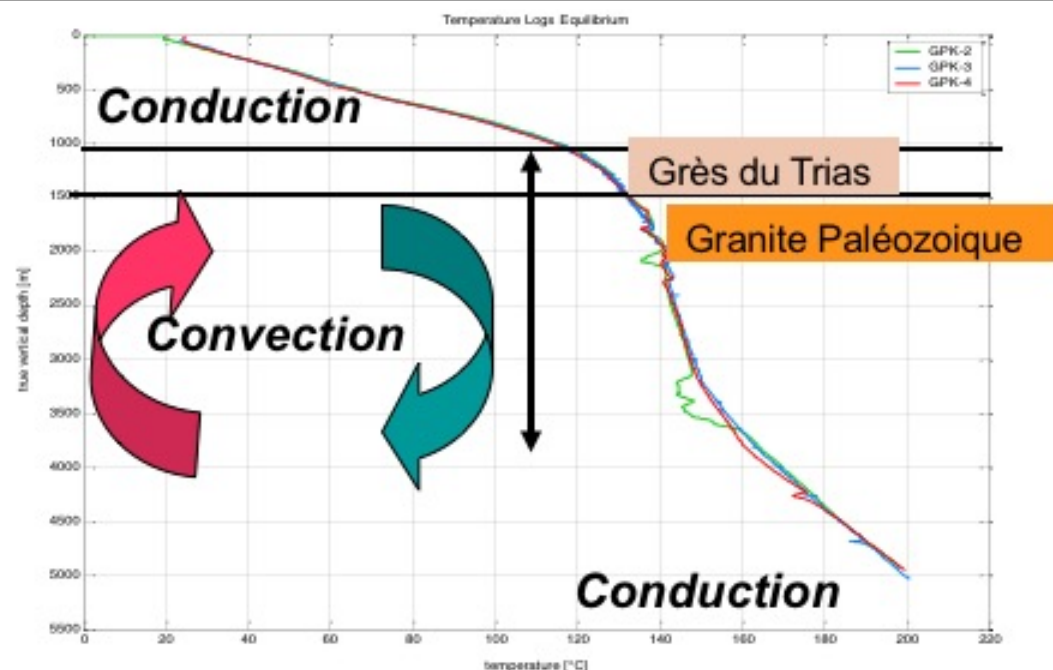


# Géotherme à Soultz



Géotherme et lithologie  
T=200°C à 5000 m

⇒ circulation naturelle dans les zones  
fracturées et altérées



Grès  
fracturés



Granite altéré  
fracturé



# Géothermie HT à Soultz

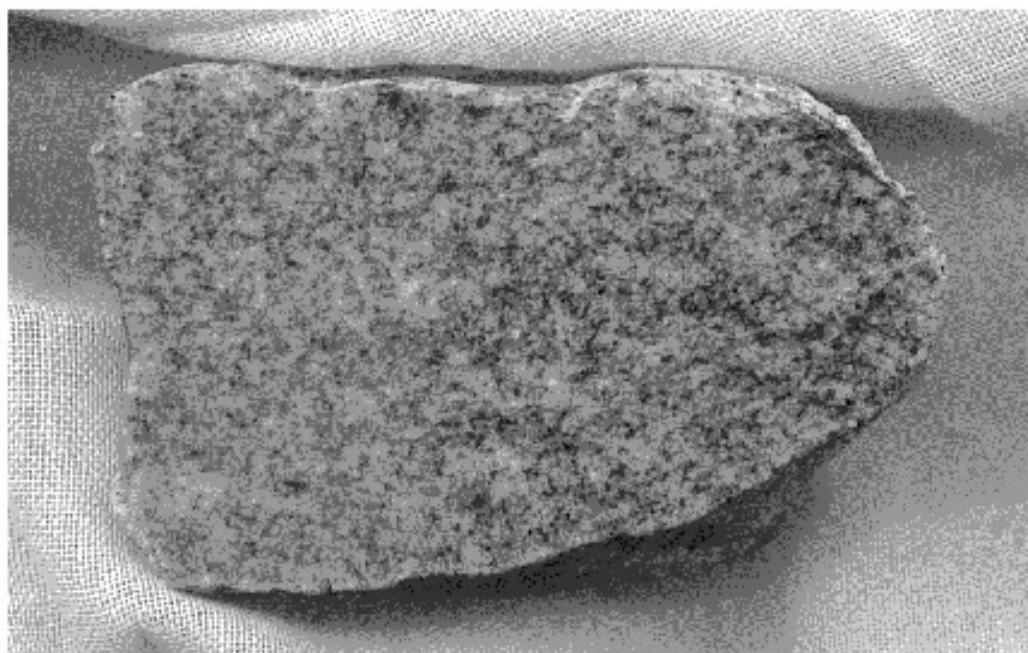
Lithologie en base de forage

GPK-1 granite standard



7 cm

GPK-2 granite à grains fins à 2 micas

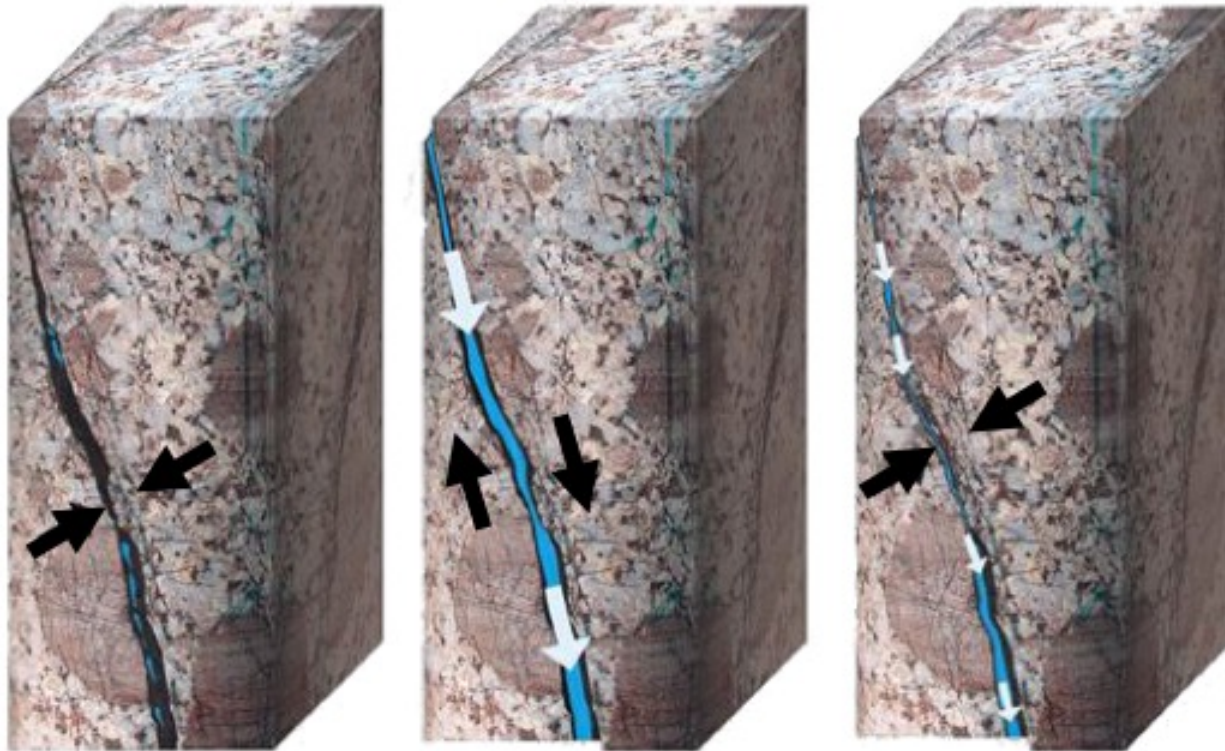


- Carotte K1 : 5058,30 m
- Granite à 2 micas biotite, muscovite
- âge 327 Ma

- Carotte K21 : 3510 m
- Monzogranite, âge 333 Ma
- Gros feldspath potassique
- plagioclase, quartz, biotite et hornblende



# Géothermie profonde à Soultz

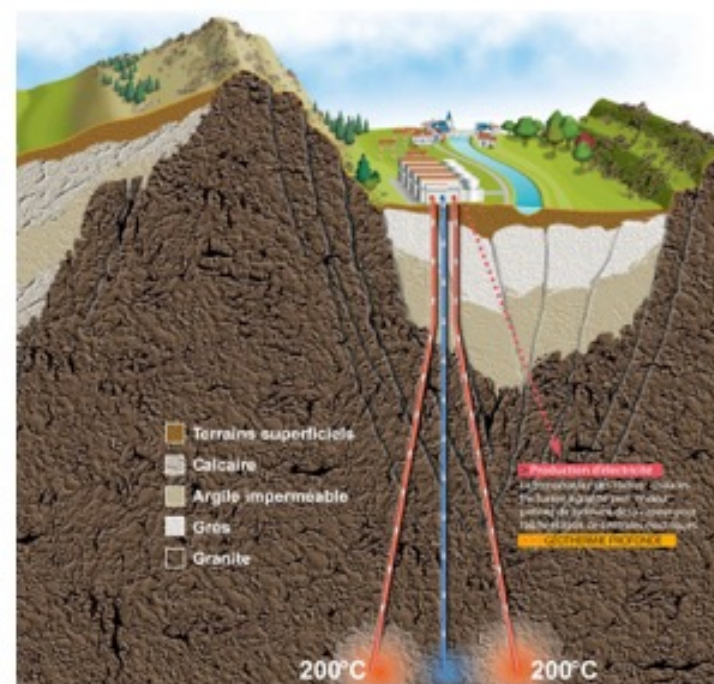
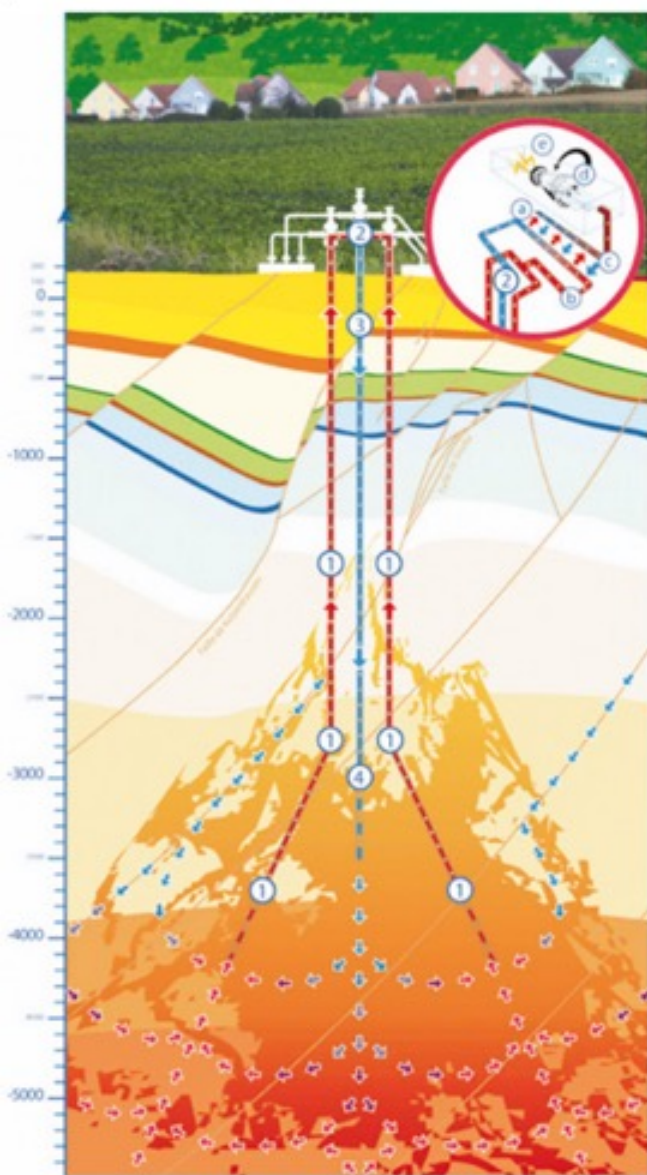


Stimulation des failles

## Géothermie stimulée

- Injection d'eau sous pression dans roches chaudes déjà fracturées : stimulation hydraulique de la perméabilité des fractures naturelles (EGS : Enhanced Geothermal System)
- Ré-ouvrir les fractures colmatées pour qu'elles ne soient plus parfaitement imbriquées et laissent circuler l'eau

# Géothermie profonde à Soultz



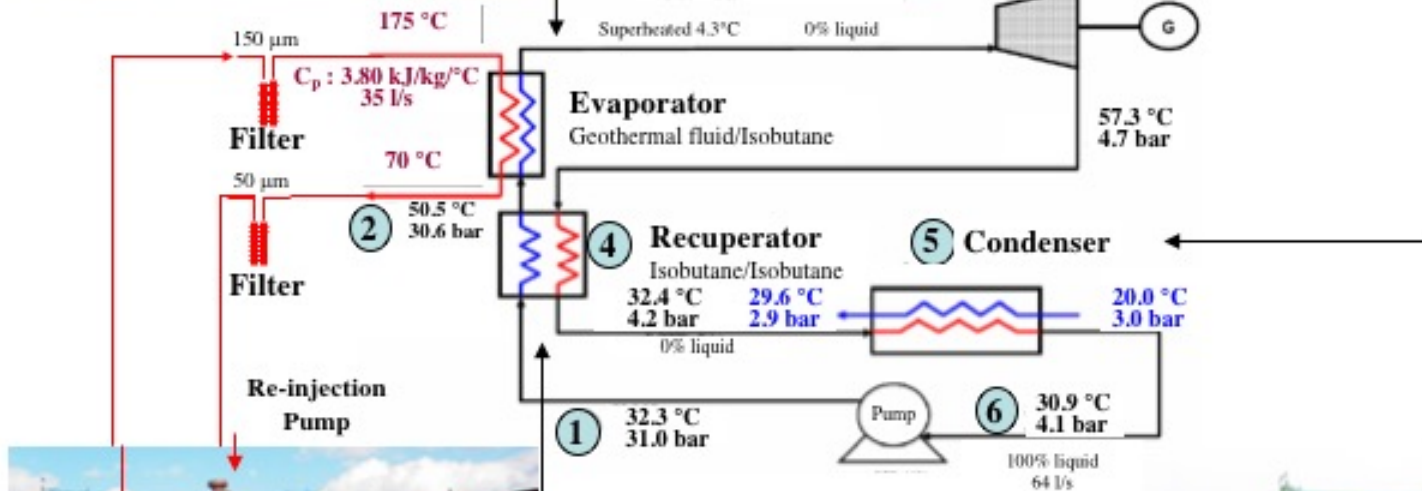
- Boucle géothermale :
  - pompage de l'eau chaude par les puits latéraux
  - échangeur de chaleur
  - circuit secondaire : fluide organique de type isobutane
  - eau refroidie renvoyée par le puits d'injection
  - l'eau réchauffée dans les fractures puis à nouveau pompée quelques jours ou mois plus tard
- Première production d'électricité en 2008 : 1500 hab.
- 3 forages à 5000 m, 30 ans de recherches depuis 1987
- 80 M€ investis (en 2005) : 30 UE, 25 All, 25 Fr



# Plateforme GPK2



# GPK2 : la centrale en image



GPK2  
Line-Shaft-  
Pump at  
350 m



# Les principales phases et perspectives



**Forages profonds & Stimulation**

- Raccordement au réseau électrique en septembre 2010

- Vente d'électricité à partir de janvier 2011



**Construction de la centrale**

- Puissance actuelle de 1,5 à 4 MW (production en France en 2012 : 540 TW)

## Perspectives

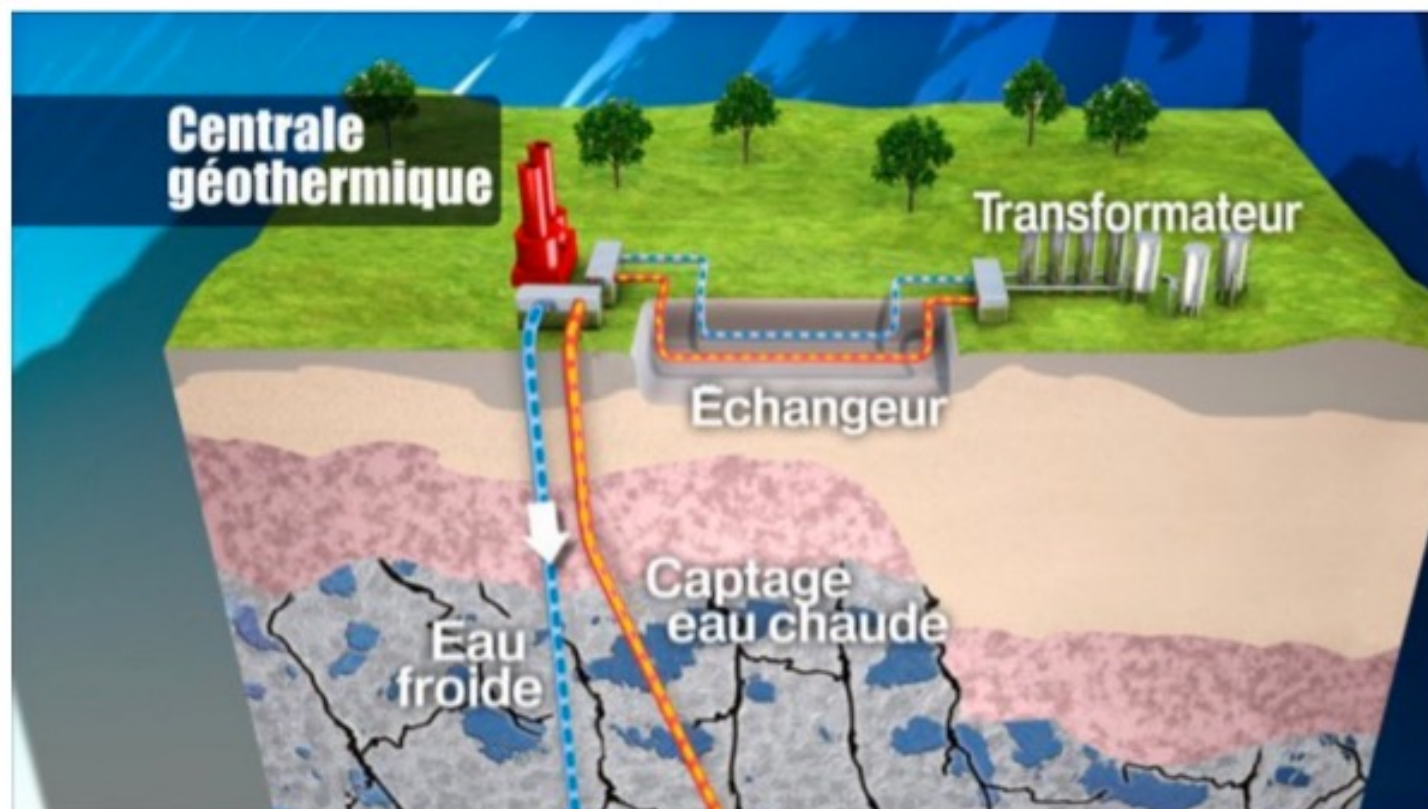


**Suivi scientifique et technique**

- Mise en place du programme Phase 3
- Etude de la pérennité du système
- Chute de température : perte de 0,1°C par an
- Microsismicité, corrosion, traçage, technologie des pompes à HT, bruit...

# Inauguration en 2016

Inauguration de la centrale de géothermie profonde à Soultz-sous-Forêts



PARTAGES



Inauguration aujourd'hui de la centrale de géothermie de Soultz-sous-Forêts. Laboratoire de recherche et d'expérimentation durant 30 ans, elle produit depuis le printemps dernier de l'électricité de manière industrielle.

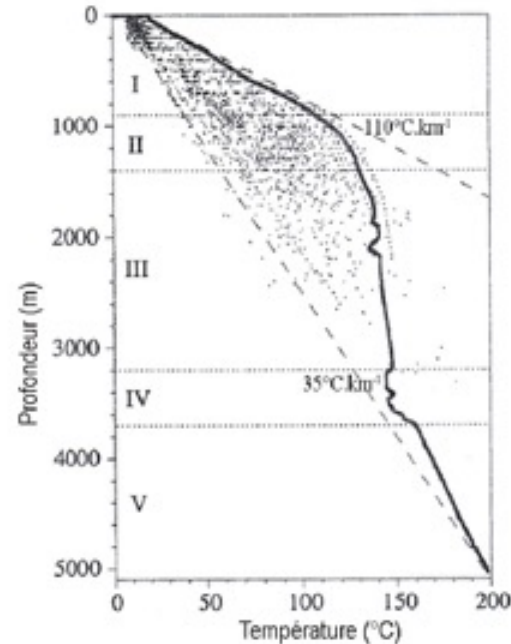
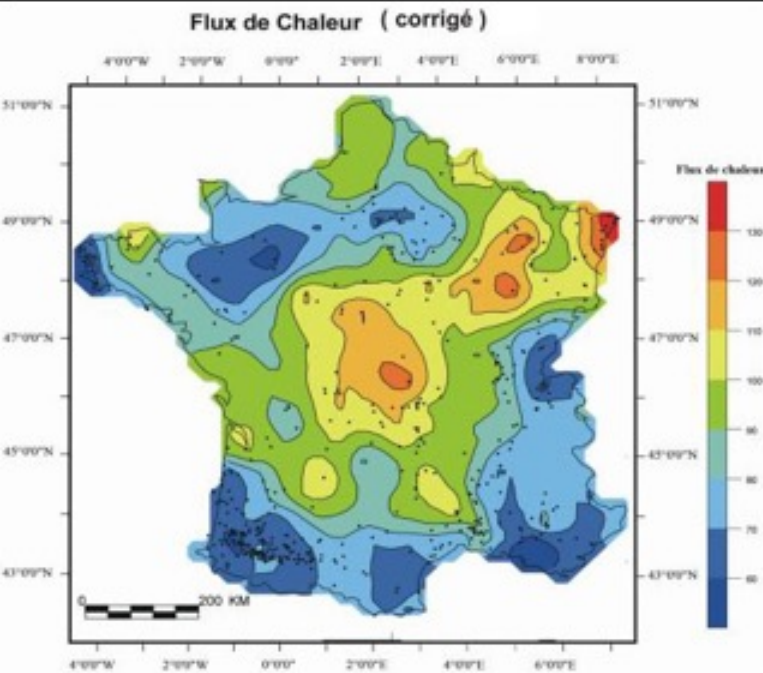
Par Anne-Laure Herbet

Publié le 23/09/2016 à 13:19

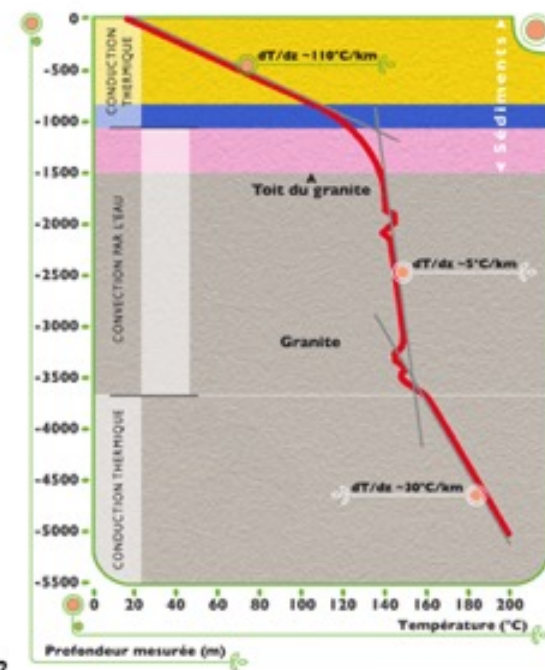
Mis à jour le 23/09/2016 à 18:47



# Judicieux d'avoir choisi Soultz ?



Températures mesurées dans le forage GPK2



Géotherme à Soultz

## Températures en profondeur en France

Profondeur Lieu	1km	2km	3km	4km	5km
bassin parisien	33-45°	75-85°	115-130°	130-150°	150-165°
fossé Rhénan	55-65°	85-100°	100-115°	115-130°	150-165°
Alpes	33-45°	65-75°	85-100°	130-150°	165-179°
Massif Central	45-55°	65-75°	85-100°	115-130°	150-165°
Pyrénées	55-65°	65-75°	85-100°	115-130°	130-150°

# Géothermie en Alsace

## Géothermie : Strasbourg se prépare à forer en profondeur



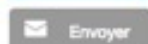
Après les maisons fissurées de Lochwiller, ce nouveau projet de forage géothermique inquiète

2014



L'entreprise Fonroche a présenté son projet de forage à vocation géothermique, qui doit être réalisé autour de Strasbourg dès janvier 2015 : au port aux pétroles, à Illkirch-Graffenstaden et à Eckbolsheim. L'objectif à long terme : assurer 80% des besoins de chaleur dans la Communauté urbaine de Strasbourg.

PARTAGES



L'an prochain, trois grands forages à vocation géothermique doivent être réalisés autour de Strasbourg. Mais après l'affaire des maisons fissurées de Lochwiller, cette implantation inquiète.

Par Baptiste Cogitore

Publié le 19/11/2014 à 12:23 Mis à jour le 21/11/2014 à 11:03

Il s'agira d'injecter un fluide à 4 000 ou 5 000 mètres de profondeur dans des failles géologiques, puis à le remonter à la surface pour récupérer par transfert, la chaleur des entrailles de la terre afin de la transformer en électricité ou de l'injecter dans des circuits de chauffage d'habitations.

Mais le projet inquiète. Après les maisons fissurées de Lochwiller où la géothermie a été mise en cause, les séismes de Bâle et plus récemment de Soultz, les opposants voient d'un très mauvais oeil une opération de grande ampleur autour de la capitale alsacienne.



# Géothermie en Alsace

## Fonroche Géothermie va forer sous l'ancienne raffinerie de Reichstett

CORRESPONDANT À STRASBOURG CHRISTIAN LIENHARDT - LES ECHOS | LE 04/05/2016

2016



▣ 65 millions d'euros investis sur le site pour extraire de l'eau chaude profonde à 185 °C. ▣ Un second gisement est prévu à l'ouest de l'Eurométropole.

L'exploitation des ressources géothermiques du nord de l'Alsace entre dans une phase d'accélération. A peine la centrale de Soultz-sous-Forêts branchée sur le réseau d'Electricité de Strasbourg (ES) et l'amidonnerie Roquette de Beinheim alimentée en eau géothermique à 165 °C, le groupe aquitain Fonroche s'apprête à démarrer des forages exploratoires. Au total 130 millions d'euros d'investissements sont prévus sur deux sites voisins. Coup sur coup, la préfecture du Bas-Rhin vient de lui délivrer les autorisations d'ouverture de travaux miniers pour deux projets, celui d'Eckbolsheim et celui de Vendenheim-Reichstett sur le site de l'ancienne raffinerie.

Le principe utilisé sera celui qui a été mis au point par un consortium d'énergéticiens pour l'opération de Soultz-sous-Forêts. Il consiste à pomper l'eau chaude à 4.000 mètres sous terre, à en extraire les calories, avant de la réinjecter par un second puits creusé en diagonale. L'objectif est d'arriver à 350 m<sup>3</sup>/heure à 185 °C. Le projet Fonroche s'inscrit dans le cadre de la reconversion de ce site de plus de 450 hectares à l'entrée de Strasbourg, qui,

# Géothermie en Alsace

A Strasbourg : premier chantier urbain de géothermie profonde en France

2017



© Ville et Eurométropole de Strasbourg

PARTAGES

f Partager

Twitter

Envoyer

L'outil de forage entre en action le 14 juin 2017 sur le site de l'ancienne raffinerie de Reichstett. Si ces premiers tests de géothermie profonde sont concluants, la centrale de cogénération devrait à terme alimenter le nord de Strasbourg en électricité, en eau chaude et en chaleur.

Par Caroline Moreau

Publié le 12/06/2017 à 16:51 Mis à jour le 12/06/2017 à 18:05



# Géothermie en Alsace

**A** Vendenheim, sur l'ancien site de la raffinerie de Reichstett, il n'y a **plus de pétrole mais des idées** pour alimenter une partie de la ville de Strasbourg en énergie. Des idées qui pourraient prendre la forme d'une centrale de cogénération produisant en même temps de l'électricité, de l'eau chaude et du chauffage.

Avant que cette idée ne devienne réalité, il va falloir procéder à toute une série de tests. A commencer par creuser très profondément dans le sol pour aller chercher à plus de 4 kilomètres de profondeur de l'eau chaude qui sera ensuite reconvertie en énergie.

Un premier puits test va être creusé entre les mois de juin et d'octobre à l'aide d'un outil de forage déjà installé.



Le premier rig de forage s'élève à plusieurs mètres de hauteur / © N. Elkhouch / France 3 Alsace

## Des enjeux considérables

L'électricité fournie par la future centrale alimenterait le réseau urbain du nord de Strasbourg. La chaleur servirait aux serres horticoles, aux équipements industriels, aux réalisations tertiaires et aux logements proches du site.

**2017**

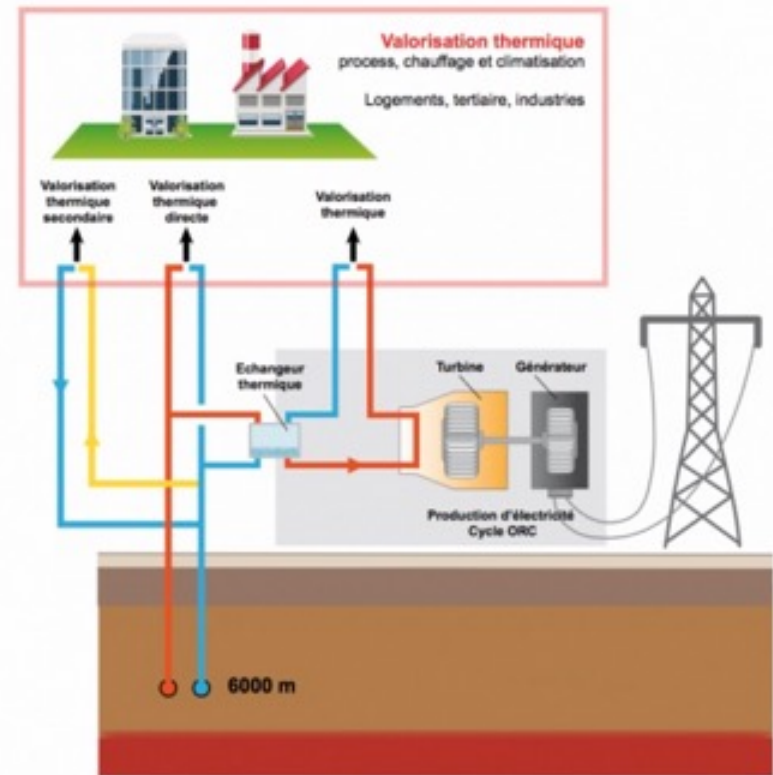
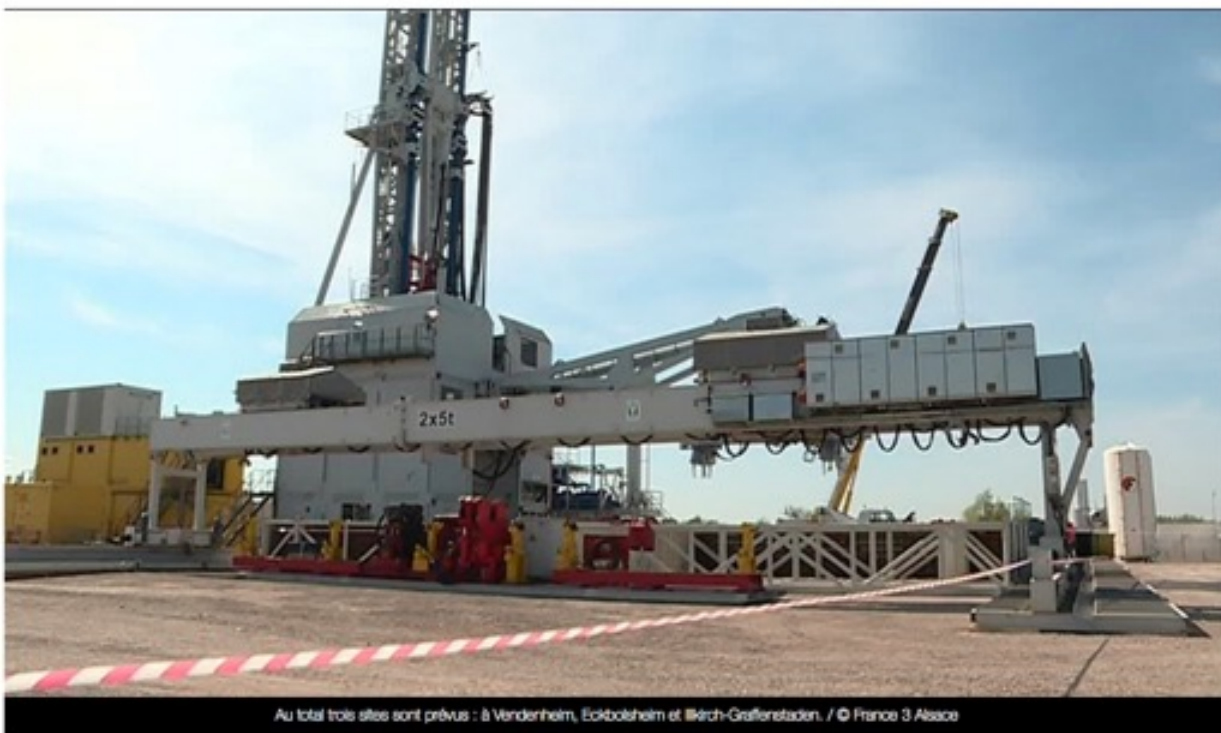


Schéma d'un puits de géothermie profonde / © Fonroche géothermie

Si la centrale voit le jour, 40 millions d'euros seront au total investis sur ce projet qui devrait employer 40 personnes sur les opérations de forage. Deux autres projets de ce type sont envisagés à Illkirch-Graffenstaden et à Eckbolsheim.

# Géothermie en Alsace

## Géothermie en profondeur : premiers résultats encourageants pour l'Eurométropole de Strasbourg



Au total trois sites sont prévus : à Vendenheim, Eckbolsheim et Bâsch-Grafensteden. / © France 3 Alsace

PARTAGES

f Partager

Twitter

Envoyer

Après les travaux, qui ont débuté en juin dernier, les premiers résultats dévoilés ce mercredi par la société Fonroche valident le principe de géothermie profonde à Vendenheim-Reichstett (Bas-Rhin). Le puits, qui descend à 4600 m, serait le plus profond de France.

Par M.L.

Publié le 18/04/2018 à 19:54 Mis à jour le 19/04/2018 à 18:25

### 2018

C'est sur un lieu symbolique, l'ancienne raffinerie de **Reichstett** (Bas-Rhin), que la première centrale de géothermie profonde de l'Eurométropole doit voir le jour. Si, pour l'instant, un seul des deux tuyaux a été installé - le forage a duré huit mois -, les premiers résultats des tests que la société **Fonroche** a communiqués ce mercredi matin **valident la construction** de l'ensemble.



"On a trouvé de l'eau à plus de 200 degrés, donc c'est le puits le plus chaud d'Europe continentale, hors zone volcanique en Italie, expose **Jean-Philippe Soulé**, directeur général de Fonroche Géothermie. C'est un résultat exceptionnel au niveau européen. En termes de débit, c'est plus de 300 m<sup>3</sup> par heure, donc la puissance qu'on sortira de cet ouvrage permettra de chauffer plus de 26.000 habitants et d'en fournir plus de 9.000 en électricité."



# Géothermie en Alsace

## PRÉSENTATION DU PROJET

2018



L'unité de cogénération géothermique d'Ecoparc Rhénan, à Vendenheim, permettra d'alimenter jusqu'à 7000 logements en électricité. Pour sa part, son réseau de chaleur sera accessible à 26000 logements ou 70 hectares de serres agricoles en chaleur douce. Elle constitue, à ce titre, une étape essentielle sur le chemin d'une alimentation en énergie vertueuse sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg et répond au cadre posé par la Loi sur la Transition énergétique.

Le choix de la technologie du doublet pour l'exploitation réduit le potentiel impact environnemental à son plus strict minimum. Selon la technique employée, l'eau prélevée à 4 kilomètres sous terre est remontée via un puits étanche. Les calories de cette eau à plus de 150 degrés, maintenue sous pression, sont exploitées avant que l'eau ne soit réinjectée à de grandes profondeurs sans jamais changer de circuit. Cela garantit un process étanche et sans conséquence sur l'environnement.

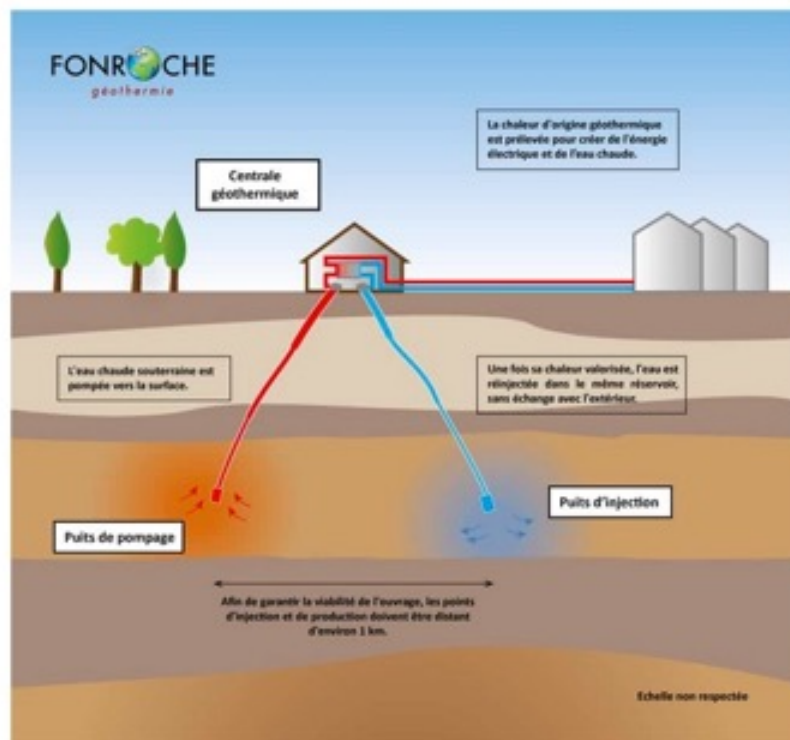


Schéma de doublet géothermique Fonroche Géothermie.

# Géothermie en Alsace



2018

[ACCUEIL](#) · [LE PROJET DE A À Z](#) · [LE PROJET EN ACTION](#) · [WEBCAM](#) · [INFORMATIONS](#) · [FAQ](#) · [QUI SOMMES NOUS ?](#) · [CONTACT](#)

## TESTS DU Puits : FORAGE TERMINÉE À 5408 M

La campagne de tests portant sur le débit et la température de l'eau disponible bat son plein. Le Forage est terminé à 5408 m. Une première étape vient d'être franchie de façon satisfaisante. Les mesures recueillies sont positives à ce stade. Prochaine étape : le remplacement de l'appareil de forage durant la mise au repos du puits. Durant cette période, l'outil de forage utilisé pour cette première étape va être remplacé par celui développé spécifiquement par Fonroche Géothermie et son partenaire industriel Herrenknecht. Les investigations prévues au programme et le forage du deuxième puits du doublet (circuit de retour de l'eau vers sa source) reprendront au mois de mai 2018. Le début du forage du 2ème puits commencera en juin 2018.

*La Webcam sera interrompue pendant quelques semaines le temps de remontage de l'appareil de forage. Veuillez nous en excuser.*

Copyright © 2019 · Mentions légales · Plan du site

### NOS PARTENAIRES





# Géothermie en Alsace

**2019**

29/01/2019 à 09:17



# Géothermie en Alsace





# Géothermie en Alsace



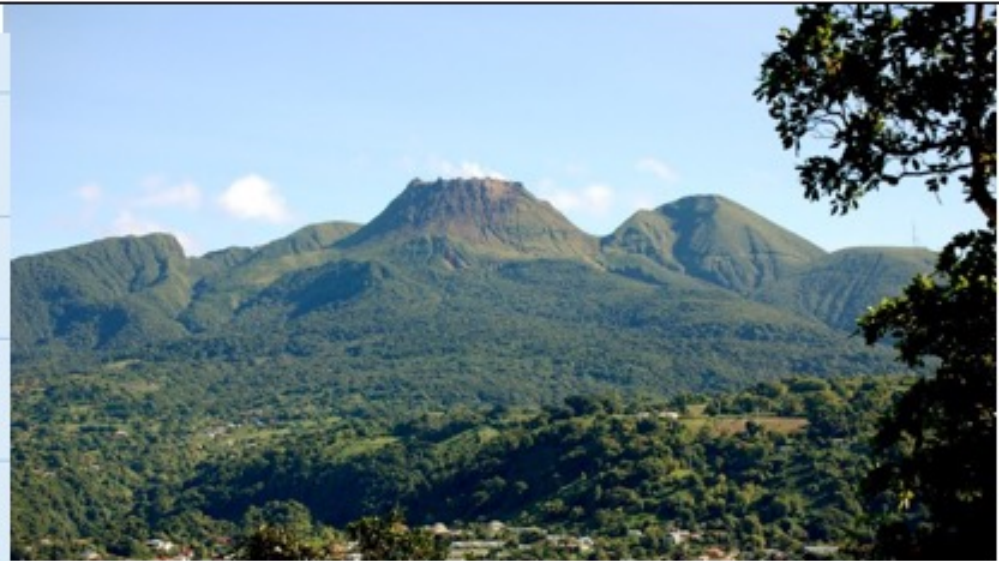
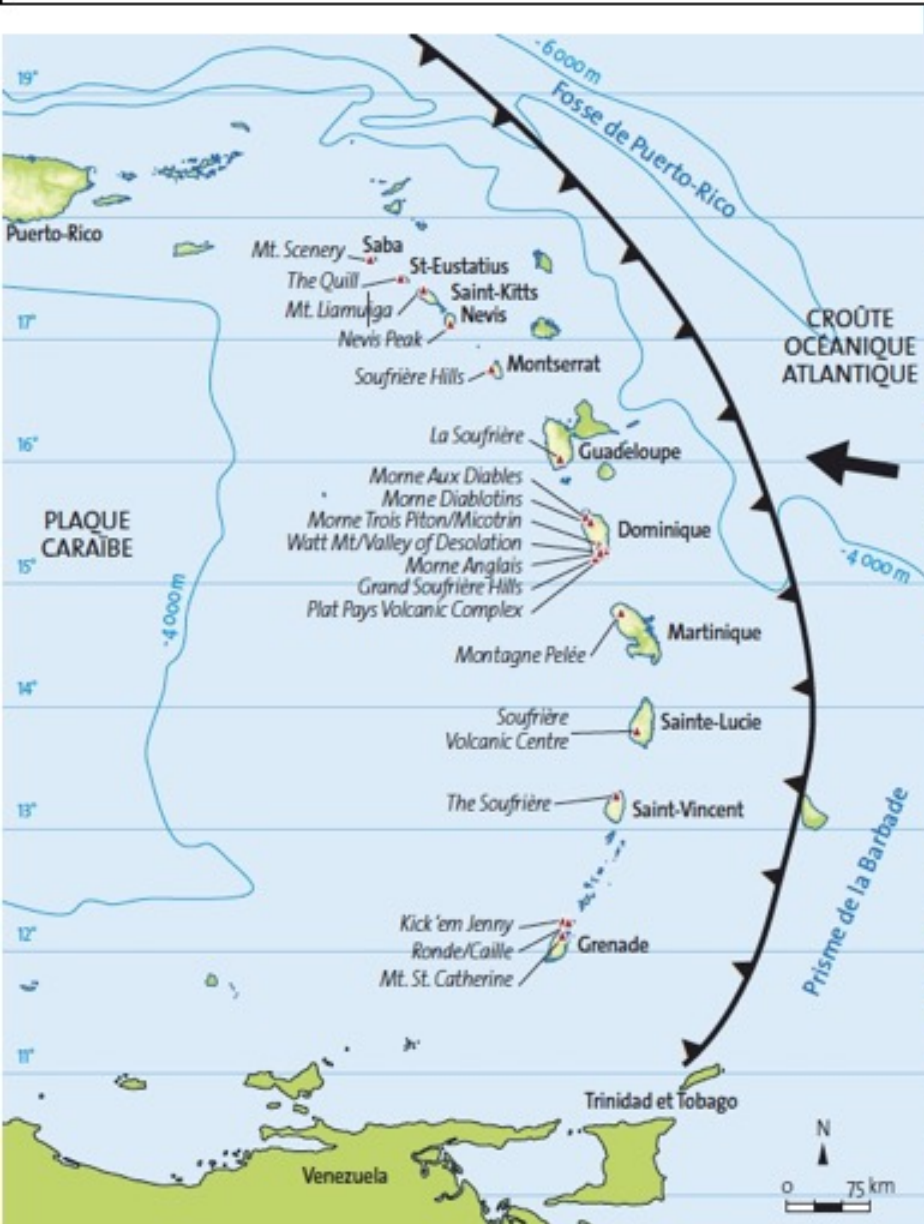


# Géothermie en Alsace





# Géothermie aux Antilles



Soufrière, Guadeloupe



Montagne Pelée, baie de Saint-Pierre, Martinique

# La centrale de Bouillante en Guadeloupe



Baie de Bouillante

## Principales caractéristiques

- **Bouillante 1 (1986, BRGM + EDF) :**
  - Profondeur du puits : 350 m
  - Température : 250 °C
- **Bouillante 2 (2005) :**
  - Profondeur des puits : 1000 à 1150 m
  - Température : 250 °C
- **Bouillante 1 et 2 : 9 % de la consommation électrique de la Guadeloupe (30 + 72 GWh)**



# La centrale de Bouillante en Guadeloupe



Figure 7 : Photographie aérienne de l'usine géothermique implantée dans le bourg de Bouillante avec l'unité Bouillante 1 (bâtiment de gauche), l'unité Bouillante 2 (bâtiment de droite), la localisation du puits BO-2, et la rue Vanier qui borde le site à l'est. *La zone retenue pour implanter les nouveaux forages est située à droite de la Rue Vanier et est indiquée par l'étoile rouge.*



# La centrale de Bouillante en Guadeloupe





# La centrale de Bouillante en Guadeloupe

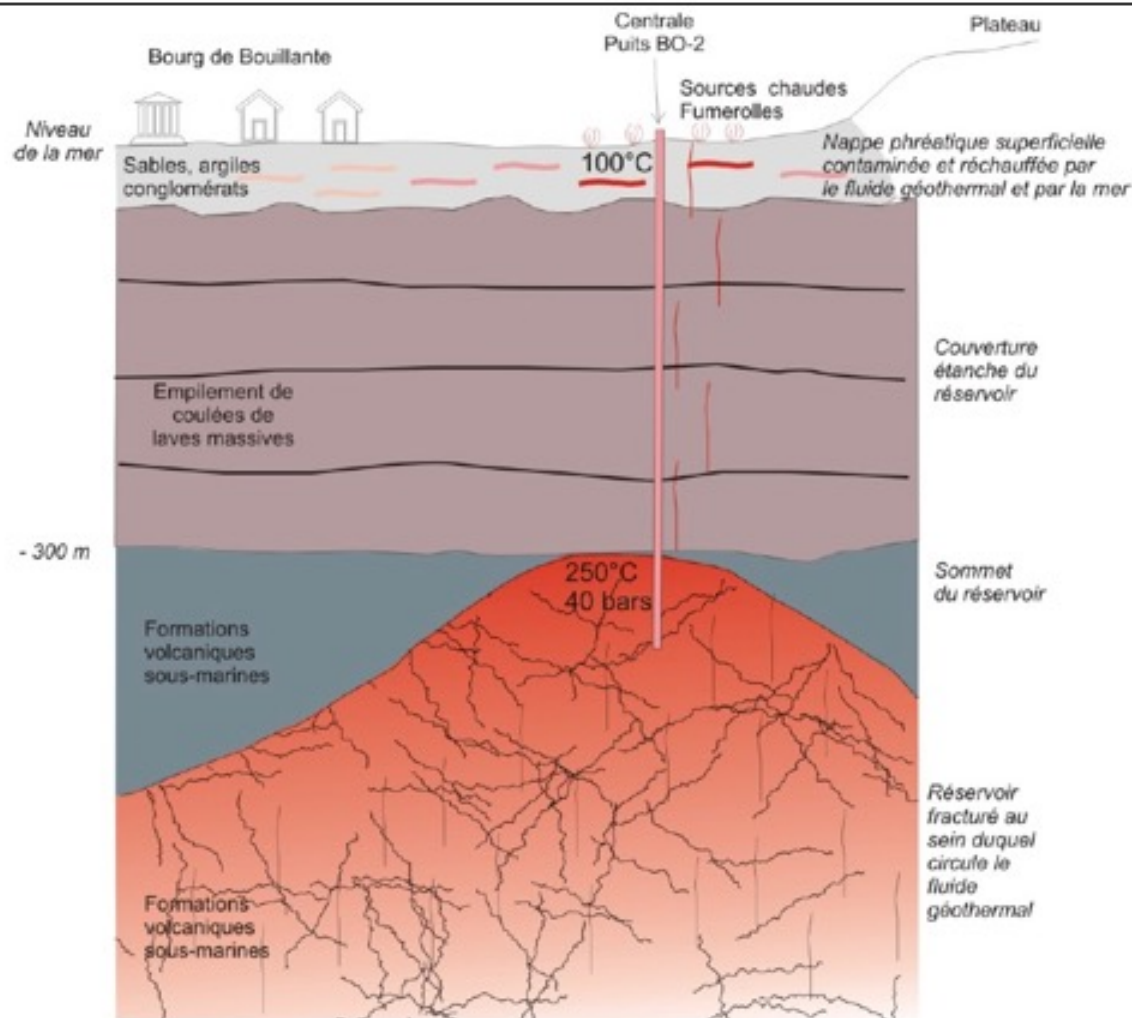


Figure 3 : Représentation très simplifiée du réservoir géothermique à l'aplomb du bourg de Bouillante.

Le sommet du réservoir situé vers 300 m de profondeur est isolé de la surface par un empilement de coulées de laves massives qui joue le rôle d'une couverture étanche. Seules quelques fuites du fluide géothermal parviennent en surface en empruntant des fissures. Elles réchauffent la nappe phréatique superficielle qui alimente les sources chaudes et fumerolles connues dans le bourg de Bouillante depuis longtemps.

# Vente de Bouillante en 2016

## La seule centrale géothermique française a été vendue à une entreprise américaine

Par Loïc Chauveau le 19.07.2016 à 14h40, mis à jour le 19.07.2016 à 14h40

Ségolène Royal vient d'officialiser la vente de la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe à l'américain Ormat. C'était le seul moyen de sauver de la faillite une unité de production d'électricité propre dont EDF s'était désengagé.



Photo de la centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe), le 7 avril 2016. © HELENE VALENZUELA / AFP

**VOLCAN.** Le 5 juillet, Ségolène Royal a présidé à la signature du protocole de la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe. Au terme de cet accord, la société Ormat sise au Nevada rachète 60% des parts tandis que la Caisse de dépôt et consignation entre au capital pour 20%. Actionnaire historique, le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM) conserve 20% du capital. La seule centrale géothermique opérationnelle de France utilisant la chaleur d'un volcan va donc être gérée par un opérateur américain. " Mais c'était la meilleure solution possible compte tenu de l'absence d'industriel français de la géothermie à vouloir reprendre la centrale, explique Harry Durimel, Conseiller régional Europe-Ecologie les Verts (EE-LV) qui fut en charge du dossier énergie sous la présidence de Victorin Lurel. Pour moi, il est essentiel qu'un professionnel reprenne l'unité et la développe comme il l'a promis".

### Une centrale géothermique au service d'EDF

La vente pose d'innombrables questions. Construite dans les années 70 par EDF, Bouillante exploite les eaux des nappes phréatiques très chaudes situées en profondeur sous le volcan de la Soufrière. Cette centrale de 5MW sert alors de laboratoire à EDF non pas pour tester cette énergie renouvelable, non intermittente et à priori bon marché mais pour essayer en grandeur réelle les contrôles/commandes des centrales nucléaires. Présent dans l'aventure pour ses compétences géologiques, le BRGM a une toute autre ambition : cette énergie peut assurer l'indépendance électrique de la Guadeloupe, mais aussi des 8 îles de l'arc caraïbe. En 1995, le BRGM prend 60% de Bouillante, EDF le reste. C'est le début d'un lent désengagement de l'électricien. En 2005, c'est le BRGM qui prend l'essentiel des risques de création d'un Bouillante 2 portant à 10MW la puissance de la centrale, puis à 15MW en 2010. Les deux actionnaires ne s'entendent pas et EDF se retire définitivement en 2013. La centrale n'a donc plus d'opérateur. L'arrivée d'Ormat, un vrai professionnel de la géothermie, permet ainsi de sauver la centrale.



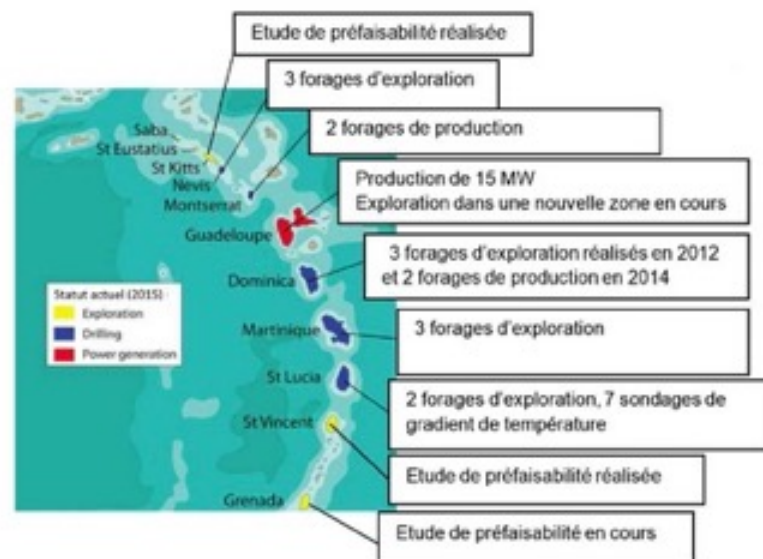
# Vente de Bouillante en 2016

## Dans les DOM, EDF choisit les énergies fossiles

**FUEL.** Et de laisser ouverte cette voie énergétique. Car EDF entretemps, a choisi de revenir dans la filière... thermique. Sa filiale Systèmes énergétiques insulaires (EDF SEI) a investi en effet 450 millions d'euros dans la centrale diesel du Jarry inaugurée le 14 juin 2015, soit deux mois avant l'adoption définitive de la loi sur la transition énergétique qui prévoit la fin de l'utilisation des énergies fossiles ! Officiellement, la centrale de 212MW doit permettre de sécuriser l'approvisionnement de l'île pendant que les énergies renouvelables vont monter en puissance. Vent et solaire ne couvrent en effet aujourd'hui que 18% des besoins de l'île. Mais en réalité, on voit mal comment un investissement aussi important pourrait s'arrêter de fonctionner dans 15 ans, quand, au terme de la loi, la Guadeloupe devra arrêter de brûler du fuel. Interrogé sur ce point dans un colloque organisé au Sénat, le directeur d'EDF SEI, Frédéric Busin, a évité de répondre à cette question. *"EDF l'a joué fine en imposant sa solution juste à temps, note Harry Durimel. Mais c'est très dommageable car désormais les investissements en énergie renouvelable ne sont plus aussi urgents et surtout l'éolien et le solaire vont avoir du mal à être compétitif puisque l'électricité issue du fuel est subventionnée"*. Par souci d'égalité territoriale, le tarif de vente de l'électricité dans les Départements d'Outremer est en effet le même qu'en métropole, bien que la production soit beaucoup plus chère. Cette "Contribution au service public de l'électricité" (CSPE) représente la moitié du chiffre d'affaires d'EDF dans les DOM. C'est surtout une subvention aux énergies fossiles responsables du réchauffement climatique.

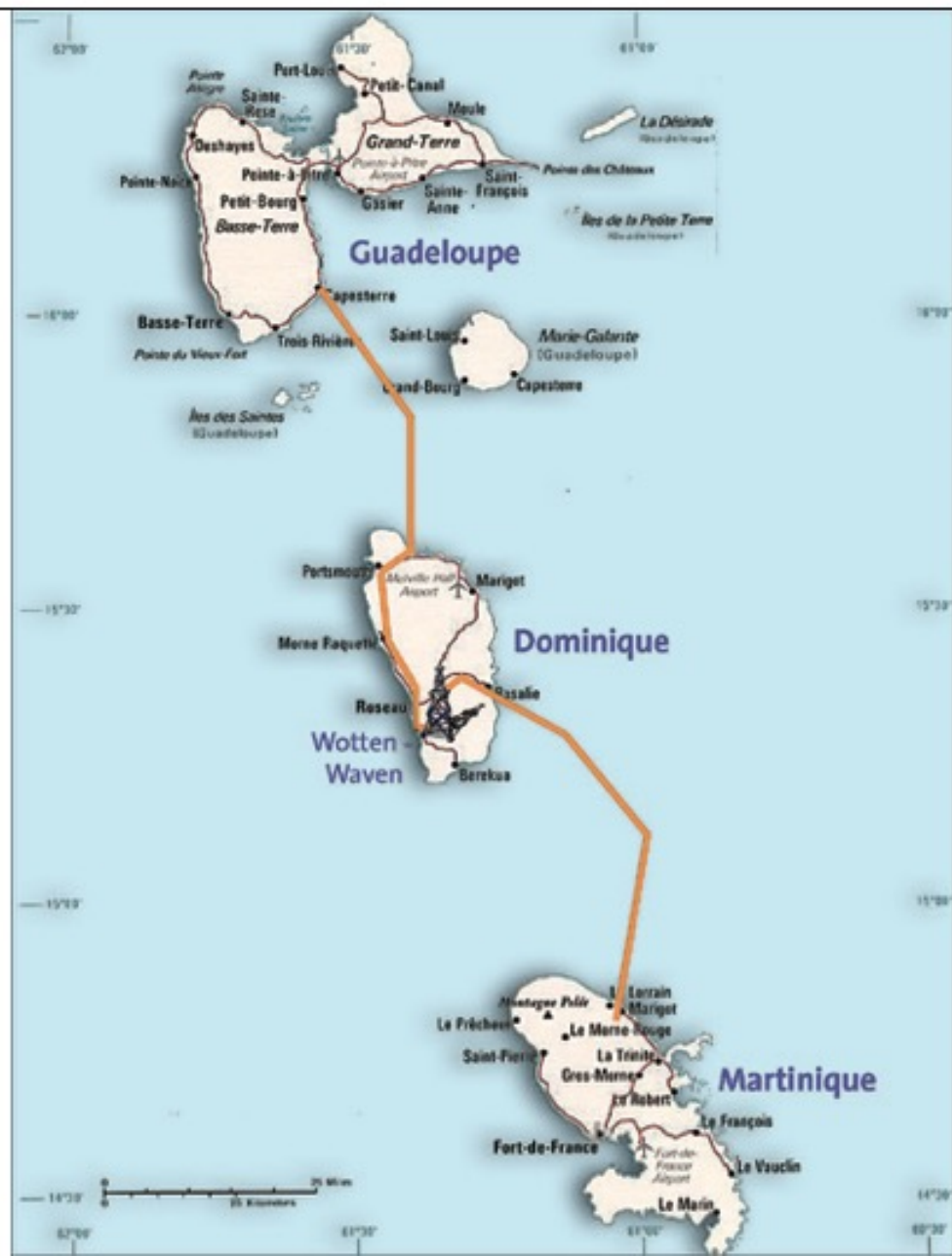
## La Caraïbe a un énorme potentiel géothermique

**CONNECTION.** C'est d'autant plus dommageable que la géothermie a largement le potentiel de répondre à la demande de la Guadeloupe et des îles voisines. En septembre 2015, le bureau d'études Terranov a rendu un rapport sur le potentiel géothermique dans les Caraïbes dans le cadre d'un programme européen. Selon ce rapport approuvé par les services de l'Ademe, de 50 à 70% de l'électricité nécessaire à ces îles volcaniques pourrait être fournie par la géothermie. Les forages qui commencent à être effectués sur les caraïbes montrent un potentiel très important. *"Si Ormat arrive en Guadeloupe, c'est certainement pour développer Bouillante, mais c'est aussi et surtout pour installer des centrales dans toute la région et il est bien dommage alors que nous avons deux départements français ici, de ne pas en avoir profité pour développer une filière géothermique française"*, regrette Philippe Laplaige, spécialiste de la géothermie à l'Ademe.



Les forages d'exploration se multiplient dans les Caraïbes avec de réels espoirs d'autonomie énergétique. Copyright Terranov

# Géothermie Antilles



Le projet d'interconnexion électrique inter-îles Dominique-Antilles françaises par câbles sous-marins avec production d'électricité par géothermie en Dominique





Pico, Açores





# Géothermie aux Açores (dorsale médio- Atlantique)



# Le champ géothermique de Larderello

Années 50'



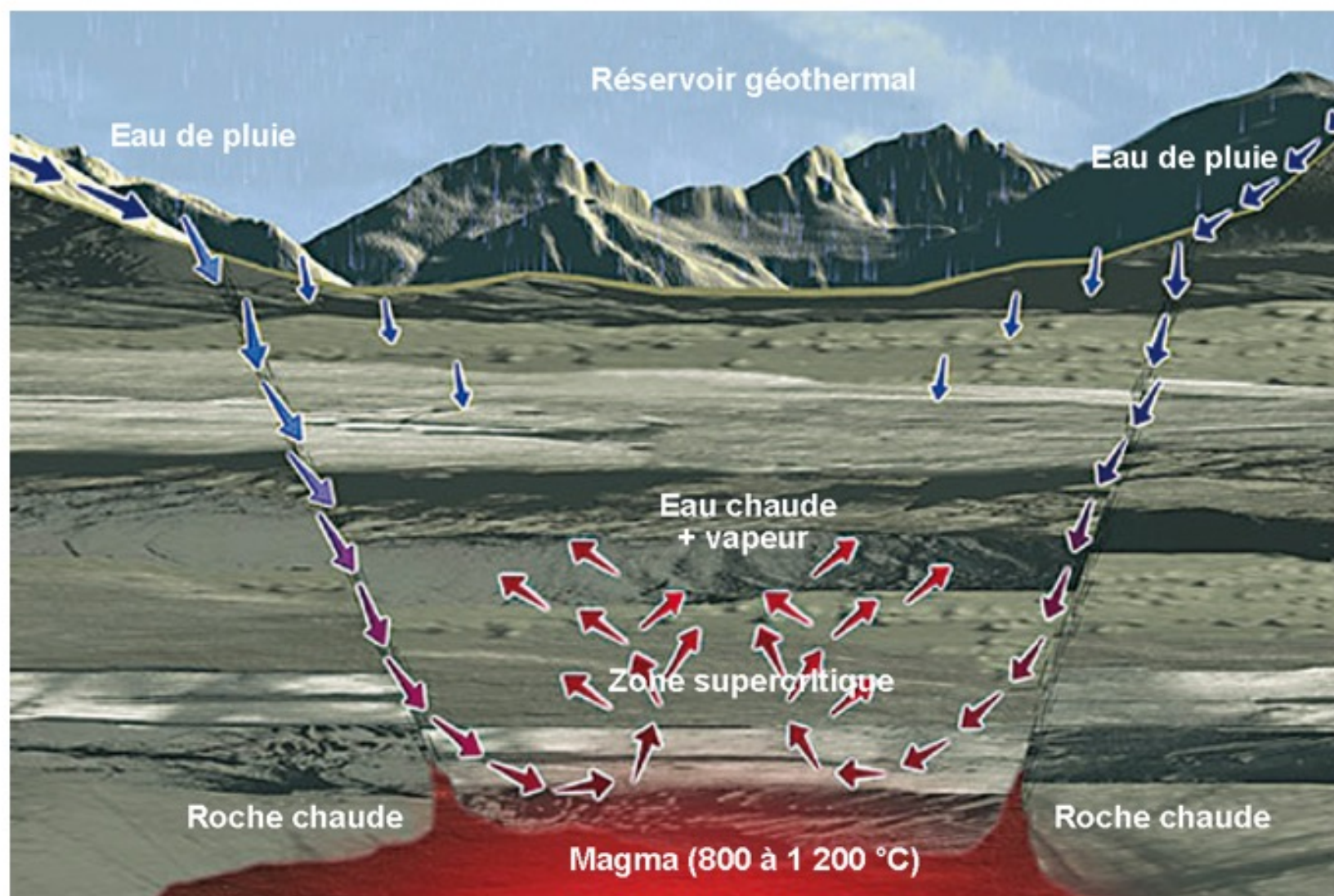
Aujourd'hui



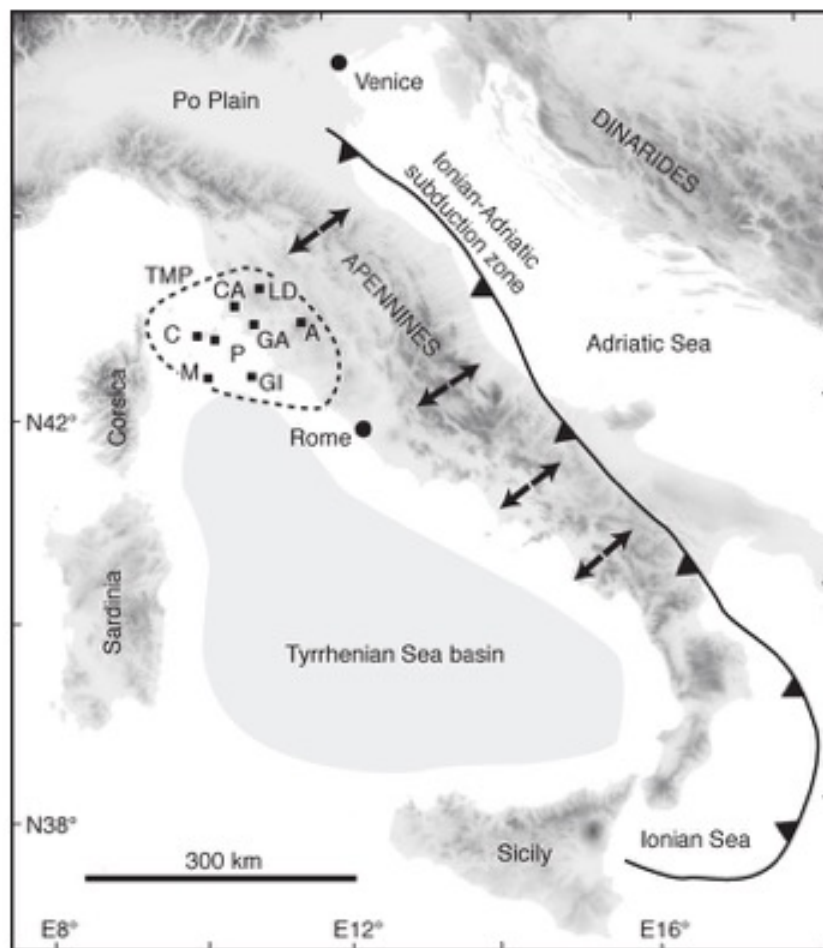
- Région nommée en 1846 en l'honneur de François Larderel qui développa l'activité industrielle au début du 19<sup>ème</sup> siècle
- Production d'énergie électrique pionnière au début du 20<sup>ème</sup> siècle
- Puissance en 2001 de 728 MW, 2% de la production de l'Italie
- Fluide = vapeur d'eau (+ gaz) entre 150 et 260°C, produite par eaux météoriques qui s'infiltrèrent et sont chauffées au contact des granites mis en place depuis 6 Ma, puis remontent le long des failles normales
- Contexte géodynamique original



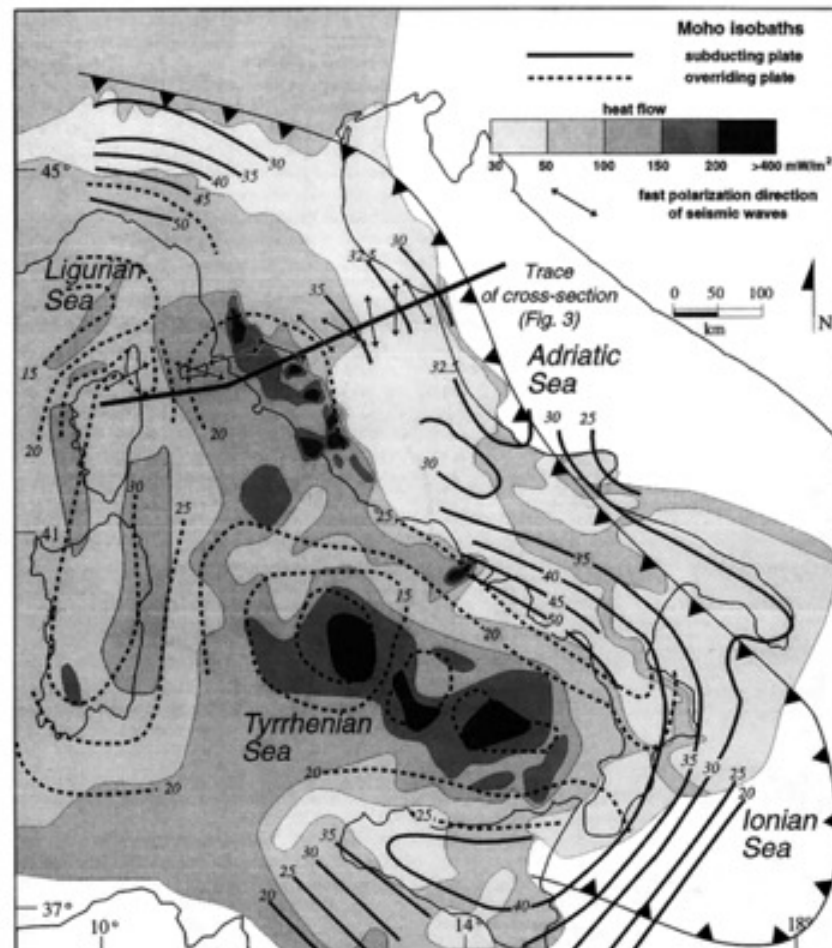
# Principe du réservoir géothermique



# Contexte géodynamique de Larderello



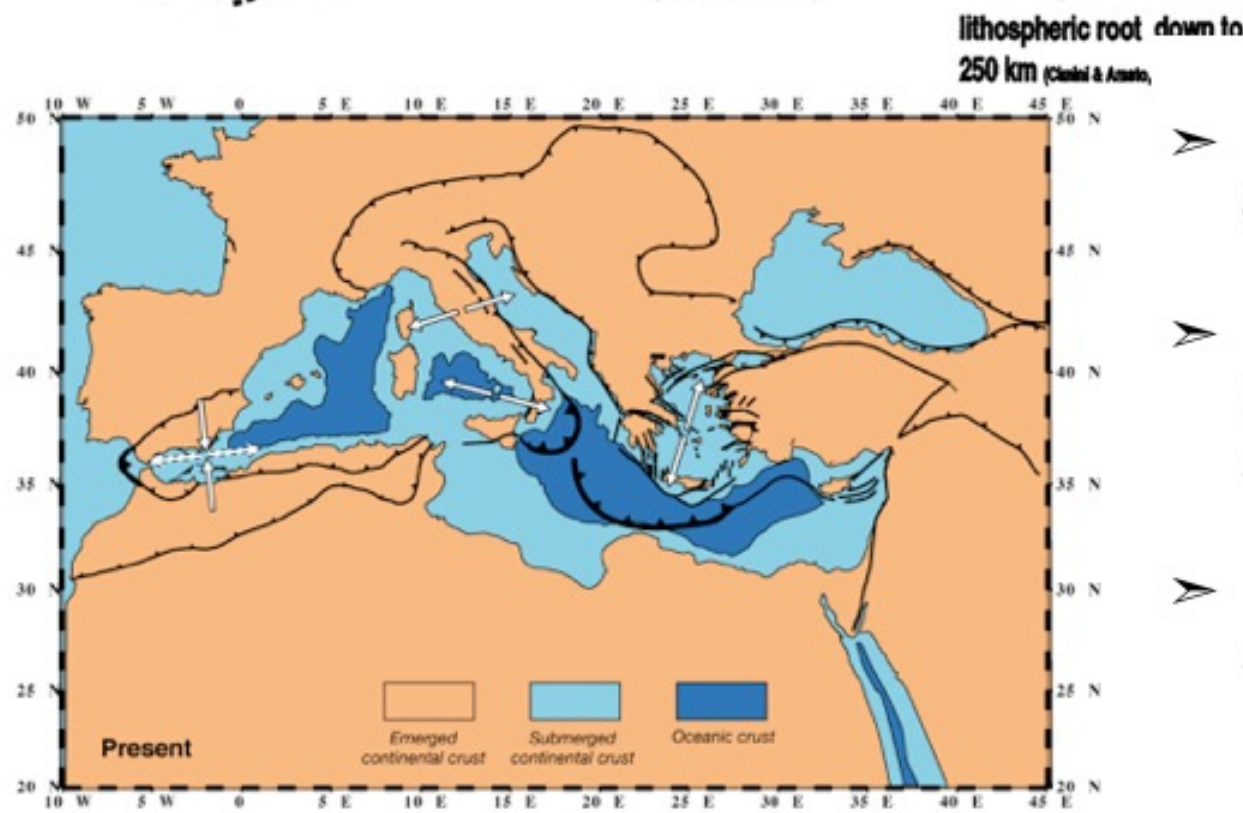
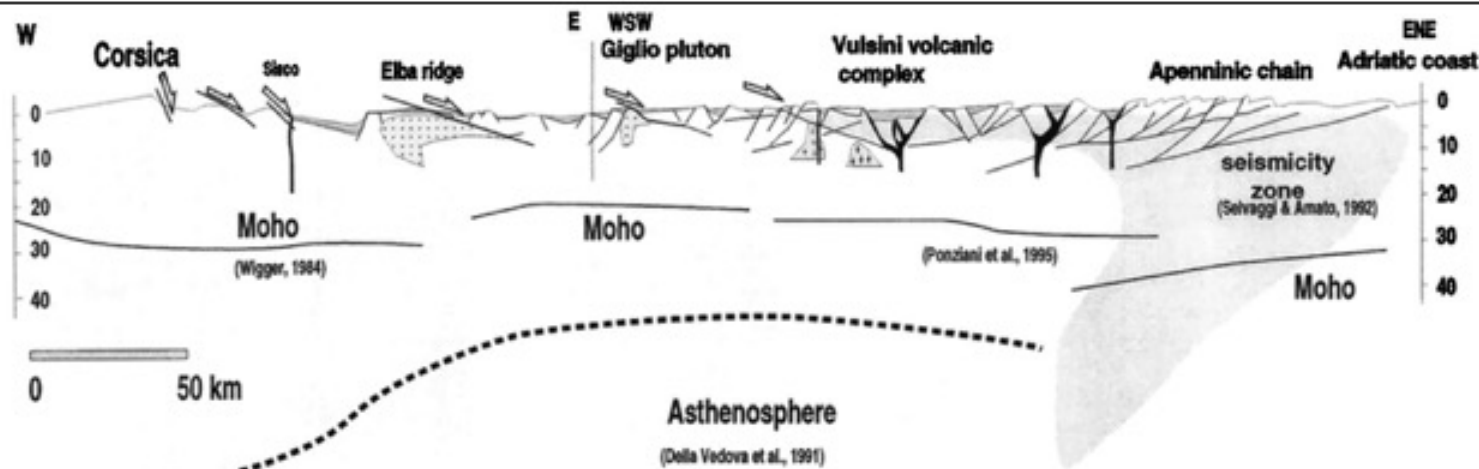
Localisation des granites de Toscane (Elbe, Giglio, Larderello).  
Les flèches montrent l'extension active à 2-3 mm/an dans les Apennins  
Smith et al., 2011



Flux de chaleur et isobathes du Moho en mer Tyrrhénienne. Au nord, le flux élevé est associé à une croûte continentale amincie (20 km), au sud il est associé à de la croûte océanique.  
Jolivet et al., 1998

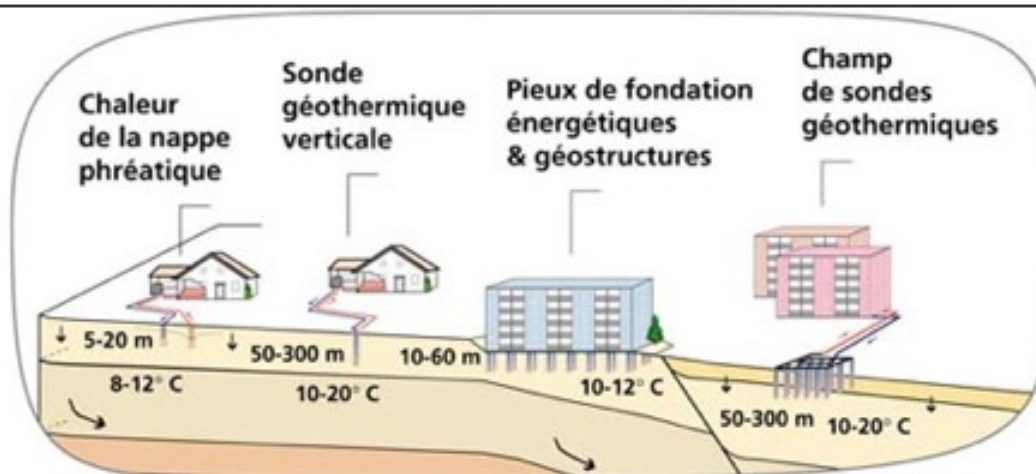


# Contexte géodynamique de Larderello



- Extension post-orogénique
- Ouverture de bassins arrière-arc
- Recul du slab africain

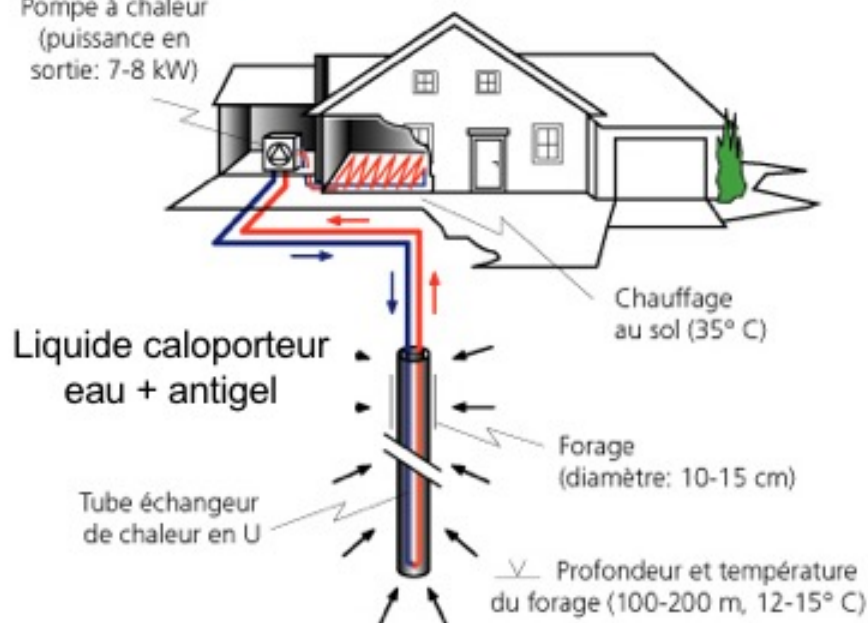
## 2.3. La géothermie très basse température



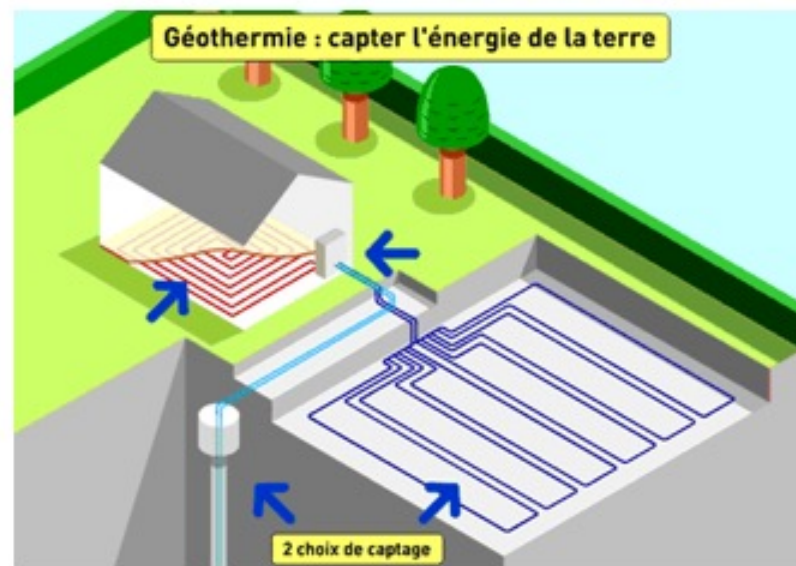
Echangeurs géothermiques à très basse température



Pompe à chaleur (puissance en sortie: 7-8 kW)



Sonde géothermique verticale



Capteurs horizontaux



# Géothermie de surface

Une énergie performante et durable  
pour les territoires

6 bonnes  
raisons de  
choisir la  
géothermie



Avec le soutien de :



## RAISON 1 Le choix d'une facture énergétique maîtrisée

### Des coûts d'exploitation stables et réduits



Emissions de CO<sub>2</sub>/an

-744 t

Coût de fonctionnement/an

-52,5 %

#### TEMOIGNAGE

#### Centre Aquatique de Saint-Amand-les-Eaux (59)

« La géothermie affiche un coût de fonctionnement annuel de 60 995 € HT contre 131 065 € HT pour l'option chauffage gaz. Quant aux émissions annuelles de CO<sub>2</sub>, elles sont de 56 tonnes pour une PAC et de 800 tonnes par an avec un chauffage au gaz. La solution géothermique est donc très intéressante sur le plan économique comme sur celui du respect de l'environnement. »

Franck BAUDOUX, Directeur Général de la S.P.L. du Centre Aquatique Intercommunal de l'Amandinois

Usage	Assure les 2/3 des besoins de chaleur de locaux de 3 462 m <sup>2</sup> dont 975 m <sup>2</sup> d'eau (2 bassins). L'eau prélevée alimente une partie des bassins.
Installation achevée en 2016	3 forages sur aquifère (2 de pompage, 1 de réinjection) à 40 m de profondeur. Le COP de la PAC est de 4,25.
Coûts d'investissement	275 000 € de surcoût lié à la géothermie.
Coûts de fonctionnement (annuel)	60 995 € HT dont 11 700 € d'entretien et 45 200 € d'électricité pour la PAC. 70 570 € HT d'économie annuelle par rapport à une solution gaz (en option, pas de réseau de gaz de ville).
Temps de retour sur investissement	4 ans.
Gain environnemental	744 tonnes équivalent CO <sub>2</sub> évitées par an.

Comparée aux énergies conventionnelles (gaz, électricité, fioul), la géothermie demande un investissement initial supérieur (coût des échangeurs enterrés notamment). En revanche, ses coûts d'exploitation sont réduits. Ils se composent des coûts d'entretien de l'installation et de la consommation d'électricité de la pompe à chaleur (PAC) et de ses auxiliaires.

On considère en moyenne que pour 1 kWh électrique consommé par la pompe à chaleur (PAC), 4 kWh thermiques sont restitués. Le rapport entre ces deux valeurs est le coefficient de performance (COP). Il est estimé en moyenne à 4. Le budget de fonctionnement affiche ainsi une réduction des trois quarts de la facture énergétique.

Cette moindre dépendance à l'énergie fossile se traduit aussi par une stabilité des coûts. La facture énergétique de bâtiments alimentés par du gaz, de l'électricité ou du fioul sera financièrement fortement impactée par l'évolution du prix des énergies traditionnelles. Cela aura moins de conséquences pour une installation géothermique, dont environ les trois quarts des besoins thermiques sont couverts par une énergie gratuite et locale prélevée dans le sous-sol. La visibilité financière ainsi obtenue rend la planification plus aisée.

(1) Certaines pompes à chaleur fonctionnent au gaz, mais cela reste marginal.

## RAISON 2 Le choix de l'exemplarité environnementale



### Une énergie verte

On considère que les installations de géothermie de surface rejettent, en moyenne, moins de 45 g de CO<sub>2</sub> par kWh de chauffage (émissions associées à la consommation électrique de la pompe à chaleur).

**C'est environ 4 fois moins que l'électricité, 5 fois moins que le gaz naturel et 7 fois moins que le fioul pour satisfaire un même besoin de chauffage.**

Disponible localement, la géothermie de surface n'implique pas de transport. En effet, la géothermie, par nature, est consommée là où elle est produite. Ce sont donc autant d'émissions de CO<sub>2</sub> et de particules fines qui sont évitées. Cela en fait un véritable atout pour la qualité de l'air des territoires.

Son usage, encadré par la réglementation et mis en œuvre par des professionnels qualifiés, se fait dans le respect de l'environnement et de la biodiversité, dans le sous-sol et en surface.

Cette énergie renouvelable contribue au déploiement des Bâtiments Bas Carbone (BBCA) et de Haute Qualité Environnementale (HQE).

(5) Hypothèse d'un COP de 4. Valeurs pour kgCO<sub>2</sub>/kWh issues de la base de données carbone de l'ADEME.

\* électricité usage chauffage 2016 : 0,169 kgCO<sub>2</sub>/kWh,

\* gaz naturel : 0,244 kgCO<sub>2</sub>/kWh PCI,

\* fioul : 0,112 kgCO<sub>2</sub>/kWh PCI.

### Résidence Grand Pareil, éco-hameau des Boisses, Tignes 1800 (73)

« Nous avons choisi la géothermie parce que c'est une énergie renouvelable. Elle nous fait éviter 90 tonnes d'émission de CO<sub>2</sub> par an. Elle nous apparaît comme la meilleure source de chaleur en montagne, notamment parce que :

- nous tenons à limiter le trafic routier, qui produit des émissions importantes de gaz à effet de serre et engorge les routes en saison hivernale. Ainsi, un approvisionnement en fioul, gaz ou bois n'est pas souhaitable. Pour une cuve de 5 000 litres il faut compter 7,5 livraisons par an. La géothermie a l'avantage d'utiliser la ressource sur site.
- l'accumulation de la neige sur les toits et la présence de masques solaires importants rendent l'option intéressante du solaire plus difficile en montagne.

L'expérience de cette première opération nous permet d'en préparer une seconde. »

Baptiste AUBAILLY,

Chief de projets à la Société d'Aménagement de la Savoie

Usage	Chauffage de 32 logements (2 341 m <sup>2</sup> de surface de plancher). Besoins estimés à 308 MWh/an.
Installation achevée en 2015	PAC raccordée à 36 sondes géothermiques de 100 m de profondeur, appoint électrique PAC : 130 kW de puissance, COP de l'ordre de 3.
Coûts d'investissement	Liés à la géothermie : 180 000 € pour les forages et 90 000 € HT pour la chaufferie. 60 000 € de subvention de l'ADEME.
Temps de retour sur investissement	Estimé à 15 ans par rapport à une solution fioul avec subvention.
Gain environnemental	90 tonnes équivalent CO <sub>2</sub> évitées par an.

Données techniques : Rens. MOLLIER-PIERRET, Directeur de l'entreprise Westhaug

## RAISON 4 Le choix d'une énergie adaptable pour anticiper les futurs défis

### Relever le défi de l'augmentation des températures : du froid/frais quasi-gratuit

La France fait face à des étés de plus en plus chauds. En effet, en 2017 et 2018, de nombreux centres urbains ont subi des vagues de chaleur jamais enregistrées depuis le début des mesures en 1872, en atteignant des températures supérieures à la normale de 1,5 °C. Les besoins en climatisation/rafraîchissement augmentent ainsi rapidement.



Pour construire aujourd'hui des bâtiments qui répondront aux exigences de demain et favoriser le confort, la géothermie est une énergie renouvelable particulièrement adaptée : elle produit du froid actif (avec une pompe à chaleur réversible) ou du frais (par géocooling) à un prix très compétitif. Sous réserve de disposer d'émetteurs adaptés, c'est le même système géothermique, équipé d'une pompe à chaleur réversible, qui produit du froid actif et du chaud. Avec le géocooling, 1 kWh d'électricité consommée<sup>(1)</sup> peut produire jusqu'à 50 kWh de frais !

Cette production de froid ou de frais permet d'éviter l'utilisation de climatiseurs, fortement consommateurs d'électricité et qui contribuent, par leurs rejets d'air chaud, aux phénomènes d'îlots de chaleur.

(1) La pompe à chaleur ne fonctionne pas, ce sont des équipements secondaires, le circulateur et la pompe hydraulique, qui sont actifs.

### Théâtre de l'Archipel, Perpignan (66)

« La Ville de Perpignan a choisi de climatiser les salles du Théâtre de l'Archipel dans le but essentiel de préserver un confort pour les spectateurs, mais aussi de prévenir le réchauffement climatique dont l'évocation lors des études va en s'amplifiant aujourd'hui et cette anticipation nous rassure. D'autant que le choix de la géothermie repose sur la proximité de nappes phréatiques qui a permis de forer avec un débit et une température régulés. »

Michel RAMONET, Directeur,

Direction travaux neufs patrimoine bât. Mairie de Perpignan

Usage	Chauffage et rafraîchissement de deux salles de spectacle (1100 et 1000 places), d'un plateau de répétition, d'un bâtiment administratif, d'une verrière pour l'accueil du public et d'un bâtiment technique. Estimation de la consommation annuelle de chauffage : 275 MWh, de froid : 252 MWh.
Installation achevée en 2011	Deux forages sur aquifère (16 m de profondeur). Deux PAC de 280 kW de puissance.
Coûts d'investissement	Liés à la géothermie : 680 000 €.

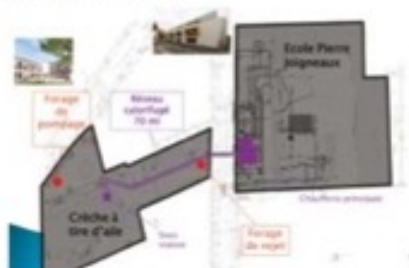


# Le choix d'une énergie qui s'intègre harmonieusement à son environnement

## Une énergie renouvelable économe d'espace

Au moment des travaux de forage, le terrain doit être accessible et dégagé. Une fois les forages réalisés, le chantier peut faire place à un jardin ou à des constructions. Le local technique nécessaire au fonctionnement des installations est restreint. Aucun espace de stockage n'est requis et en l'absence d'approvisionnement extérieur, cela ne génère pas de trafic supplémentaire. L'occupation foncière de la géothermie, fort réduite, lui permet, en milieu urbain dense notamment, d'être une énergie renouvelable décisive pour l'obtention des labels BBCa et HQE.

Localisation de l'installation



Usage	Production de chaleur mutualisée pour deux équipements : l'école Pierre Jolibois (4 500 m² depuis 2015) et la Maison de la Petite Enfance Pasteur / A.Tire d'Air (environ 1 000 m² / réfection prévue en 2020)
Installation achevée en 2016, seconde phase en 2020	2 forages de 50 m (production à 13°C et réinjection à 8°C) sur aquifère, une installation technique en sous-sol
Coûts d'investissement	Surinvestissement géothermie : 295 500 € par rapport à une solution de référence 100 % gaz. Subventions ADEME : 40 800 €, Région Ile-de-France : 79 800 €

### TEMOIGNAGE

## Ecole et maison de la petite enfance à Bois-Colombes (92)

« La géothermie sur nappe à faible profondeur était la seule énergie renouvelable exploitable sur Bois-Colombes du fait de sa forte densité urbaine. La présence d'un aquifère à - 50 mètres a limité les montants financiers des forages et la technique du doublet d'équipements a permis de lisser les surcoûts d'investissement par rapport aux énergies fossiles, sur deux opérations. Ce choix reste un pari sur l'avenir et réclame une forte volonté politique et écologique, les retours d'expérience étant encore peu nombreux. Il faut s'entourer de spécialistes à la fois en géologie mais aussi en ingénierie thermique (descriptions détaillées des installations dédiées et de l'entretien du système en phase exploitation).

Yves RÉVILLON,  
Maire de Bois-Colombes-Vice-Président du  
Département des Hauts-de-Seine

## Une énergie discrète

Une fois les travaux réalisés, la géothermie est discrète : sous terre, elle est invisible. Elle ne produit ni bruit, ni odeur. Elle est particulièrement adaptée aux bâtiments patrimoniaux, mais aussi à ceux pour lesquels l'esthétisme, le calme et le confort sont importants.



Complexe sportif de Combouy © Coquard-Cadex, Charente



Halle aux grains de Bois-Colombes © S&L, Région Centre-Val de Loire



La Grande Pisserolle, Saint-Arnaud © Architecture Studio



Théâtre des Célestins, Lyon - Grande salle © Roman Soti



Collège des Bernardins, Paris © Laurence de Taffine

## RAISON 3 Le choix de la promotion des ressources locales

### Une énergie disponible en permanence sur presque tout le territoire

La géothermie de surface est une énergie disponible en continu presque partout.

D'un point de vue réglementaire, la réalisation d'une installation nécessite une simple déclaration sur environ 88 % du territoire métropolitain (zones « verte » +), accompagnée dans certains cas d'un avis d'expert agréé (zones « orange » +, environ 10 % du territoire<sup>(1)</sup>). Pour des raisons liées aux caractéristiques du sous-sol<sup>(2)</sup>, une autorisation administrative est nécessaire sur moins de 2 % du territoire (zones « rouge » +).

Au-delà des aspects réglementaires<sup>(3)</sup>, qui attestent de la volonté administrative de faciliter le recours à la géothermie de surface, le bon dimensionnement de l'installation nécessite de connaître la ressource géothermique. Des cartes d'estimation de ressources et de potentiels sont disponibles en ligne ([www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr)) et permettent une première approche, sur un point donné ou sur un territoire plus large, qui sera ensuite poursuivie par l'expertise de bureaux d'études. L'objectif est de faciliter les réalisations opérationnelles.

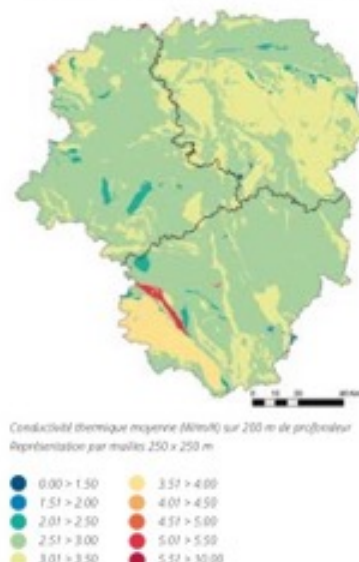
### Une énergie de mon territoire pour mon territoire

La géothermie est une énergie locale. Elle n'implique donc pas de transport, pas de gestion de stocks. En s'émancipant des énergies fossiles, elle favorise l'indépendance énergétique des territoires. Elle mobilise les talents locaux : bureaux d'études, foreurs, installateurs... et contribue à l'emploi de proximité. La géothermie est l'occasion de rappeler que les potentiels d'un territoire ne s'arrêtent pas en surface et comprennent aussi l'usage de son sous-sol.

Carte réglementaire nationale de la géothermie de minime importance sur nappe



Atlas régional des ressources du Limousin (sur sondes)



TEMOIGNAGE

### Siège de la Communauté des Communes de la Région de Suippes (51)

« La Communauté des Communes a engagé un programme d'investissement important comprenant la construction de deux écoles, de son siège et projette une extension de la maison de retraite.

En l'absence de réseau de gaz, le choix du mode de chauffage s'est très rapidement orienté vers des systèmes géothermiques. La décision a été prise considérant les nombreux avantages de la solution :

- maîtrise de la technologie par des artisans locaux facilitant l'installation, l'entretien et la maintenance ;
- énergie locale donc absence de problème et de gestion des approvisionnements ;
- confort et facilité d'usage ;
- maîtrise du coût de fonctionnement ;
- réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ;
- retour rapide sur investissement »

Emmanuel JACQUEMIN, Directeur général des services, Communauté des Communes de la Région de Suippes

Usage	Chauffage d'un bâtiment RT 2012 d'une surface de 1134 m <sup>2</sup> . Besoins thermiques estimés à 147 MWh/an.
Installation achevée en 2011	15 sondes verticales de 100 m de profondeur espacées de 18 m, PAC de 78 kW de puissance avec un COP de 3,7.
Coûts d'investissement	Liés à la géothermie : 118 620 € (forage, PAC, monitoring). 46 680 € de subvention ADEME.

(1) Environ 95 % des dossiers traités en zone orange reçoivent des suites favorables.

(2) Neuf critères relatifs aux caractéristiques du sous-sol (aquifères, cavités, mouvements de terrain, pollution...) sont pris en compte.

(3) Pour une vision complète de l'encadrement normatif et réglementaire de la géothermie de surface, voir <http://www.geothermie-perspectives.fr/encadrement-norme-cadre-reglementaire-geothermie-minime-importance>.



# Classification des systèmes géothermaux

## GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE

Chauffage de piscines, de serres... Bien qu'elle présente une faible température, l'eau peut directement être utilisée pour le chauffage de piscines, serres ou bassins de pisciculture.

Chauffage par pompe à chaleur. La température de l'eau insuffisante pour le chauffage direct de locaux, nécessite de recourir à des pompes à chaleur sur eau souterraine ou à des sondes géothermiques.

Chauffage de maisons individuelles. Les calories nécessaires au chauffage sont prélevées par un dispositif associant une pompe à chaleur à un capteur enterré dans le sous-sol superficiel.

## GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

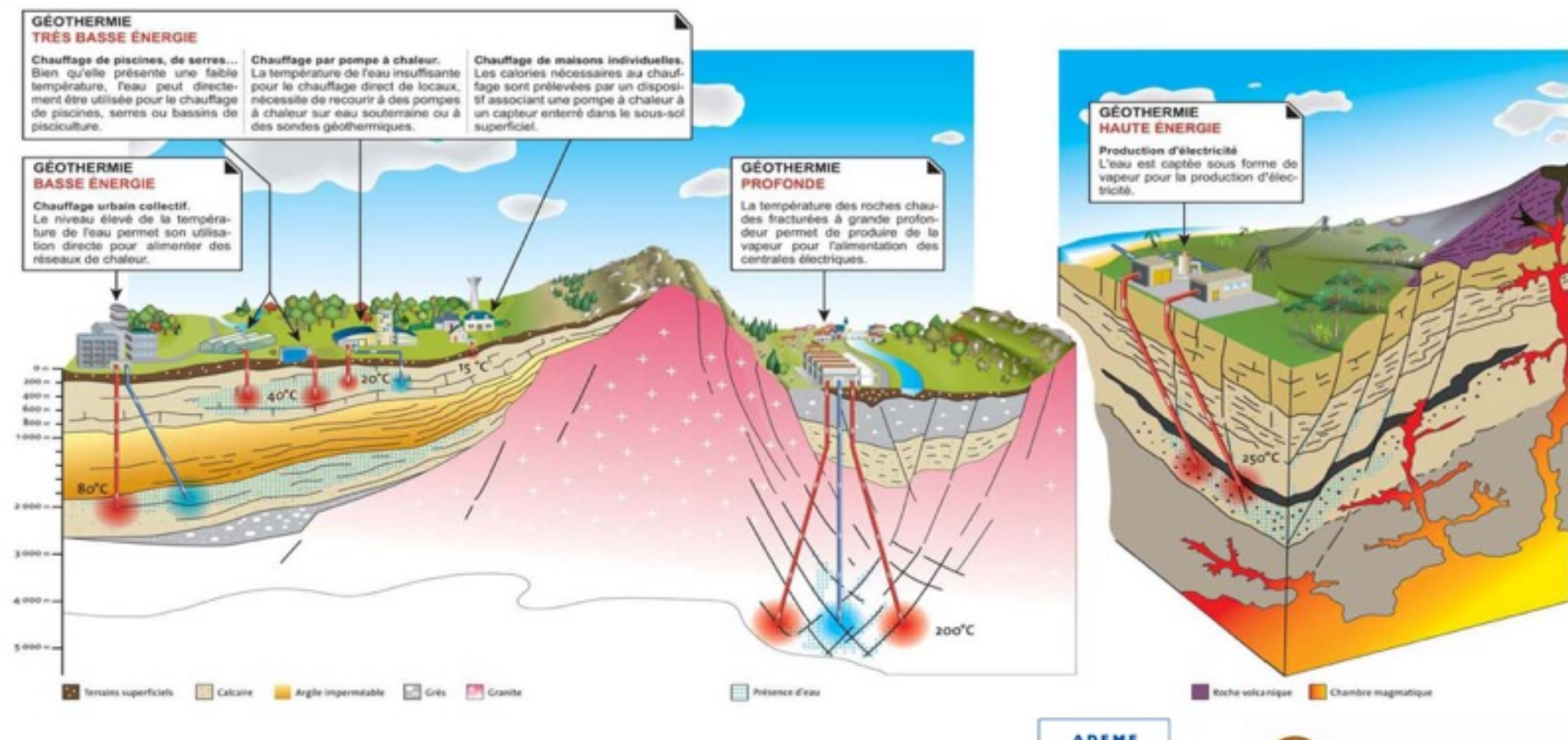
Chauffage urbain collectif. Le niveau élevé de la température de l'eau permet son utilisation directe pour alimenter des réseaux de chaleur.

## GÉOTHERMIE PROFONDE

La température des roches chaudes fracturées à grande profondeur permet de produire de la vapeur pour l'alimentation des centrales électriques.

## GÉOTHERMIE HAUTE ÉNERGIE

Production d'électricité. L'eau est captée sous forme de vapeur pour la production d'électricité.



- contexte géologique (bassin sédimentaire, zone volcanique ou tectonique)
- absence ou présence de fluide (vapeur, eau)
- usage : électricité, chauffage urbain, pisciculture, serres, piscines
- température (haute, basse et très basse énergie)

# Classification des systèmes géothermaux

## GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE

Chauffage de piscines, de serres... Bien qu'elle présente une faible température, l'eau peut directement être utilisée pour le chauffage de piscines, serres ou bassins de pisciculture.

Chauffage par pompe à chaleur. La température de l'eau insuffisante pour le chauffage direct de locaux, nécessite de recourir à des pompes à chaleur sur eau souterraine ou à des sondes géothermiques.

Chauffage de maisons individuelles. Les calories nécessaires au chauffage sont prélevées par un dispositif associant une pompe à chaleur à un capteur enterré dans le sous-sol superficiel.

## GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

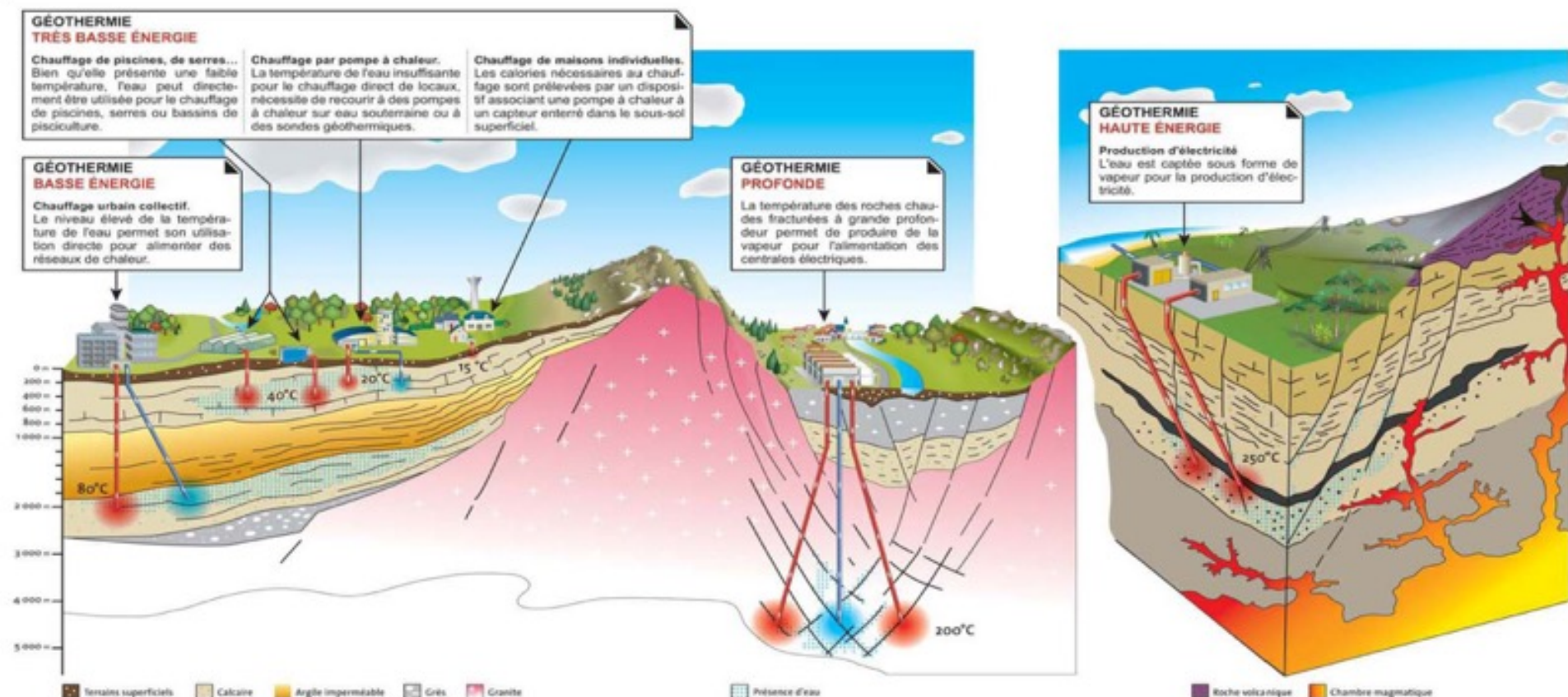
Chauffage urbain collectif. Le niveau élevé de la température de l'eau permet son utilisation directe pour alimenter des réseaux de chaleur.

## GÉOTHERMIE PROFONDE

La température des roches chaudes fracturées à grande profondeur permet de produire de la vapeur pour l'alimentation des centrales électriques.

## GÉOTHERMIE HAUTE ÉNERGIE

Production d'électricité. L'eau est captée sous forme de vapeur pour la production d'électricité.

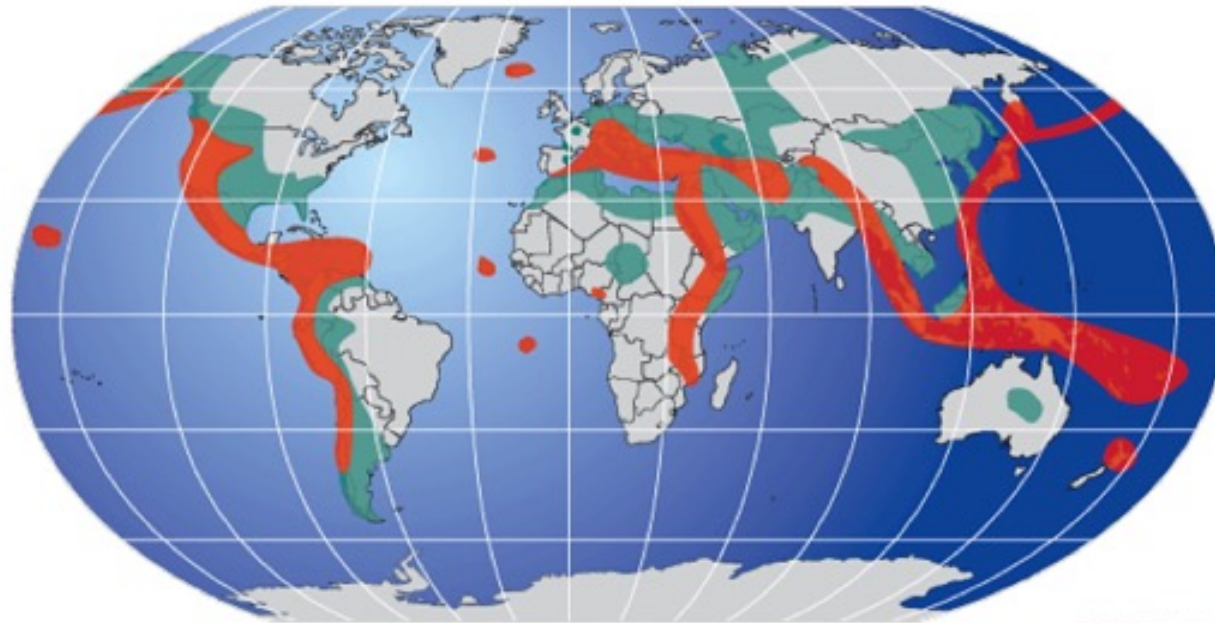


Température :

- **Haute énergie** ( $T \geq 150^{\circ}\text{C}$ ) ---> électricité (Soulz, Bouillante, Islande, Lardere)
- **Basse énergie** ( $90^{\circ}\text{C} > T$ ) ---> chauffage urbain (île de France)
- **Très basse énergie** ( $T < 30^{\circ}\text{C}$  ; profondeur  $< 150\text{ m}$ ) ---> chauffage maisons  
---> pompe à chaleur + eau souterraine ou sonde géothermique



# Ressources géothermiques mondiales

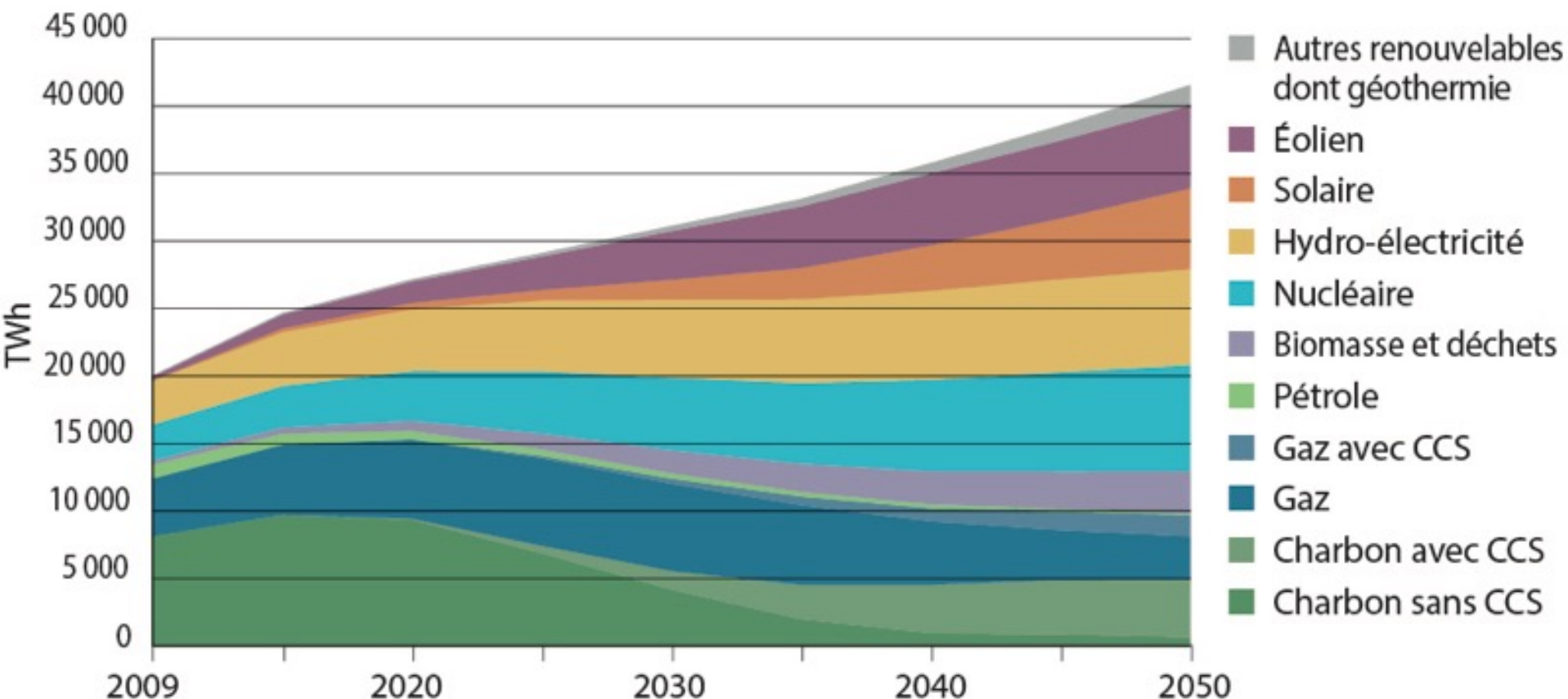


© BRGM im@gé

- Zones propices au développement de la géothermie haute énergie (Régions tectoniques et volcaniques actives émergées)
- Zones favorables à la géothermie basse énergie (bassins sédimentaires)
- Zones de socle cristallin réservées pour la très basse énergie

- **Haute T°** : 150°C entre 1500 et 3000 m, gradient anormalement élevé  
---> exploitations associées au magmatisme (régions volcaniques) :
  - subduction : Ceinture de feu du Pacifique, Antilles, Méditerranée, Indonésie
  - rifting : rift Est-africain, , Soultz, Tibet, Rio Grande,
  - point chaud : Islande, Açores, Hawaii
- **Basse T°** : < 90°C ---> bassins sédimentaires entre 500 et 4000 m, zones de faille
- **Très basse T°** : < 30°C ---> partout, même dans les cratons

# Scénario de croissance



▲ Production globale d'électricité dans le scénario 2DS (en TWh/an) :  
les renouvelables produiront la moitié de l'énergie en 2050 au niveau mondial.

Global electricity generation in the 2DS scenario (in TWh/year): Renewables will generate more than half the world's electricity in 2050 in the 2DS scenario.

Source : IAE ETP 2012 report.



# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

## Introduction

- Manifestations de la chaleur : volcanisme, hydrothermalisme...
- Exemples d'utilisation de la chaleur géothermique par l'Homme

## ➤ 1. La Terre libère de la chaleur

- 1.1. Mesures des températures en profondeur ⇒ géotherme, gradient géothermique
- 1.2. Mesures du flux de chaleur à la surface de la Terre
- 1.3. Flux de chaleur et contexte géodynamique
- 1.4. Bilan global

## ➤ 2. Exploitation de l'énergie géothermique

- 2.1. Géothermie basse température dans le bassin de Paris
- 2.2. Géothermie haute température à Soultz (Bouillante, Larderello,...)
- 2.3. Géothermie très basse température

## ➤ 3. La Terre produit de la chaleur par radioactivité

- 3.1. Découverte de la radioactivité
- 3.2. Les 4 radioéléments naturels producteurs de chaleur
- 3.3. Autres sources de chaleur

## ➤ 4. La dissipation de la chaleur est le moteur de la tectonique des plaques

- 4.1. Conduction
- 4.2. Convection
- 4.3. La dissipation de la chaleur de la Terre est le moteur de la tectonique des plaques

## Conclusion

- Schéma bilan
- Avantages de l'énergie géothermique

### 3.1. Découverte de la radioactivité (Marie Curie 1897)

#### Marie Curie (1867-1934)

- Découverte du radium et de la radioactivité
  - **datations radiochronologiques**
    - âge de la Terre
    - calendrier des temps géologiques

**Prix Nobel de physique** en 1903 avec P. Curie et H. Becquerel pour l'étude des radiations de l'uranium

**Prix Nobel de chimie** en 1909 pour la découverte du radium et polonium



Curie, Poincaré, Einstein, Rutherford (1911)

#### Pierre Curie (1859-1906)

- La désintégration radioactive produit de la chaleur (1903)
  - **histoire thermique de la Terre**





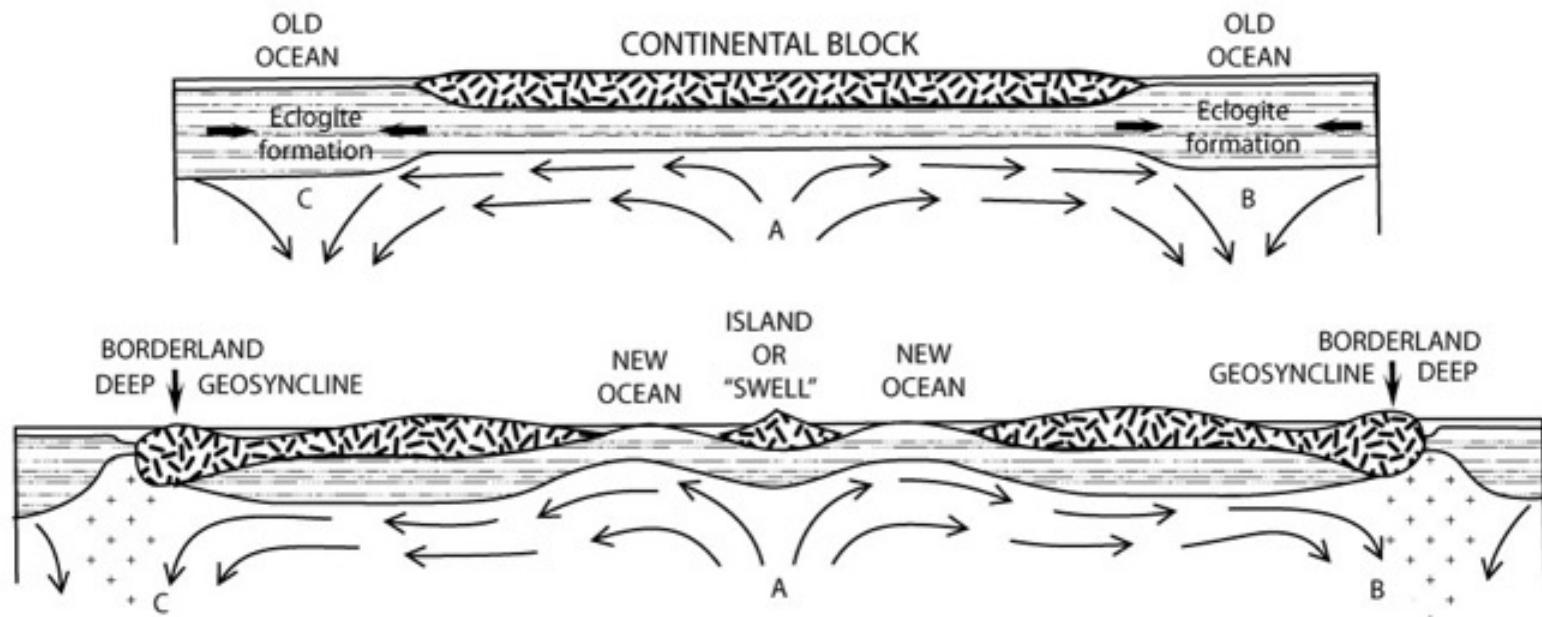
# Radioactivité et convection



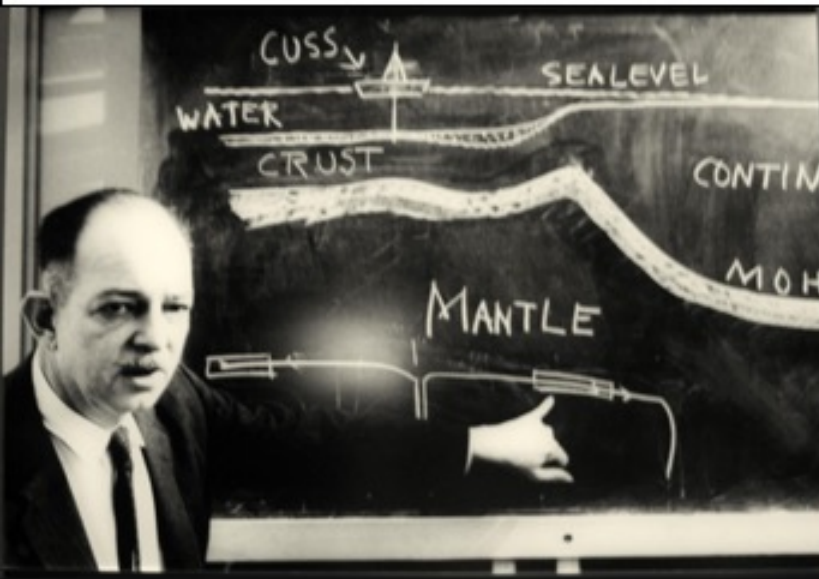
## Arthur Holmes (1890-1965)

- Datation U-Pb
- Age de la Terre (4,55 Ga en 1964)
- Importance du K
- Assez de chaleur pour convection à grande échelle
- **Convection : moteur de la Dérive des continents** (Glasgow, 1928)

1910, 1930, 1960

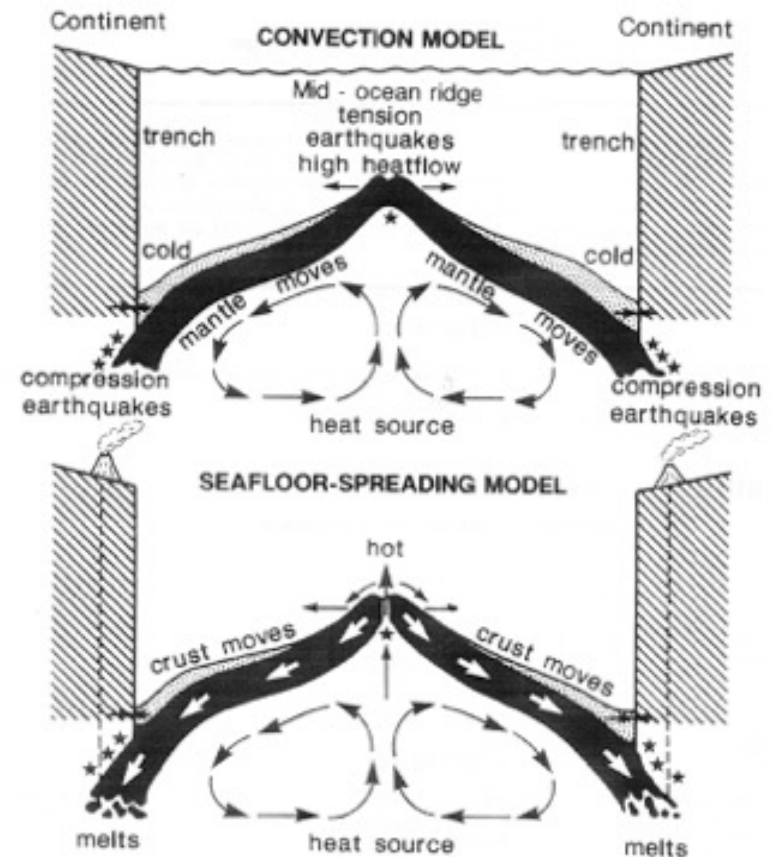


# Seafloor spreading (Hess, 1962)



## Harry Hess (1906-1969)

- Seafloor spreading
- Guyots

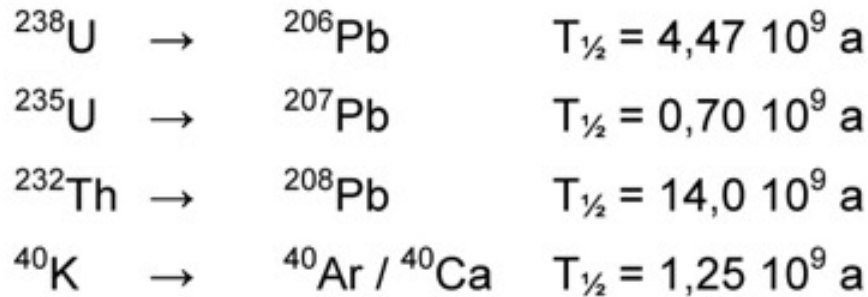


Modèle de Hess de développement des bassins océaniques au niveau des dorsales, ou centres d'expansion océanique = oceanic spreading center (1962)



## 3.2. Production de chaleur par radioactivité

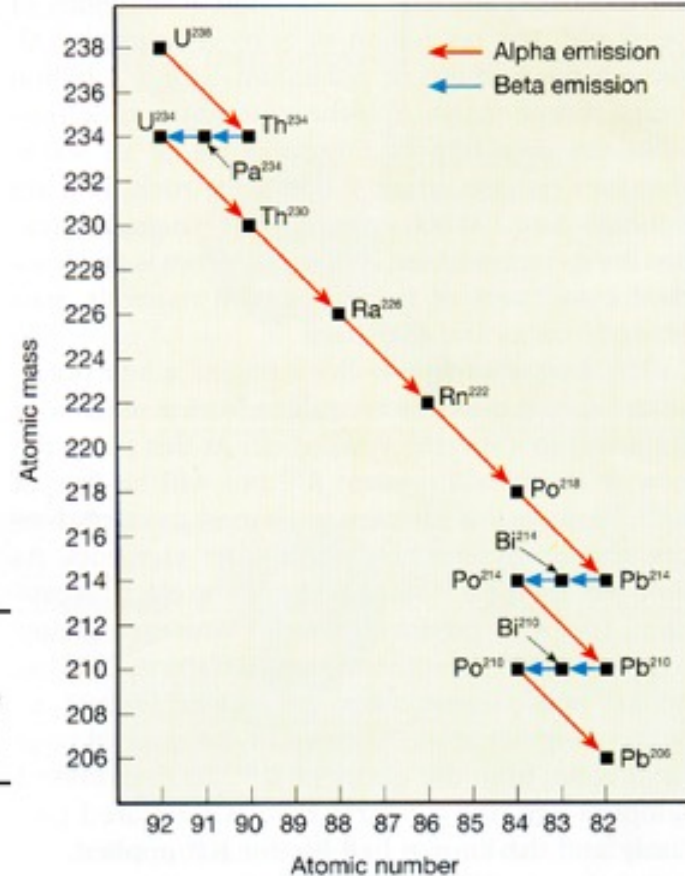
### Radioactivités longues périodes



Isotope	Demi-vie ans	Chaleur libérée W/kg isotope	Concentration moyenne	
			dans le manteau kg isotope/kg manteau	Chaleur libérée W/kg manteau
${}^{238}\text{U}$	$4,47 \times 10^9$	$9,46 \times 10^{-5}$	$25,5 \times 10^{-9}$	$2,41 \times 10^{-12}$
${}^{235}\text{U}$	$0,70 \times 10^9$	$56,9 \times 10^{-5}$	$0,19 \times 10^{-9}$	$0,11 \times 10^{-12}$
${}^{232}\text{Th}$	$14,0 \times 10^9$	$2,64 \times 10^{-5}$	$103 \times 10^{-9}$	$2,72 \times 10^{-12}$
${}^{40}\text{K}$	$1,25 \times 10^9$	$2,92 \times 10^{-5}$	$32,9 \times 10^{-9}$	$0,96 \times 10^{-12}$

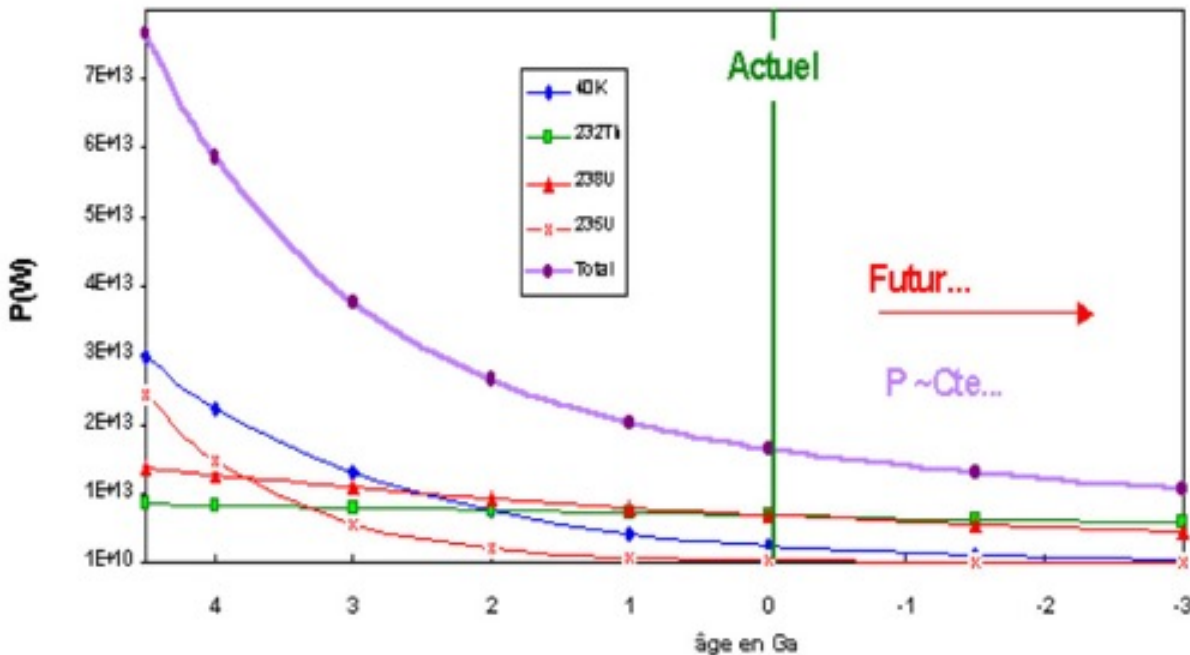
Contributions actuelles :  ${}^{238}\text{U} \sim {}^{232}\text{Th} \sim 2$  à  $3$   ${}^{40}\text{K} \sim 25$   ${}^{235}\text{U}$

Contributions à l'origine :  ${}^{40}\text{K} \sim {}^{235}\text{U} \sim 2$   ${}^{238}\text{U} \sim 2$   ${}^{232}\text{Th}$



## 3.2. Production de chaleur par radioactivité

Production de chaleur (W) par les éléments radioactifs au cours du temps



Puissance totale produite  
par radioactivité :  
20 à 25 TW  
---> la moitié de la puissance totale  
dissipée 44 TW

Concentration des éléments radioactifs dans la Terre

- Noyau : probablement négligeable
  - Manteau : concentration faible mais 2/3 de la masse de la Terre
  - Croûte : riche en éléments radioactifs magmaphiles (incompatibles)
    - croûte continentale 40 fois plus riche en U, 50 fois en Th que croûte océanique
    - croûte continentale ~6 fois plus épaisse que croûte océanique
- ⇒ production de chaleur dans la croûte continentale x200 p. r. croûte océanique



### 3.3. Autres sources de chaleur

#### **Solidification de la graine**

Chaleur latente de solidification libérée : ~2 TW

#### **Retard à l'évacuation de la chaleur**

- Chaleur primordiale libérée lors de la formation de la Terre
  - énergie cinétique des planétoïdes agrégés
  - radioactivités éteintes



- Arriéré de chaleur radioactive : il y a 4 Ga cette production était 4 fois plus forte qu'aujourd'hui

# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

## Introduction

- Manifestations de la chaleur : volcanisme, hydrothermalisme...
- Exemples d'utilisation de la chaleur géothermique par l'Homme

### ➤ 1. La Terre libère de la chaleur

- 1.1. Mesures des températures en profondeur ⇒ géotherme, gradient géothermique
- 1.2. Mesures du flux de chaleur à la surface de la Terre
- 1.3. Flux de chaleur et contexte géodynamique
- 1.4. Bilan global

### ➤ 2. Exploitation de l'énergie géothermique

- 2.1. Géothermie basse température dans le bassin de Paris
- 2.2. Géothermie haute température à Soultz (Bouillante, Larderello,...)
- 2.3. Géothermie très basse température

### ➤ 3. La Terre produit de la chaleur par radioactivité

- 3.1. Découverte de la radioactivité
- 3.2. Les 4 radioéléments naturels producteurs de chaleur
- 3.3. Autres sources de chaleur

### ➤ 4. La dissipation de la chaleur est le moteur de la tectonique des plaques

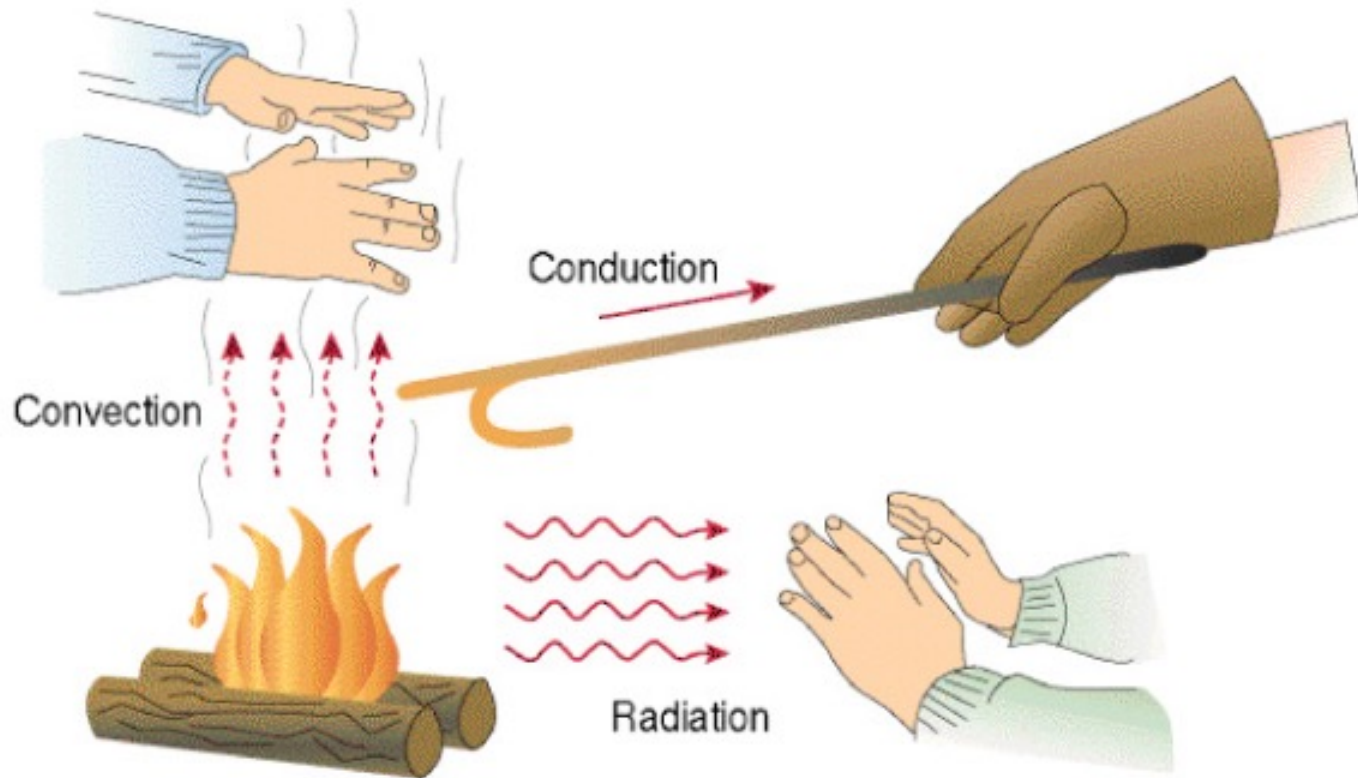
- 4.1. Conduction
- 4.2. Convection
- 4.3. La dissipation de la chaleur de la Terre est le moteur de la tectonique des plaques

## Conclusion

- Schéma bilan
- Avantages de l'énergie géothermique



# 3 modes de transfert de la chaleur



# Conduction



Chauffage d'une barre de métal



J.B. Fourier

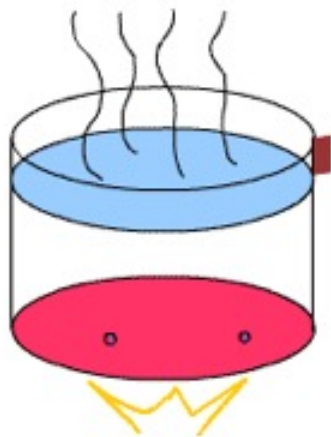
La conduction thermique transfère la chaleur dans un milieu matériel (solide, liquide, gaz), sans mouvement de matière, depuis les zones chaudes vers les zones froides (selon un gradient de température), à l'aide de mécanismes d'échelle microscopique (vibrations atomiques ou moléculaires, diffusion électronique,...). La conduction est le seul mécanisme qui permet à la chaleur d'être transmise dans un solide.

La conduction thermique suit la loi de Fourier (1822)

$$\Phi = -k \frac{dT}{dx}$$

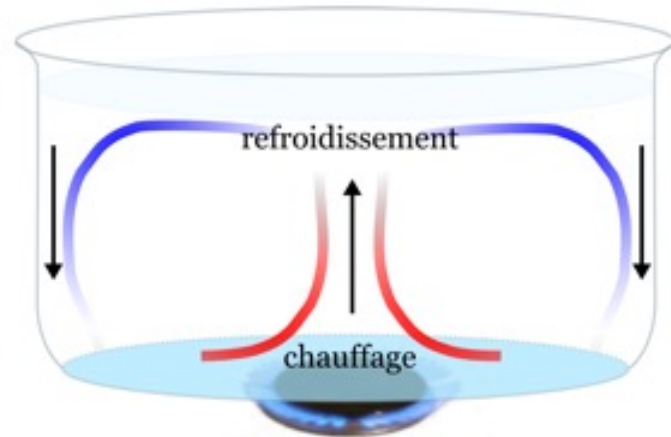
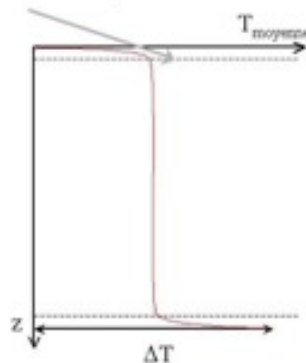


# Convection



Chauffage d'une casserole de lait

Couche limite thermique



Etablissement d'un régime convectif  
avec couche thermique limite = peau du lait  
Et si on chauffe par le haut ?

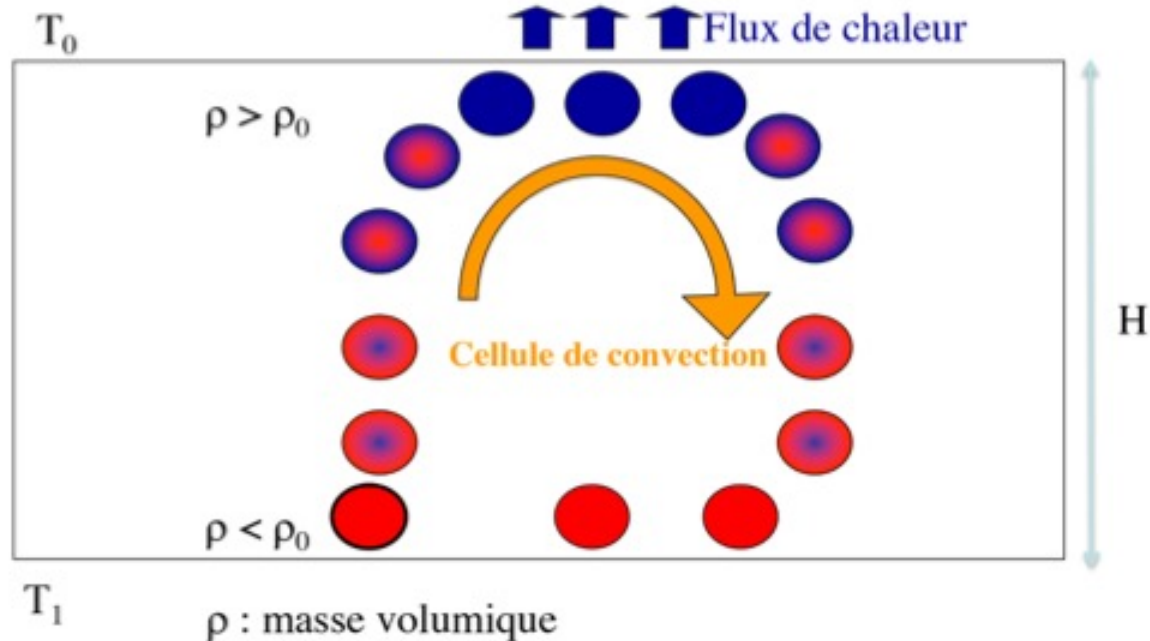
Vieux proverbe : « **Une marmite, ça ne chauffe pas par le couvercle mais par le fond.** »

La convection transfère la chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière.

Convection possible si :

- viscosité faible
- diffusivité thermique faible
- nombre de Rayleigh  $> 1000$
- nombre de Rayleigh du manteau  $\sim 10^8$

# Convection



Si la diffusion thermique n'est pas assez efficace pour évacuer la chaleur interne, la température augmente, ce qui modifie la densité viscosité faible.

La convection se déclenche quand la force d'Archimède est plus grande que les forces visqueuses et de diffusion thermique.

Le rapport de ces forces est égale au nombre sans dimension de Rayleigh :  $Ra = \frac{\alpha \rho g \Delta T H^3}{\kappa \nu}$

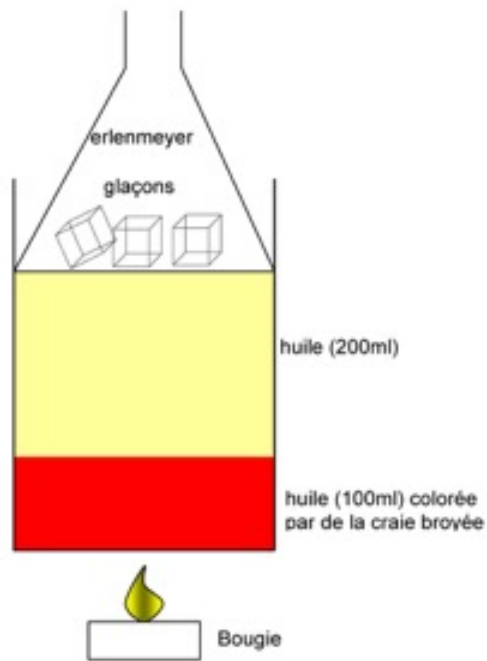
$\alpha$  : expansion thermique ;  $g$  : gravité ;  $\nu$  : viscosité cinématique = viscosité dynamique/ $\rho$

$H$  : dimension verticale de la cellule de convection;  $\kappa$  : diffusivité thermique

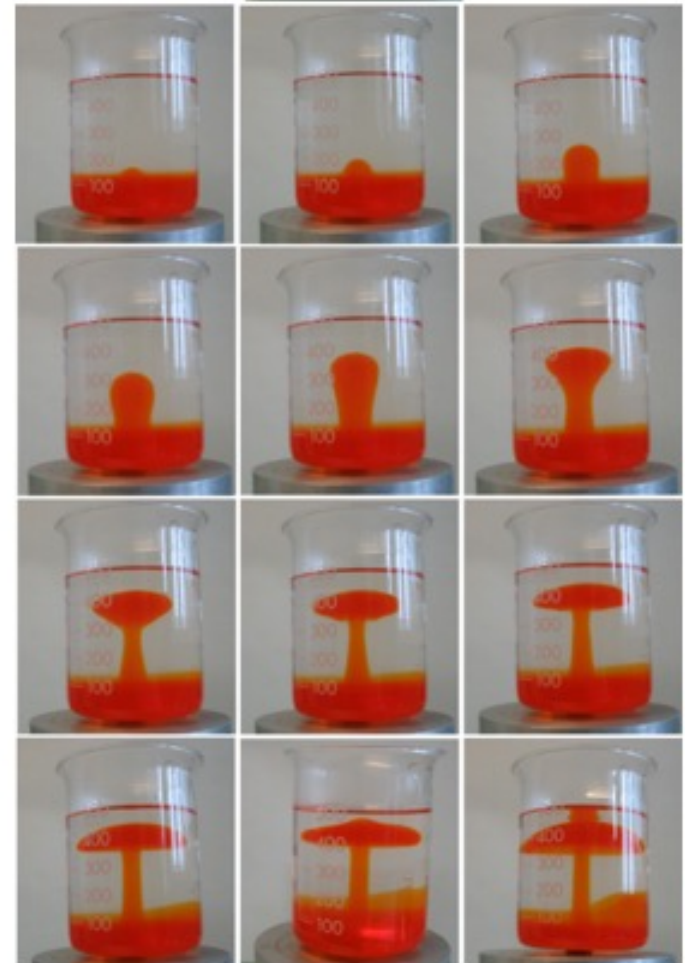


# Modélisation analogique de la convection

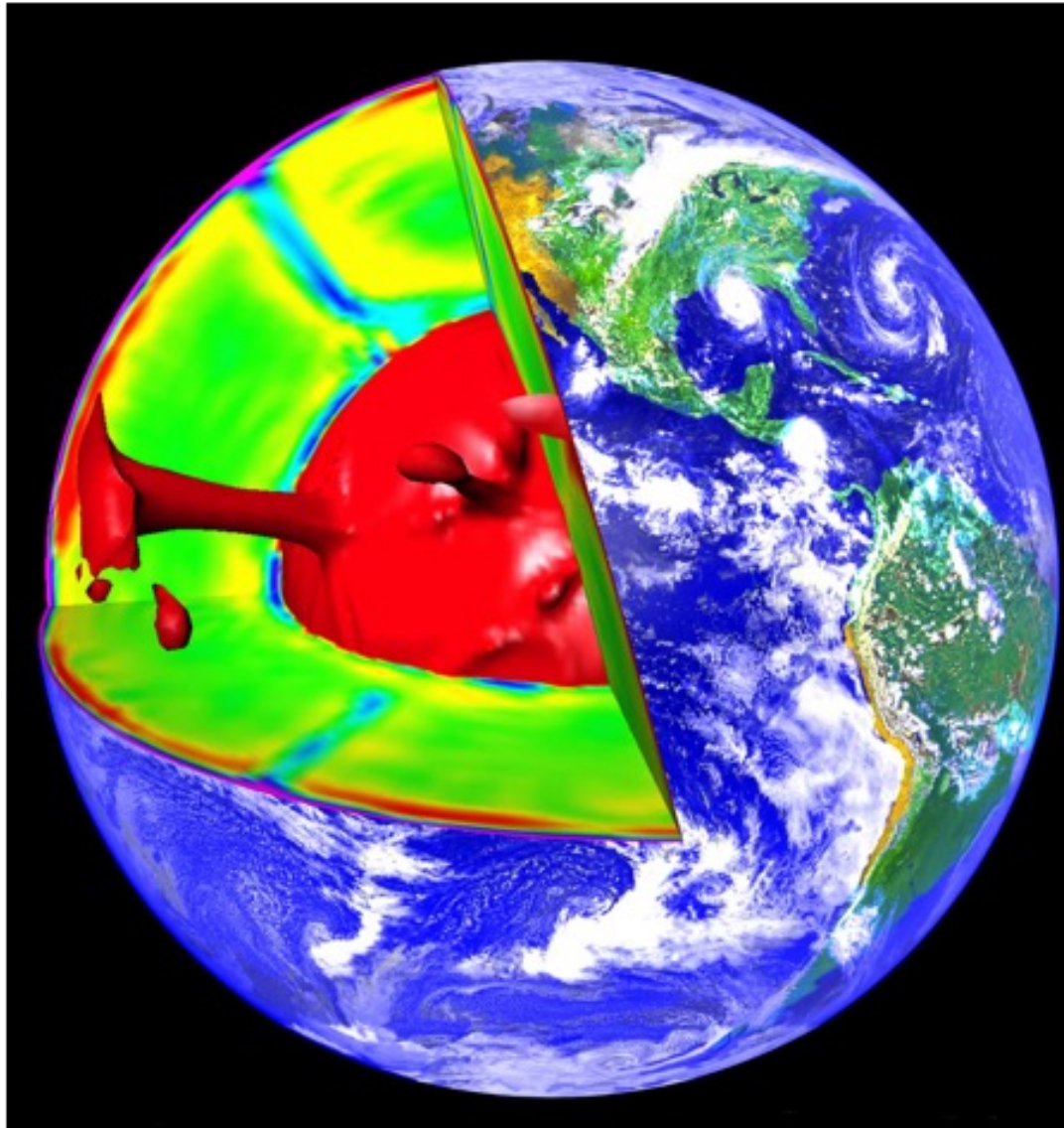
Protocole



Modèle  
analogique



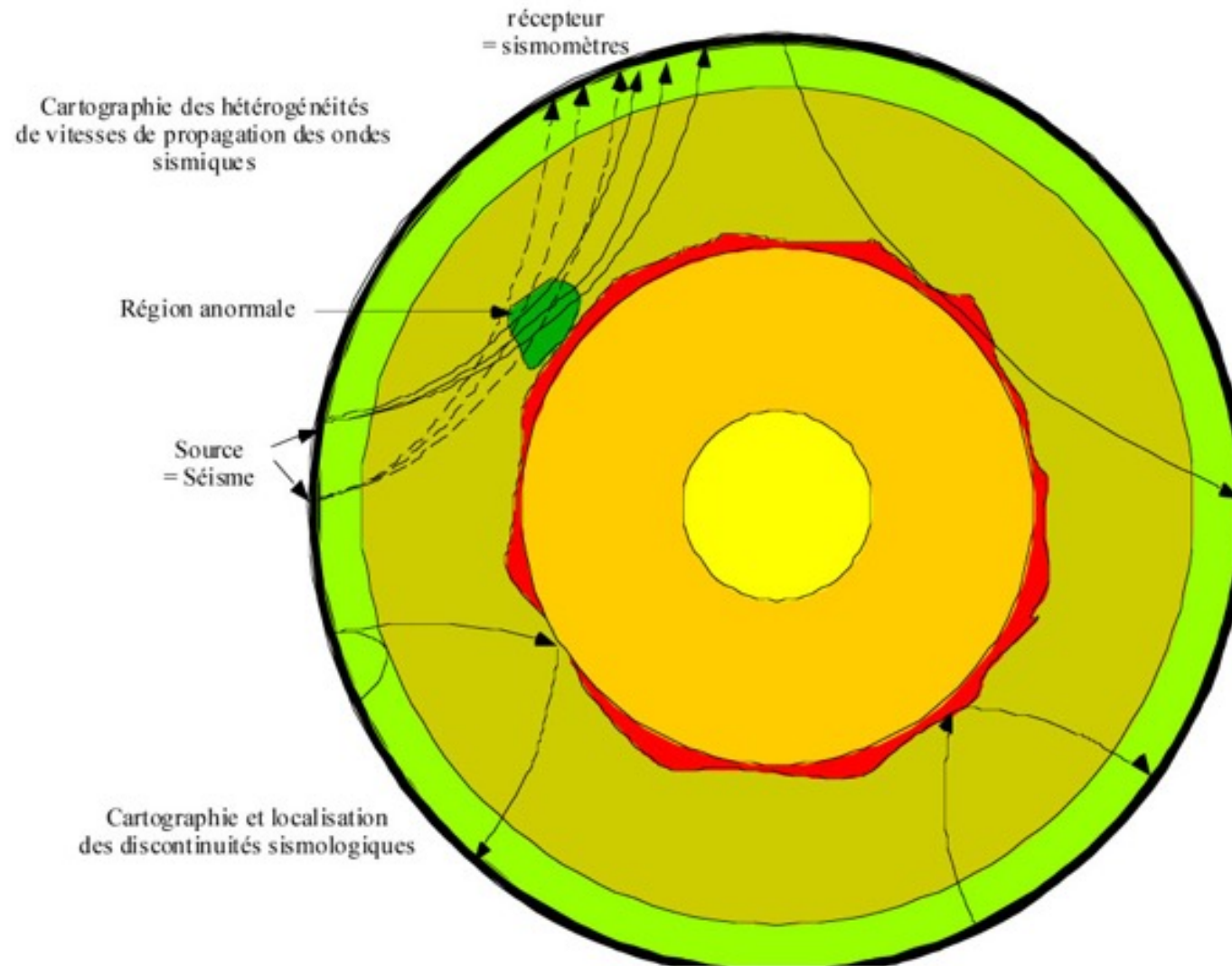
# Modélisation numérique de la convection





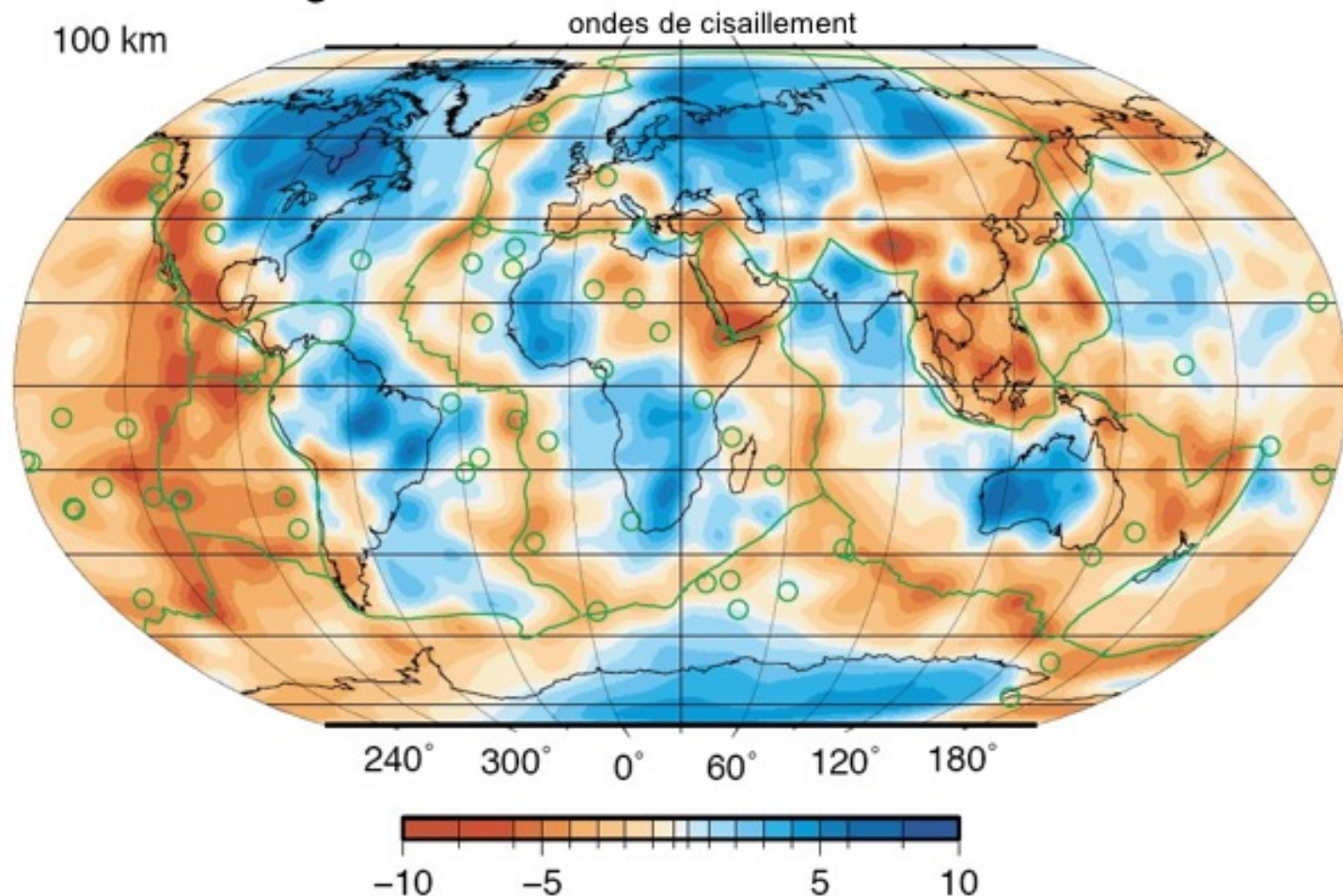
# Principe de la tomographie sismique

Observations d'hétérogénéités latérales de vitesse dans le manteau



# Tomographie en carte

## Hétérogénéités de vitesse au sommet du manteau



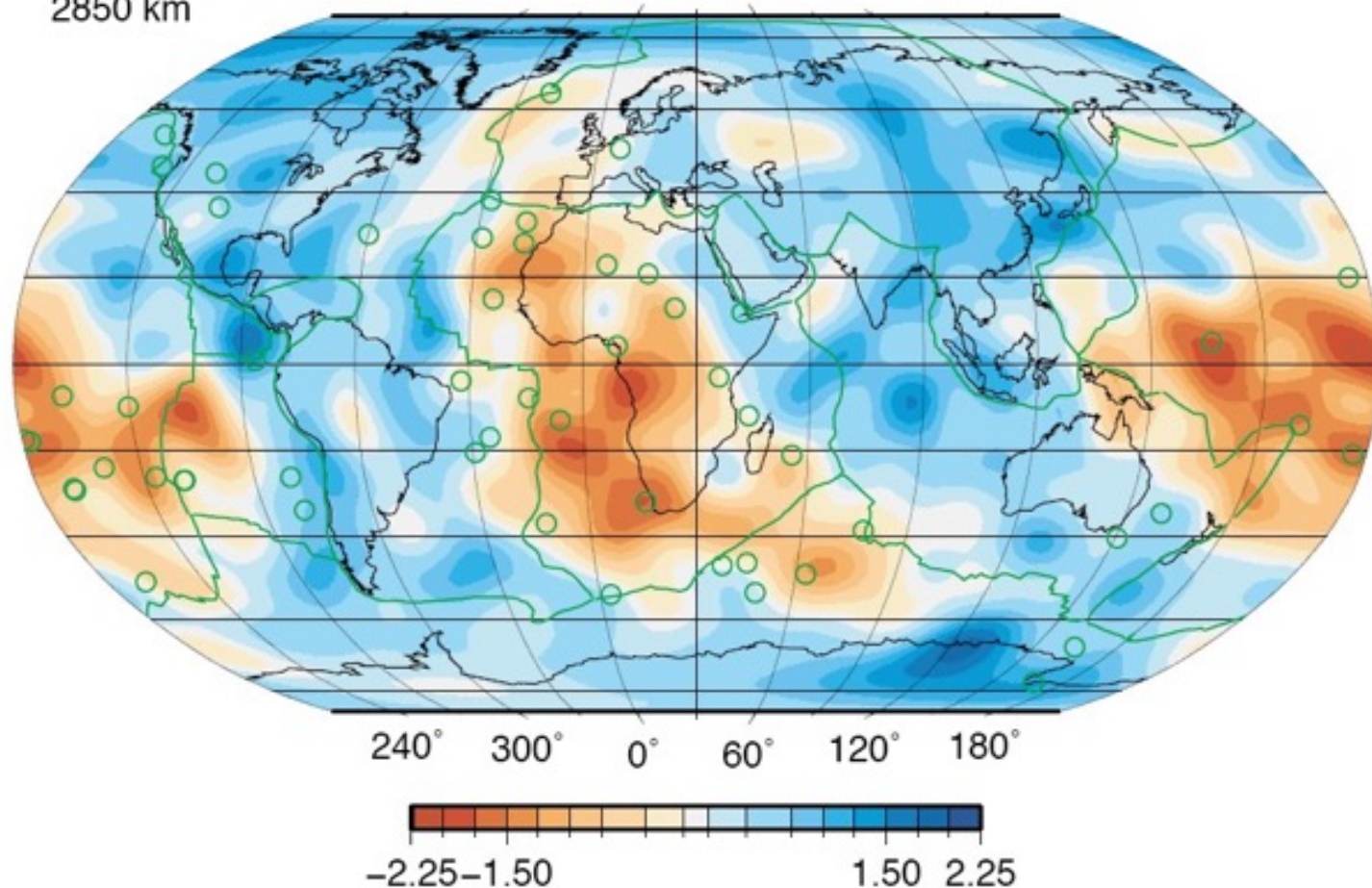
- Vitesses rapides en bleu = zones froides du manteau
- Vitesses lentes en rouge = zones chaudes
- Cercles verts = volcans associés à des points chauds
- > corrélation entre hétérogénéités de vitesse et géologie de surface



# Tomographie en carte

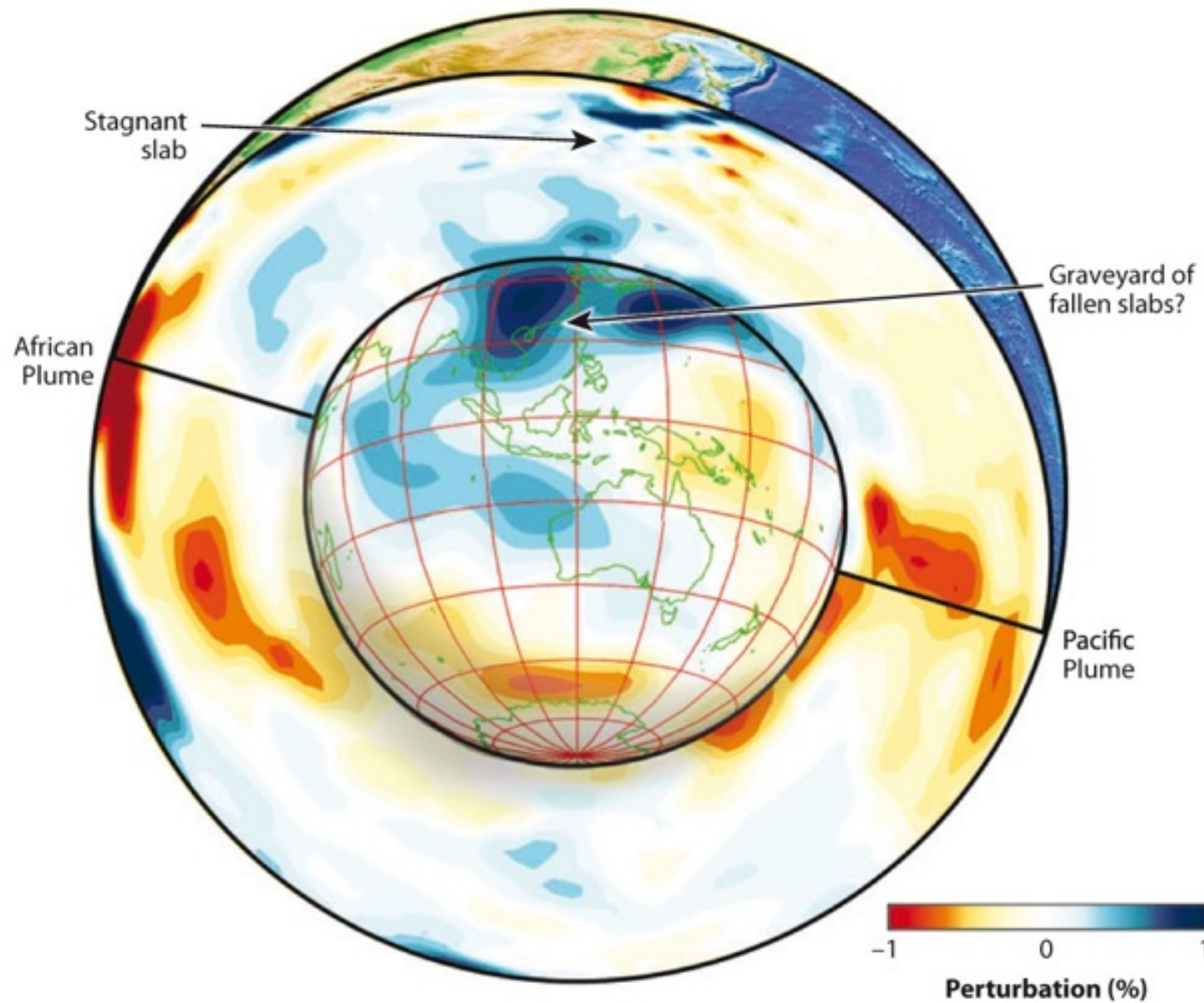
## Hétérogénéités de vitesse à la base du manteau

2850 km



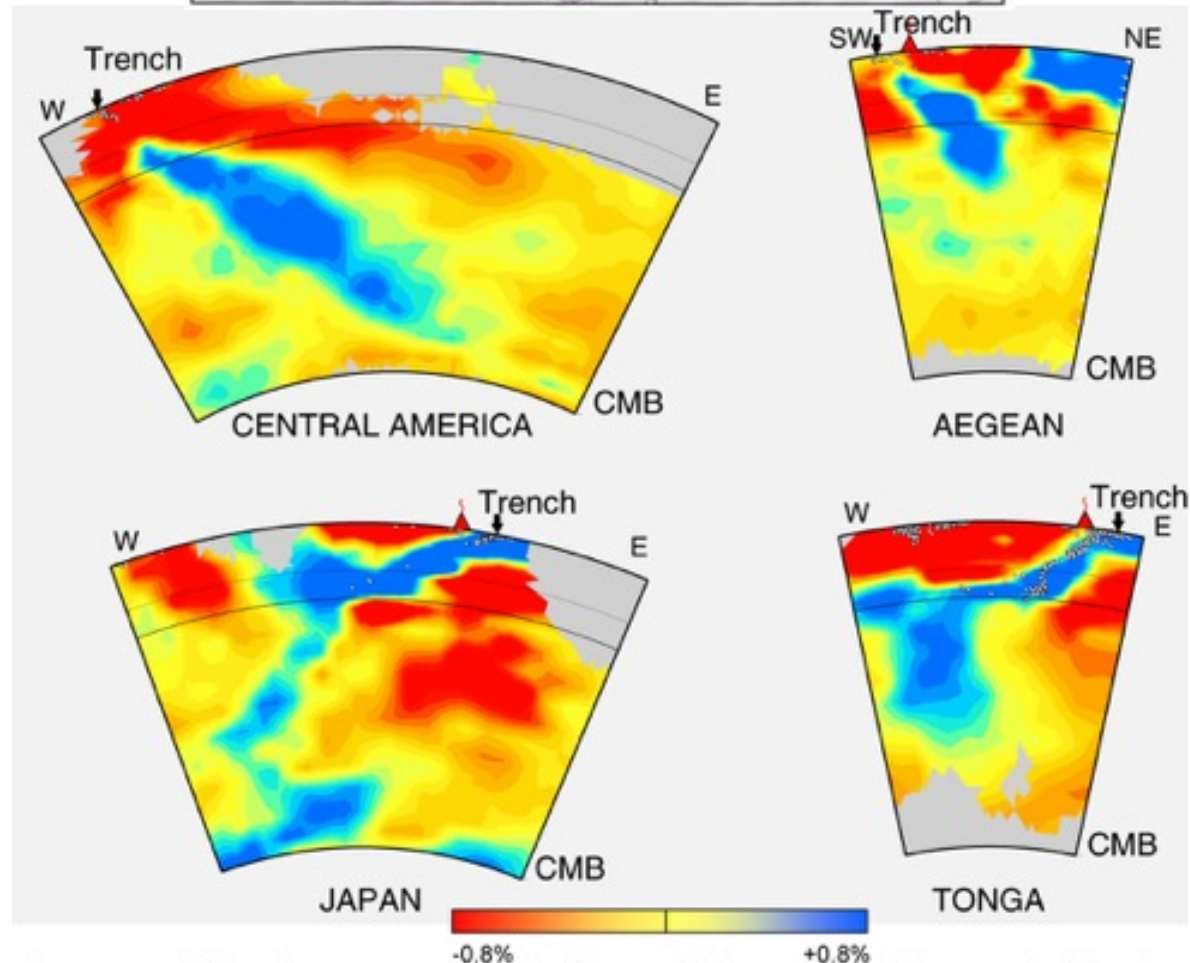
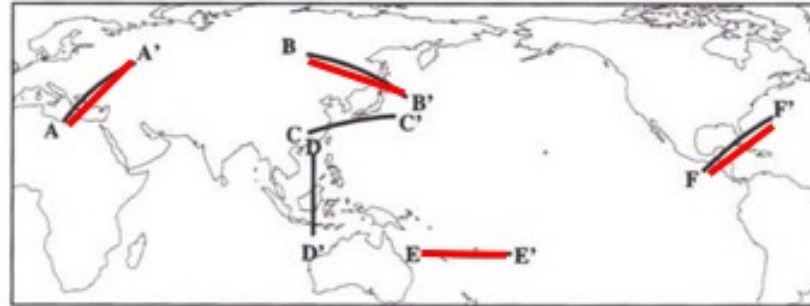
- Deux larges anomalies de vitesse lentes sous l'Afrique et le Pacifique Ouest
- Cimetière de plaques sur le pourtour du Pacifique ?

# Tomographie globale



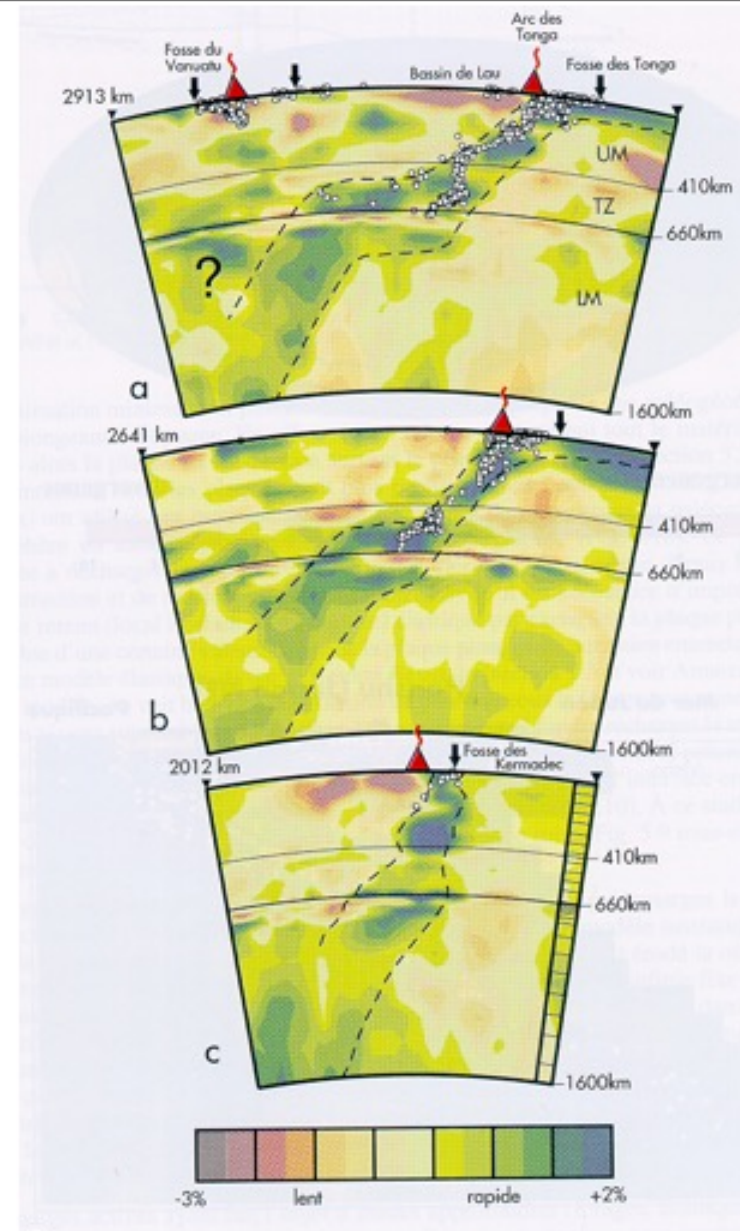
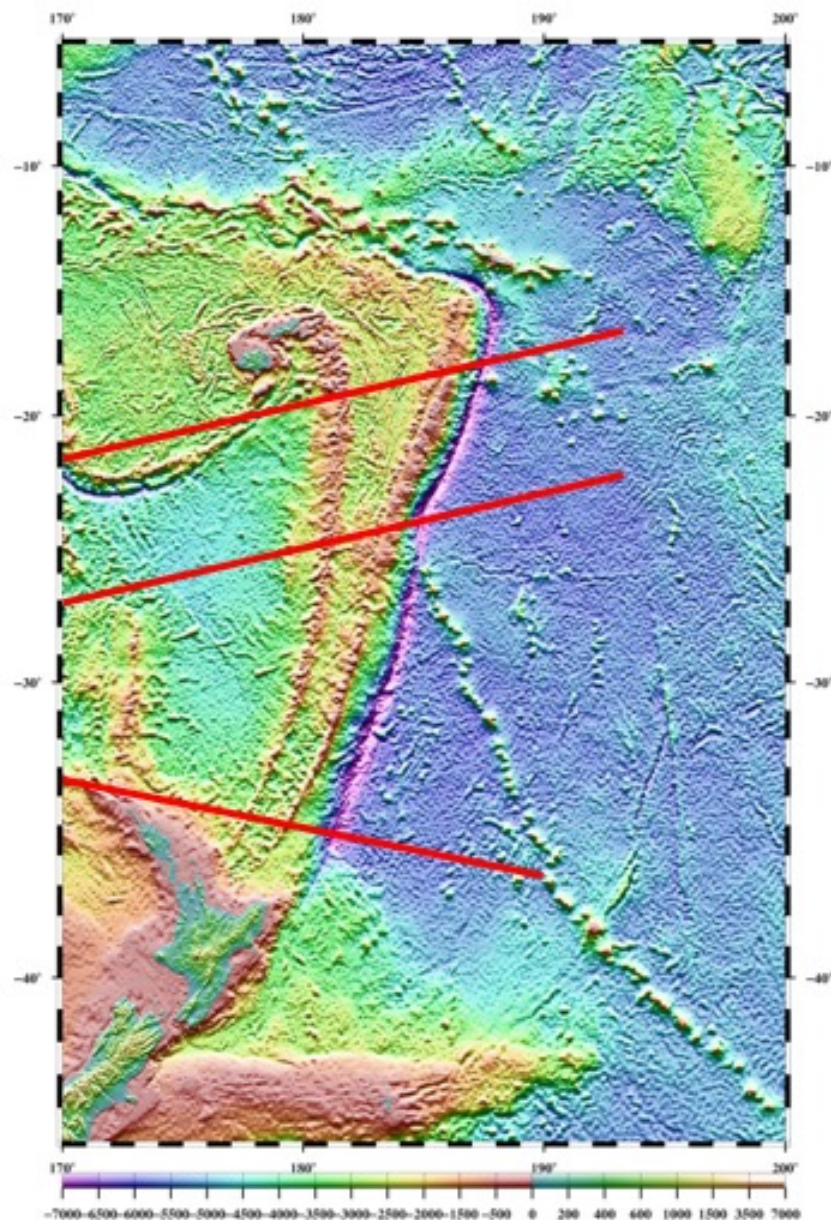


# Tomographie : mouvements convectifs descendants



Les panneaux plongeant (épaisseur ~100 km) sont bien détectés car latéralement très larges

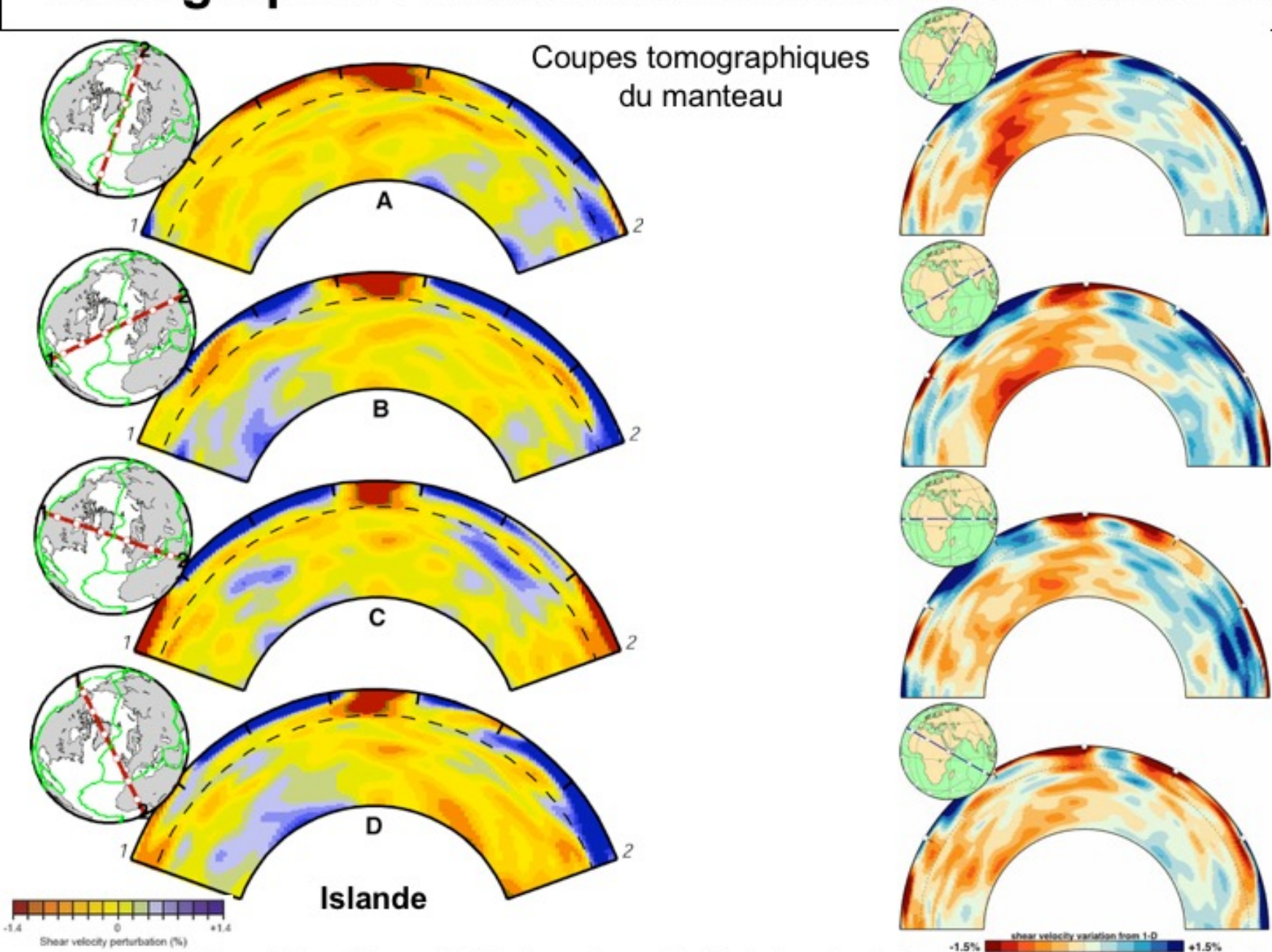
# Tomographie : mouvements convectifs descendants



Interaction de panneau plongeant Tonga-Kermadec avec la zone de transition du manteau

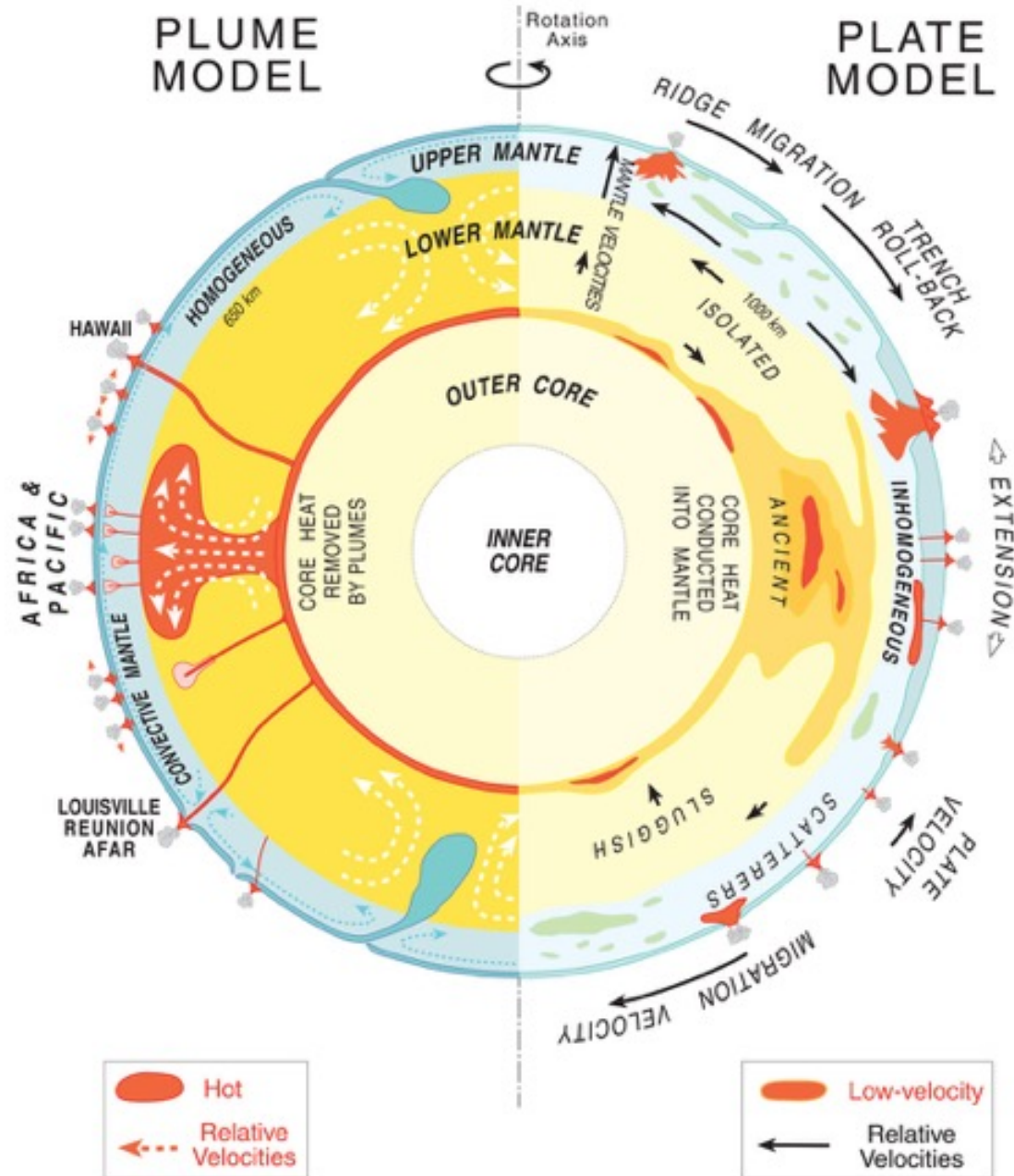


# Tomographie : mouvements convectifs ascendants



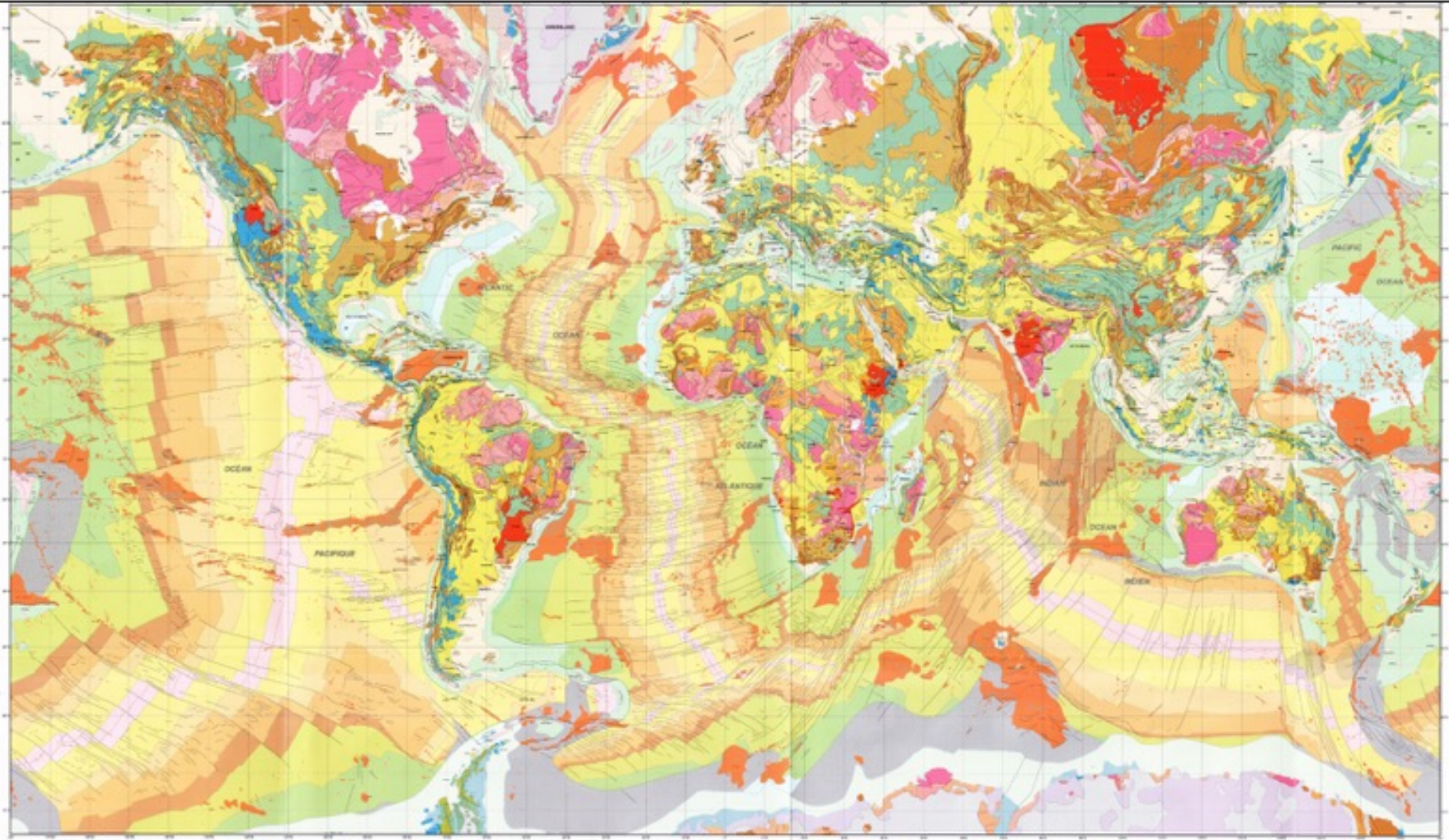
Les panaches (diamètre ~100 km) sont en deçà de la résolution (quelques centaines de km)

# Deux modèles de convection





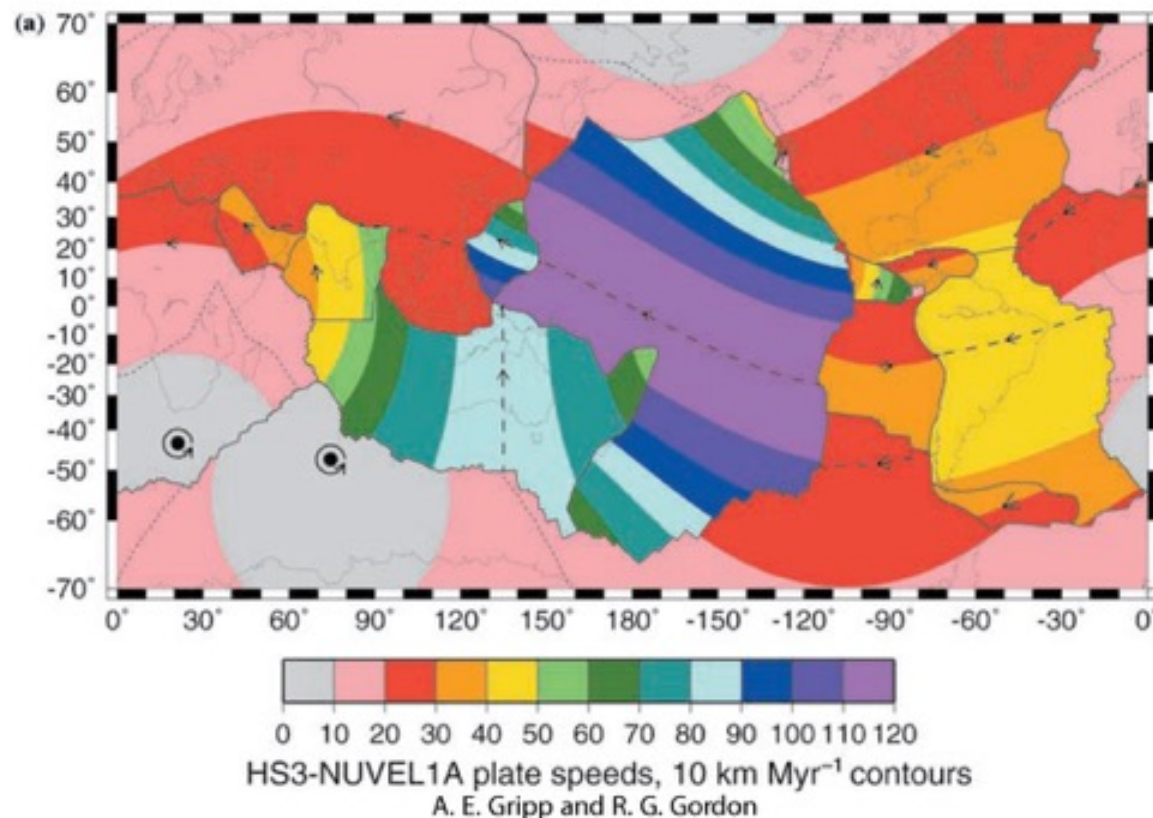
# Dissipation de la chaleur et mouvement des plaques



- L'expansion océanique, le refroidissement du plancher océanique, la subduction sont des manifestations de la convection dans le manteau (Holmes, Hess, ...)
- Le volcanisme de point chaud aussi
- Modes de transfert de chaleur : convection et conduction



# Vitesse des plaques dans le référentiel des points chauds



- Les plaques bordées par des subductions sont les plus rapides :  
Pacifique, Philippine, Australie, Inde, Cocos, Nazca
- La vitesse moyenne des plaques est inversement proportionnelle à leur âge moyen : plus l'âge est faible, plus la quantité de chaleur évacuée est grande, plus la vitesse est rapide.
- Deux forces gravitationnelles entraînent le mouvement des plaques :
  - force de traction du panneau plongeant aux fosses ---> vitesses plus grandes
  - force de poussée aux dorsales ---> vitesses plus lentes



# Conclusion : la Terre est une machine thermique

- La Terre produit de la chaleur essentiellement par radioactivité
- Cette chaleur est trop importante pour être évacuée par conduction thermique
- Elle est évacuée par la convection du manteau plus efficace et plus rapide
- La tectonique des plaques est la manifestation externe de la convection mantellique
- Les forces gravitationnelles sont responsables des mouvements de convection, dont :
  - force de traction aux fosses
  - force de poussée aux dorsales
- L'énergie qui entraîne la tectonique des plaques provient de la chaleur radioactive
- L'énergie géothermique est une ressource alternative largement disponible

# Schéma bilan

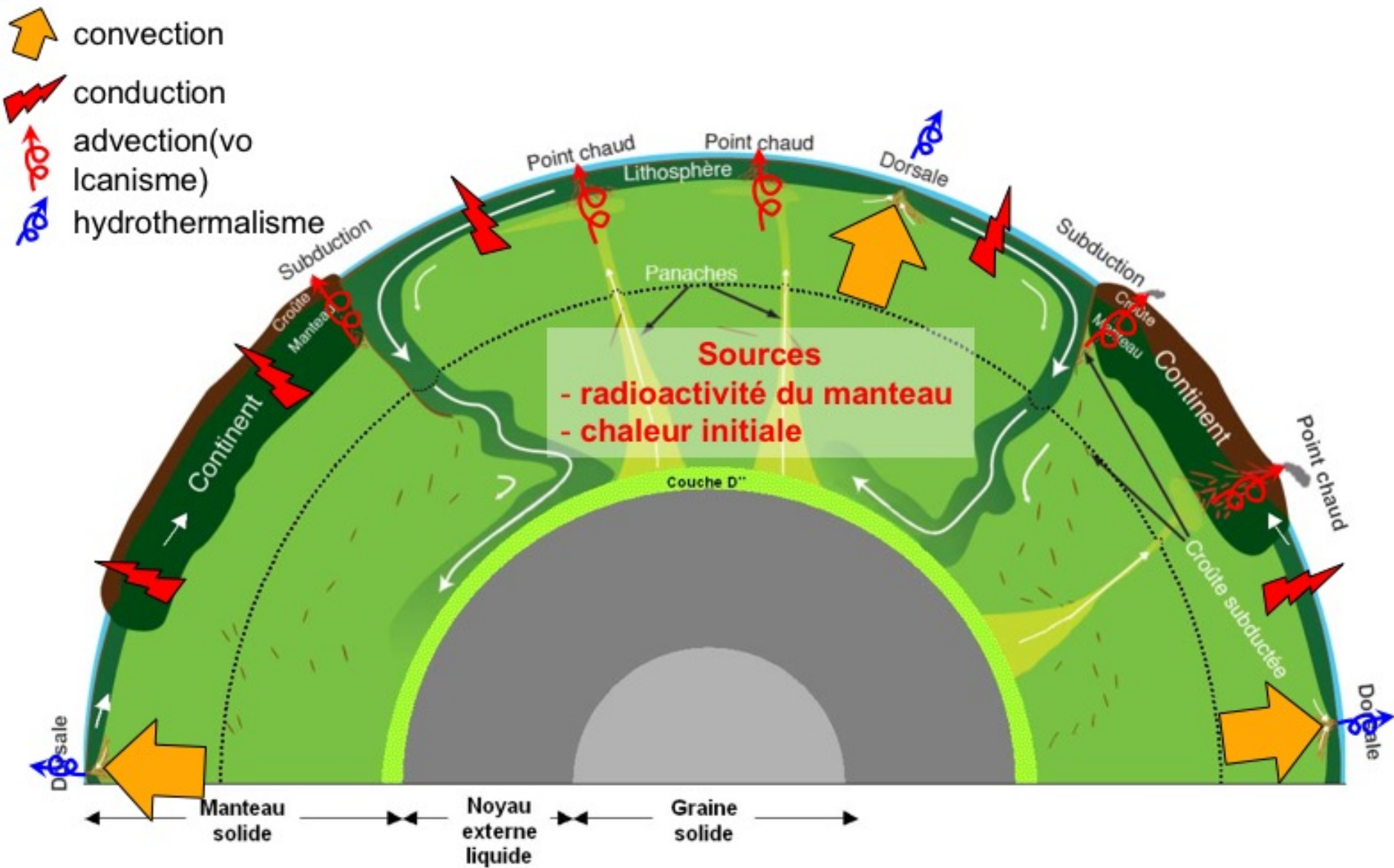


Schéma simplifié de la convection mantellique



# Avantages de l'énergie géothermique

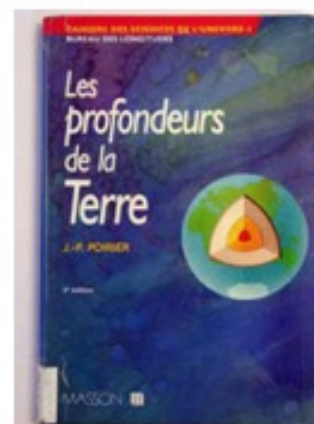
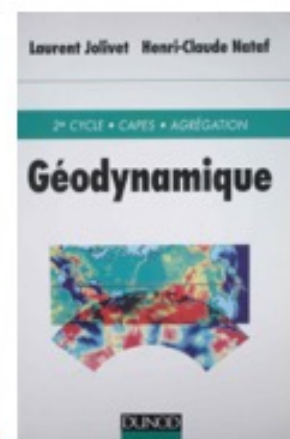
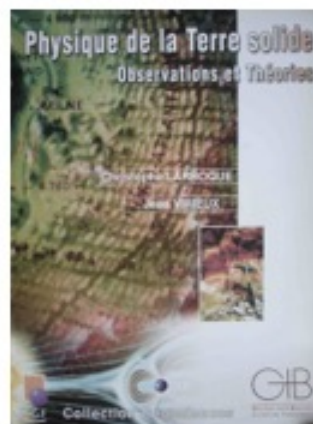
- **Indépendance** : énergie indigène
- **Durabilité** : inépuisable à l'échelle humaine, gestion de type renouvelable
- **Disponibilité** : 24 heures par jour et 365 jours par an
- **Impact environnemental** :
  - rejet d'eau saumâtre si pas de réinjection
  - pas d'émission de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ...)
  - émission possible de gaz nauséabonds ( $\text{H}_2\text{S}$ )
- **Diversité** : pour le chauffage, le refroidissement, la production d'électricité
- **Variété** : large gamme de températures (10-250°C) et de profondeurs (1-6000 m)
- **Discrétion** : installations compactes qui n'occupent que peu de surface de terrain
- **Sécurité** : pas de transport ni de stockage de substances polluantes ou dangereuses
- **Economie** : parmi les plus rentables des énergies renouvelables
- **Innovation** : stimule les nouvelles technologies et crée des places de travail

...et inconvénients :

- **Coûts** :
  - coûts d'installation >> système de chauffage à combustion
  - coûts de fonctionnement << chauffage classique

# Bibliographie

- La Géothermie, Géochronique, 114, coéd. SGF-BRGM, juin 2010
- DEWAELE & SANLOUP : L'intérieur de la Terre et des planètes, 2005 (Belin)
- LARROQUE & VIRIEUX : Physique de la Terre solide, 2001 (Gordon & Breach)
- NATAF & SOMMERIA : La physique de la Terre, 2000 (Belin)
- JOLIVET & NATAF : Géodynamique, 1998 (Dunod)
- POIRIER : Les profondeurs de la Terre, 1996 (Masson)
  - ATLAS DES RESSOURCES GEOTHERMIQUES
- Hurter, S., Haenel, R. (Eds.), 2002. Atlas of geothermal resources in Europe. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg
- Hurtig E, Cermak V, Haenel R, Zui VI (eds) (1992) Geothermal atlas of Europe. H. Haack Verlagsgesellschaft mbH und Geogr.- Kartogr. Anstalt, Gotha





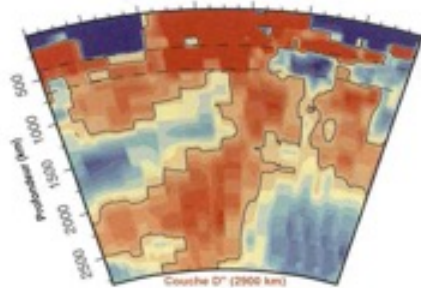
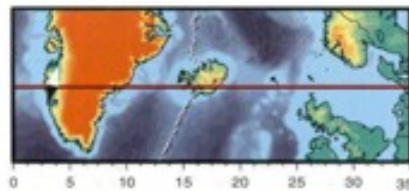
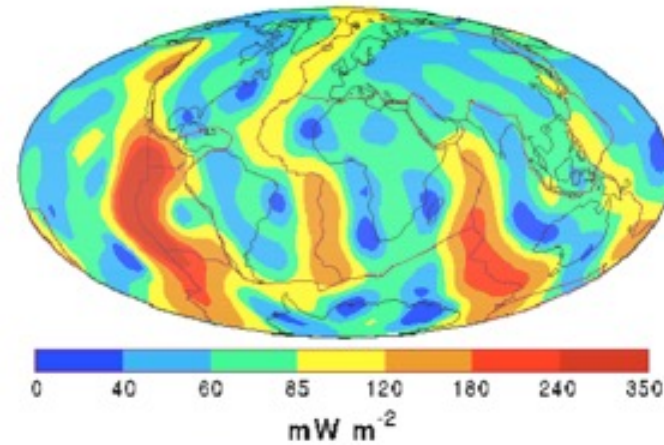
## **Ressources et annexes**

# Annexe 1

Exploiter des documents et des connaissances afin de comprendre les causes de l'implantation d'une centrale géothermique

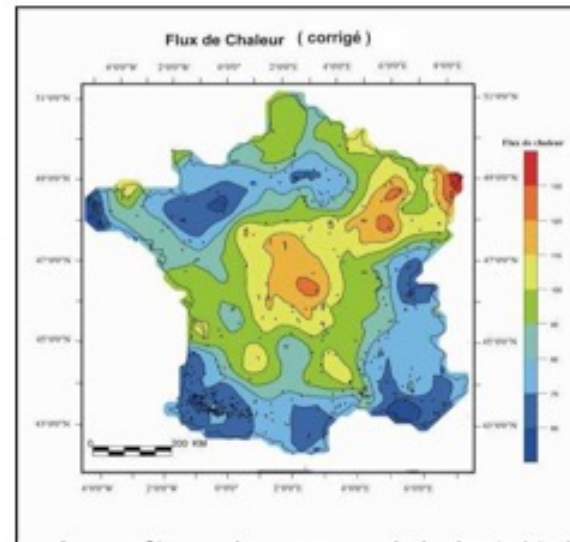
## Exemple 1 : l'Islande

Flux de chaleur en surface

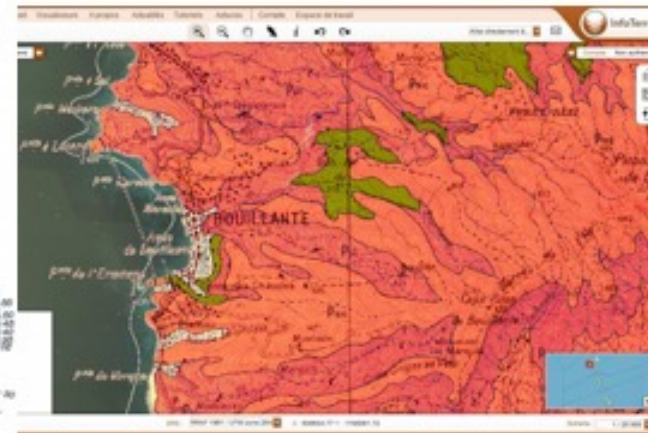
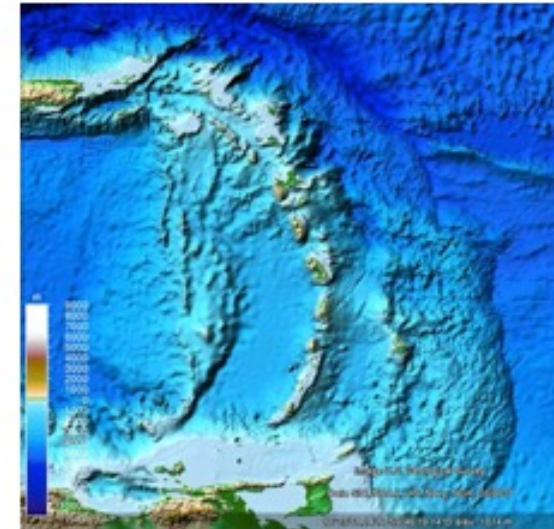


-0.5% +0.5%

## Exemple 2 : Soultz



## Exemple 3 : Bouillante

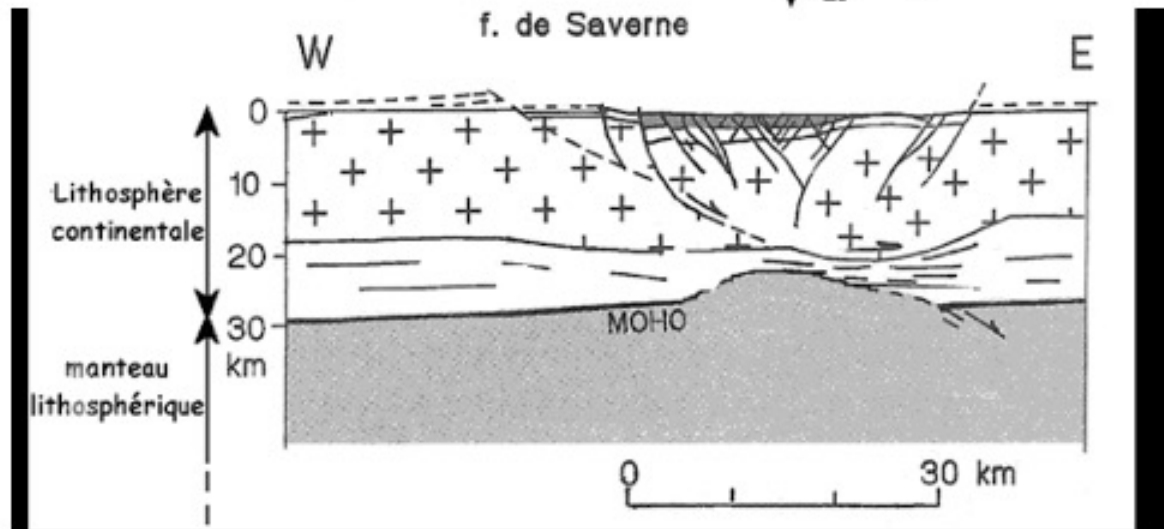
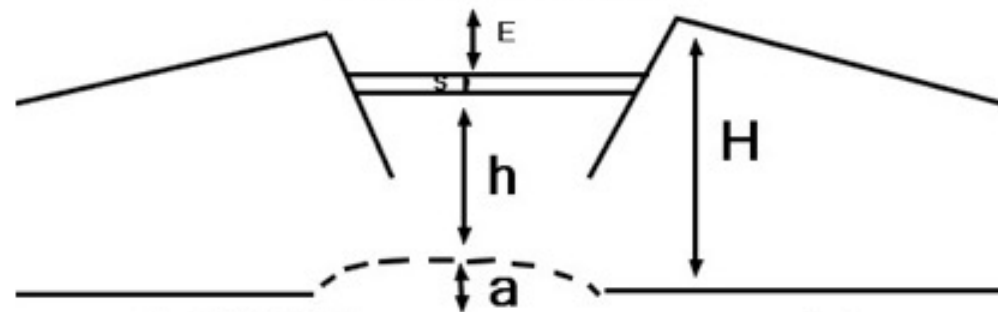




# Annexe 3

Calculer la remontée du Moho sous la plaine d'Alsace  
et la confronter avec les données des sources chaudes locales

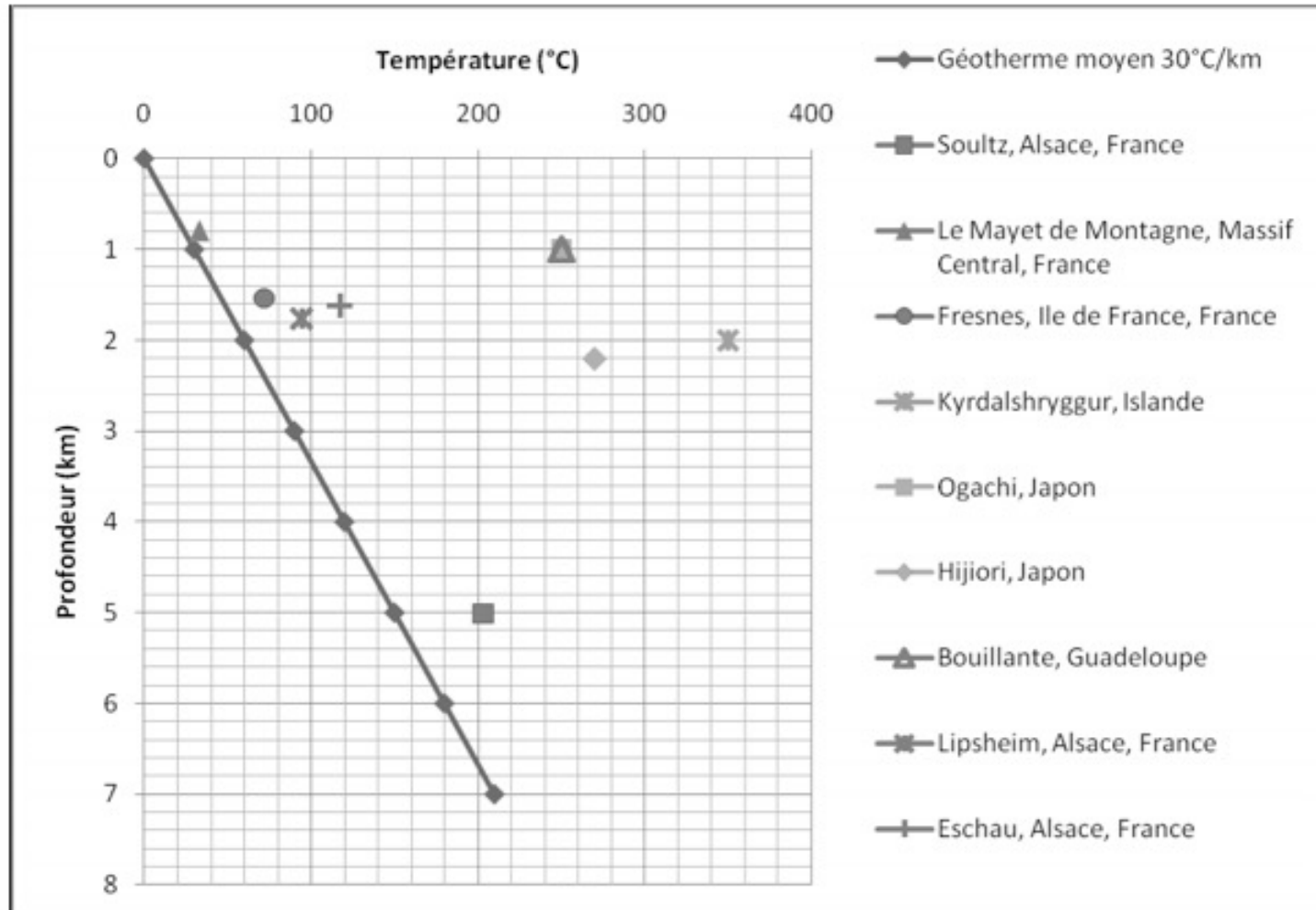
Calcul d'isostasie



Nature des roches	Densité
Sédiments poreux	2,2
Granite et roches métamorphiques	2,8
Péridotite du manteau sup	3,2

# Annexe 4

Représenter graphiquement le gradient géothermique continental moyen dans la croûte et comparer ce gradient avec des mesures de températures réalisées en différents points du globe





# Annexe 7

## Calculer des bilans thermiques

	Croûte continentale	Croûte océanique	Manteau
Uranium	$1,6 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0,9 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0,02 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$
Thorium	$1,6 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0,7 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0,03 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$
Potassium	$0,7 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0,1 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0,007 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$
Densité	2,7	2,9	3,2
Épaisseur moyenne	30 km	10 km	2900 km

### Questions

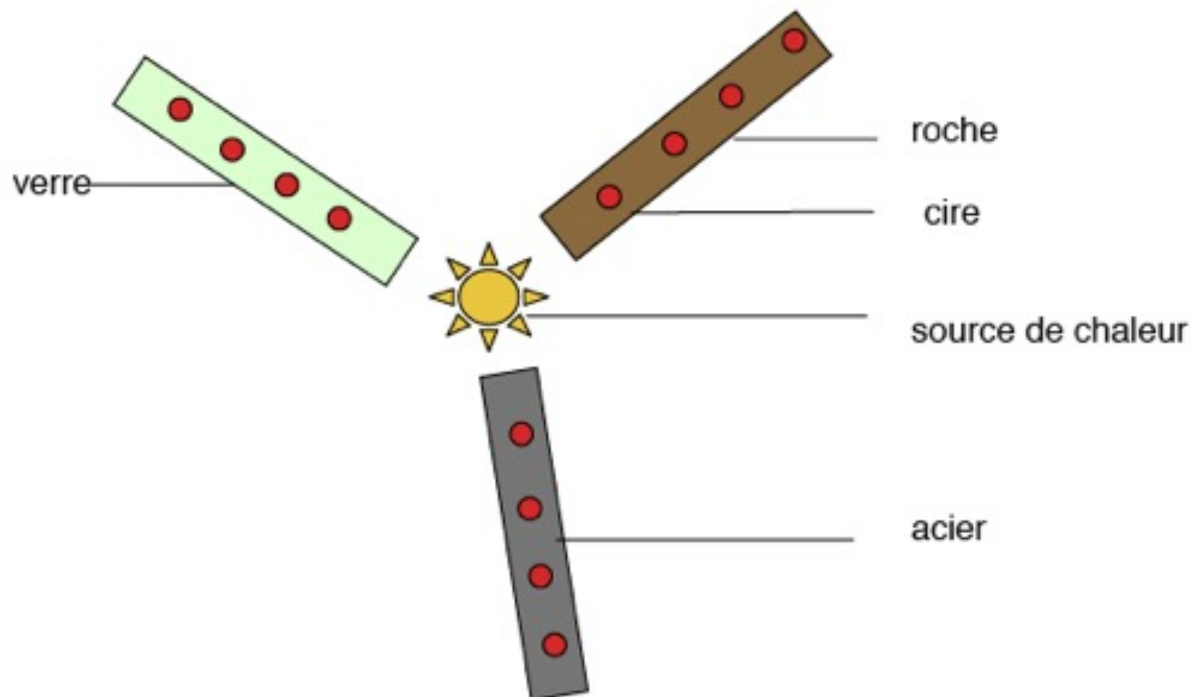
1. A partir des données quantitatives présentées dans le tableau ci-dessus, calculer les puissances totales (en W) délivrées par les croûtes continentales et océaniques et le manteau.
2. Donner les pourcentages de contribution et conclure.
3. Comparaison océans-continentes.

Continents		Océans	
Afrique	$49,8 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$	Atlantique Nord	$67,4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
Amérique du Sud	$52,7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$	Atlantique Sud	$59,0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
Amérique du Nord	$54,4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$	Océan Indien	$83,3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
Australie	$63,6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$	Pacifique Nord	$95,4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
Europe et Asie	$60,2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$	Pacifique Sud	$77,4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
		Bassins marginaux	$71,1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$

## Annexe 8

Réaliser des observations de transfert de chaleur par conduction sur différents matériaux en utilisant un modèle analogique

Schéma du montage :



### Bilan de l'activité

La conduction est un transfert de chaleur de proche en proche c'est-à-dire d'atome en atome, sans déplacement de matière.

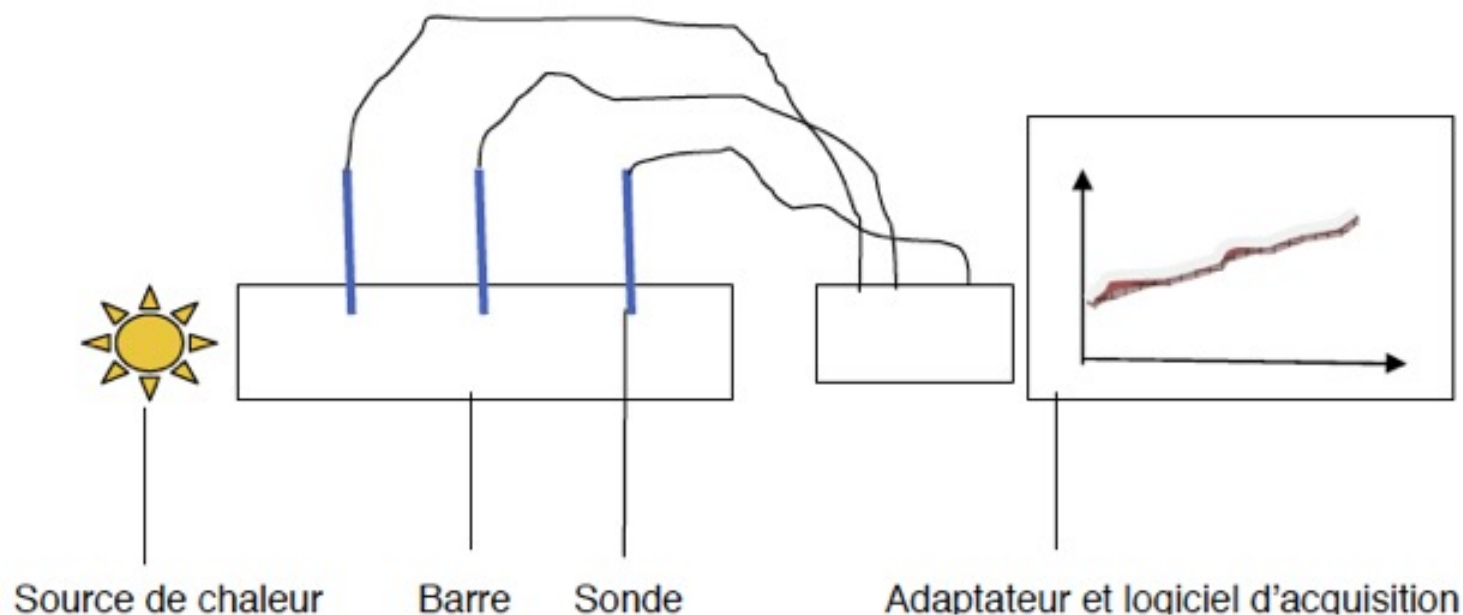
Elle se réalise de plus ou moins vite. Certains matériaux, comme les roches conduisent mal la chaleur.



# Annexe 9

Réaliser des mesures de transfert de chaleur par conduction sur différents matériaux grâce à un dispositif ExAO

## Schéma du montage :



## Bilan de l'activité

La conduction est un transfert de chaleur de proche en proche c'est-à-dire d'atome en atome, sans déplacement de matière.

Elle se réalise de plus ou moins vite. Certains matériaux, comme les roches conduisent mal la chaleur.