



Forum Enseigner

Phénomènes convectifs dans la croûte

Convection hydrothermale et géoressources

Laurent GUILLOU-FROTTIER, Ingénieur-Chercheur, BRGM, Orléans

24 octobre 2018

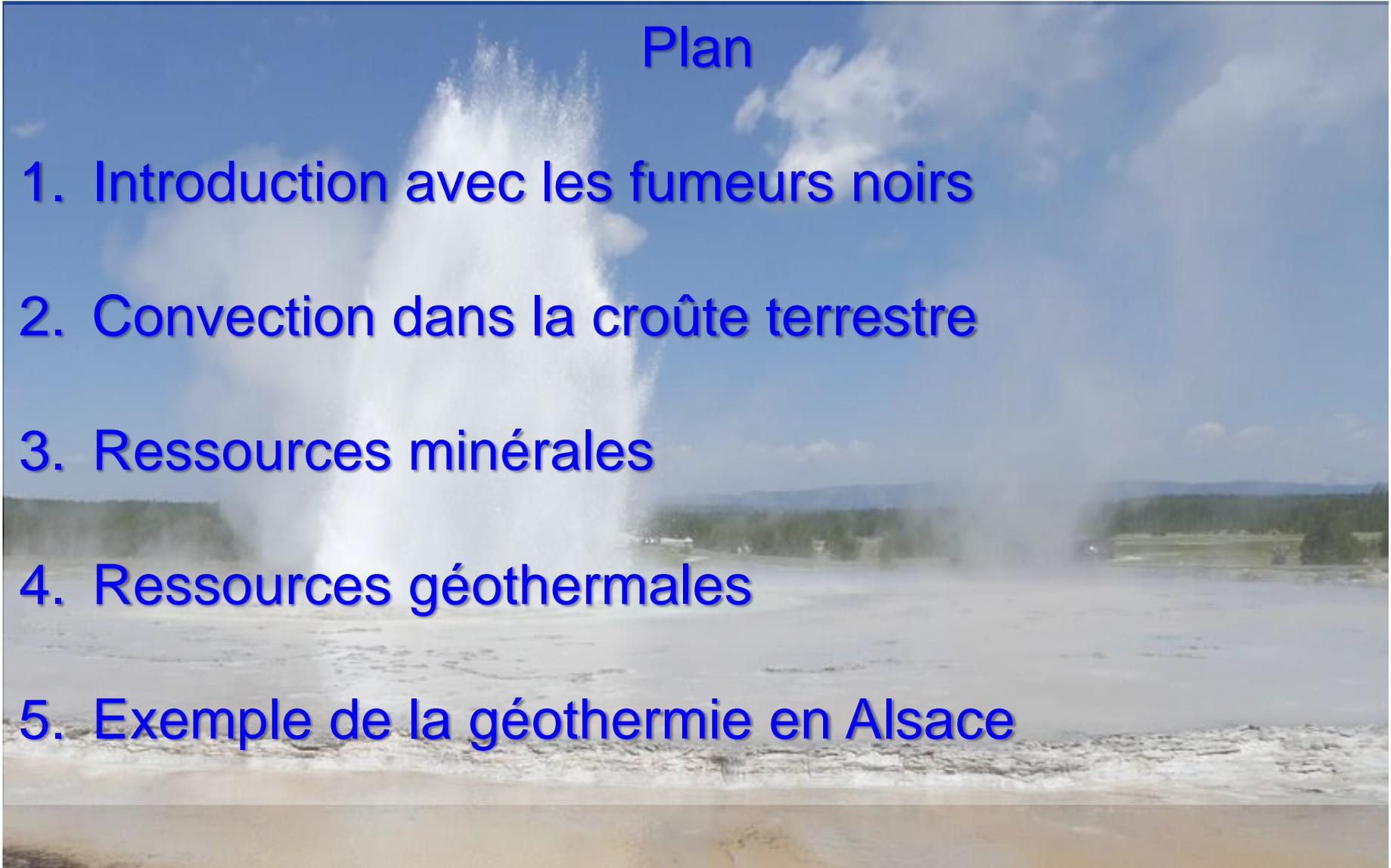
Synthèse et compilation de travaux de Thèse ou de Master de:

Virginie Harcouët (2005), Khalifa Eldursi (2009), Damien Bonté (2010), Cynthia Garibaldi (2010),
Clément Carré (2012), Sarah Deveaud (2015), Audrey Taillefer (2017), Vincent Roche (2017),
Gaëtan Launay (2018), Hugo Duwiquet (2018)



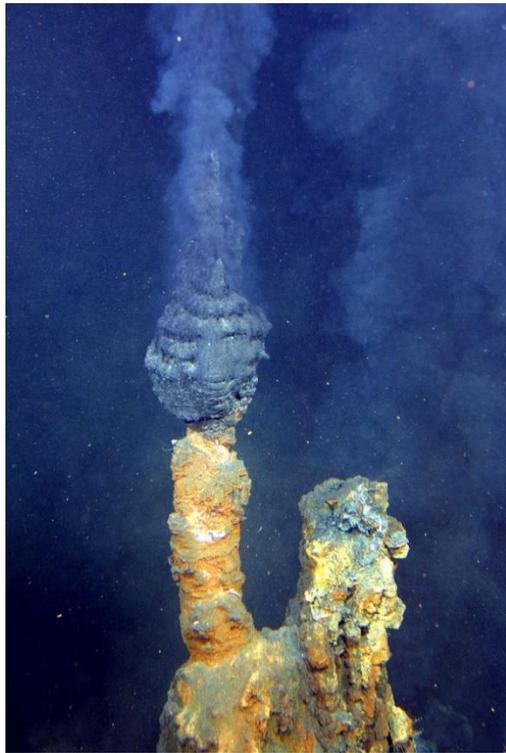
Plan

1. Introduction avec les fumeurs noirs
2. Convection dans la croûte terrestre
3. Ressources minérales
4. Ressources géothermales
5. Exemple de la géothermie en Alsace





1. Introduction avec les fumeurs noirs



Découverte en 1976 d'un ensemble de cheminées hydrothermales au-dessus de la dorsale du Pacifique, formant un « mont hydrothermal »

1977: mesures de températures, échantillonnage des fluides, découverte des écosystèmes et des communautés biologiques associés (bactéries thermophiles, crabes, moules, vers, crevettes...)

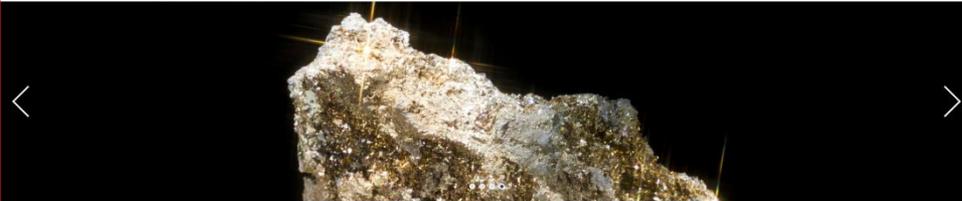
1979: découverte des fumeurs noirs (hautes températures 250-400 °C, fluides sulfurés) et fumeurs blancs (moyennes températures 150-250°C, fluides sulfatés)

2005: obtention par une compagnie minière des droits pour explorer les **gisements de sulfures massifs** associés (source de Pb-Zn-Cu, mais aussi Co, Au, Fe...)

Hauteur (d'un mont): jusqu'à 70-100 m; diamètre ~25-100 m; durée de vie ~10-100 ans; vitesse du fluide ~5-10 cm/s



Welcome About Us Our Business Social Contract Contact Us



Welcome to Neptune Minerals

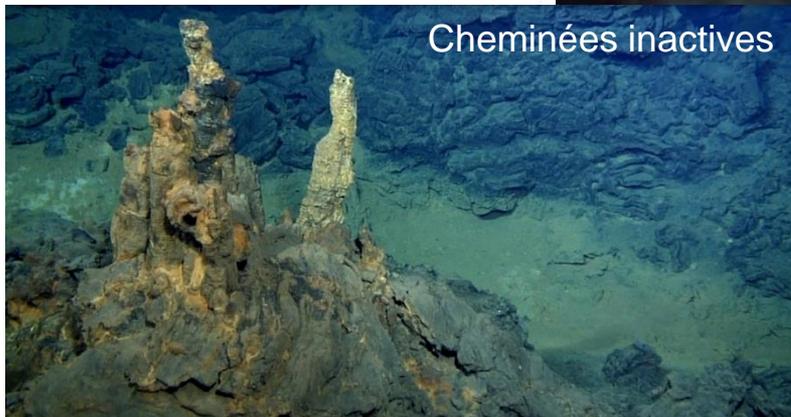
Seafloor Minerals Exploration and Resource Development

Compagnie australienne:

- campagnes d'exploration depuis 2005
- 7 pays du Pacifique ouest (Japon, Fidji, Nouvelle Zélande...)
- 175,000 km² explorés

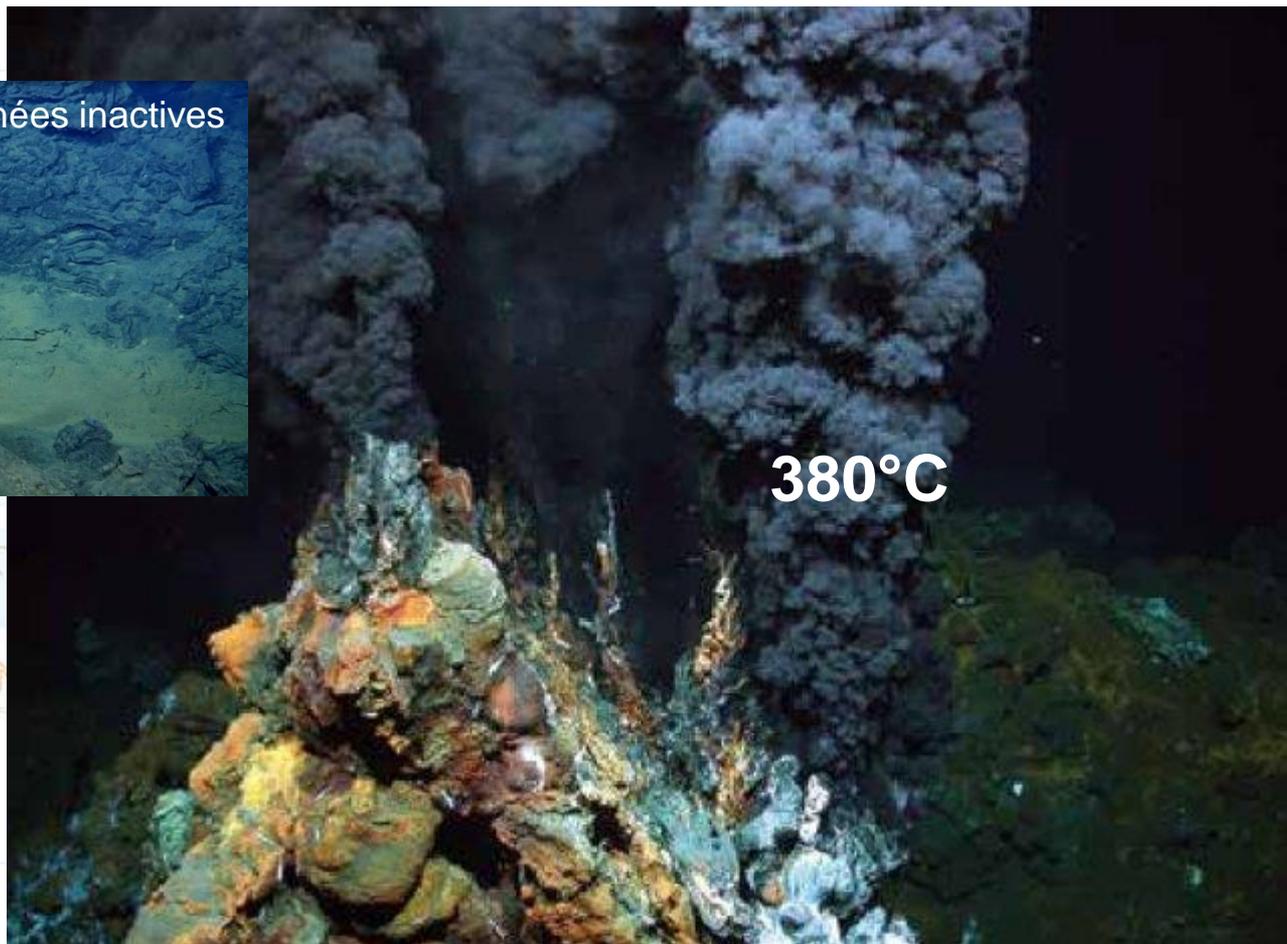
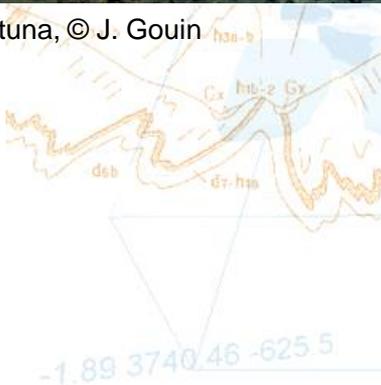


Fumeur noir à 2980 m de profondeur, ride médio-atlantique



Cheminées inactives

Wallis & Futuna, © J. Gouin



380°C

Rogers et al., 2015.

→ Gisements de sulfures massifs sous-marins
(Cu, Pb, Zn, Ag, Au...)

ANNIVERSARY RETROSPECTIVE

Deep-sea ore deposits

The discovery of metal-rich hot springs on the ocean floor has spawned a new mineral exploration industry. Also known as black smoker chimneys or seafloor massive sulfide deposits, people are looking to mine these deposits for base and precious metals, including Cu, Zn, Pb, Ag and Au (Fig. 1). Some authors have suggested that this new resource could drastically shift the metal supply markets¹ and solve the looming peak copper crisis, when demand will outstrip production from land-based resources. The possibility of deep-sea mining has triggered debate about the sustainable use of our oceans, and whether the environmental impacts of mining active black smokers — populated by unique chemosynthetic ecosystems — are worth the risk.



Fig. 1 | Active high-temperature black smoker chimneys associated with the formation of seafloor massive sulfide deposits. The chimneys were discovered at the Niu South Vent Field, NE Lau Basin, using conventional water column survey techniques. Photo from ROV QUEST dive 429, SO-263 TongaRift Cruise, June 2018. Credit: MARUM - Center for Marine and Environmental Sciences, University of Bremen

To date, approximately 165 seafloor massive sulfide deposits containing appreciable quantities of metals have been found²; however, there is a serious lack of information about their size, composition and distribution. It is unclear as to whether these seafloor resources can provide the metals we need in the future. Studying deposit densities, Hannington and colleagues³ calculated a global estimate of the resource potential of seafloor massive sulfide deposits. This study examined deposit densities in 32 control areas of equal size along mid-ocean ridges, arcs and back-arc spreading centres, representing the range of geological settings where seafloor massive sulfide deposits form. From here, the total accumulation of metal in these deposits was calculated based on resource calculations from well-explored deposits.

The authors estimated the total tonnage for seafloor neovolcanic zones to be approximately 600 Mt. This is small compared to both total past production and current reserves of fossil deposits on land (estimated to be about 14,000 Mt), and some meagre individual deposits were only about 70,000 t in size⁴. Although the total metal content is significant, these findings suggest that the predicted resources on the seafloor contained within neovolcanic zones is insufficient to satisfy the growing global demand for these metals. In addition, the predicted amount

of metal in these deposits is much less than the total amount of metal delivered to the seafloor by black smoker chimneys. The fate of these metals is unknown, but may be contained within the plumes of black smoke that end up accumulating in distal marine sediments.

The research by Hannington and colleagues inspires an important question: where should we look to discover high-tonnage deposits, or districts of smaller but closely spaced deposits on the seafloor? It is possible that inactive deposits may represent a much larger resource than the active deposits contained within neovolcanic zones of the world's oceans. It is therefore necessary to develop genetic and exploration models for large, inactive deposits on the seafloor that cannot be found using conventional water column survey

techniques, to identify the areas of the ocean with the greatest mineral potential. Deep-sea mining may become a reality within the next decade, so a priority must be developing methods to find inactive deposits that pose lower environmental risk.

Melissa O. Anderson
 Department of Earth Sciences, University of Toronto, Toronto, Canada. A winner of the Geoscopy competition.
 e-mail: melissa.anderson@utoronto.ca

Published online: 1 October 2018
<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0237-y>

References

1. Sison, P. A. *Science* **299**, 673–674 (2003).
2. Cathles, L. M. *Miner. Depos.* **46**, 639–657 (2011).
3. Hannington, S. E. *Iron-Ridge Global Database of Active Seafloor Hydrothermal Vent Fields, Version 2.0* (IronRidge, IPRG, 2010).
4. Hannington, M. D. et al. *Econ. Geol.* **15**, 317–338 (2010).



“ Black smokers typically emit particles with high levels of sulfur-bearing minerals, or sulfides.

When it comes in contact with cold ocean water, many minerals precipitate, forming a black, chimney-like structure around each vent.

The deposited metal sulfides can become massive sulfide ore deposits in time.”

Wikipedia

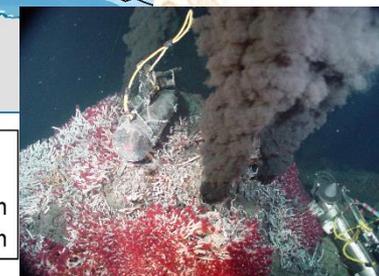
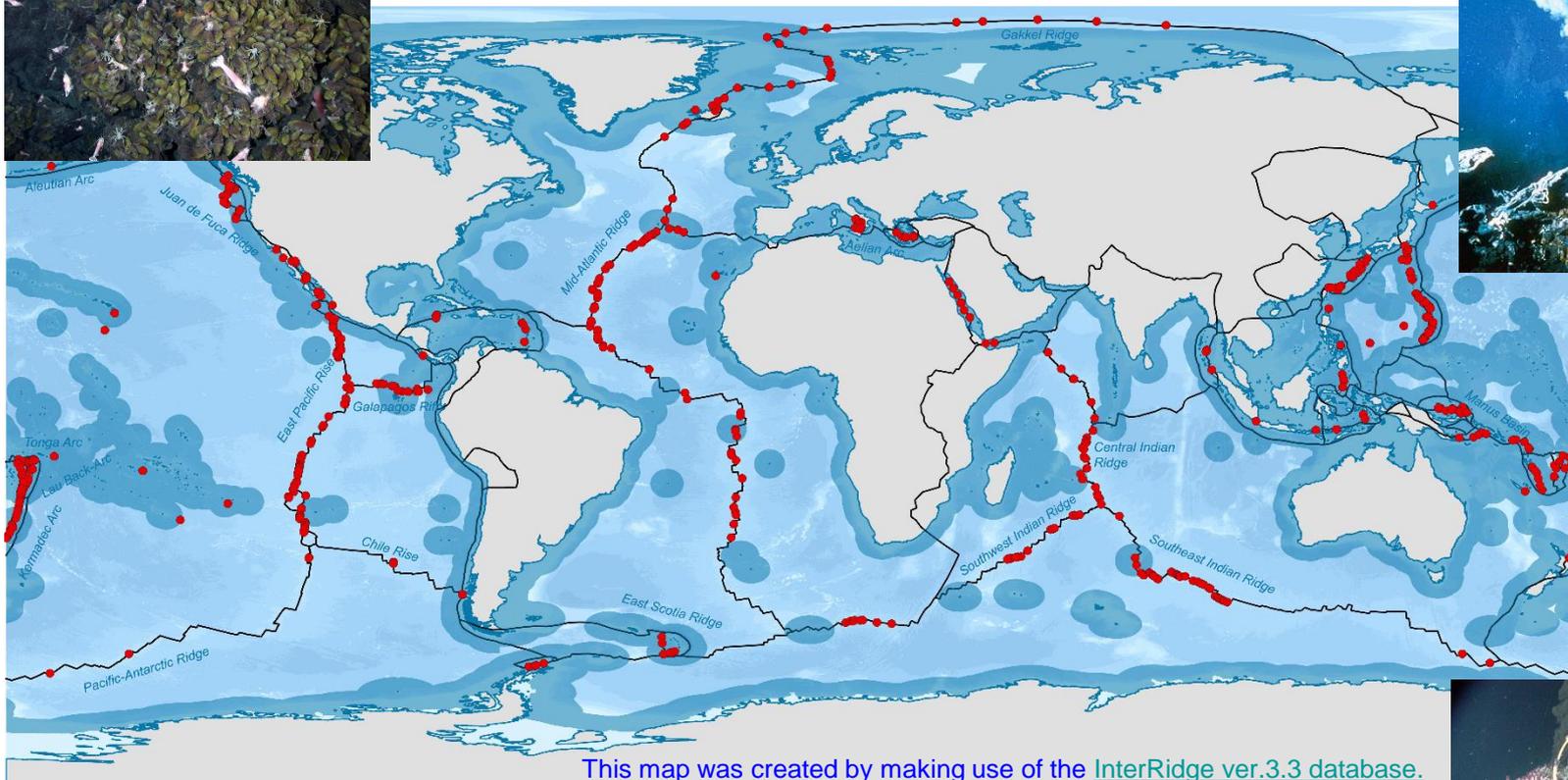
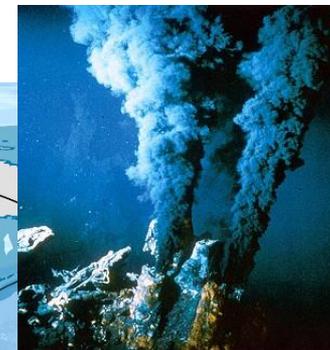


VMS (volcanic massive sulfides), Timmins, Ontario. Âge: 2,7 Ga

« Deep-sea mining may become a reality within the next decade, so a priority must be developing methods to find inactive deposits that pose lower environmental risk. »



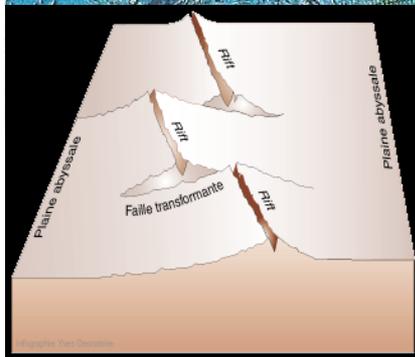
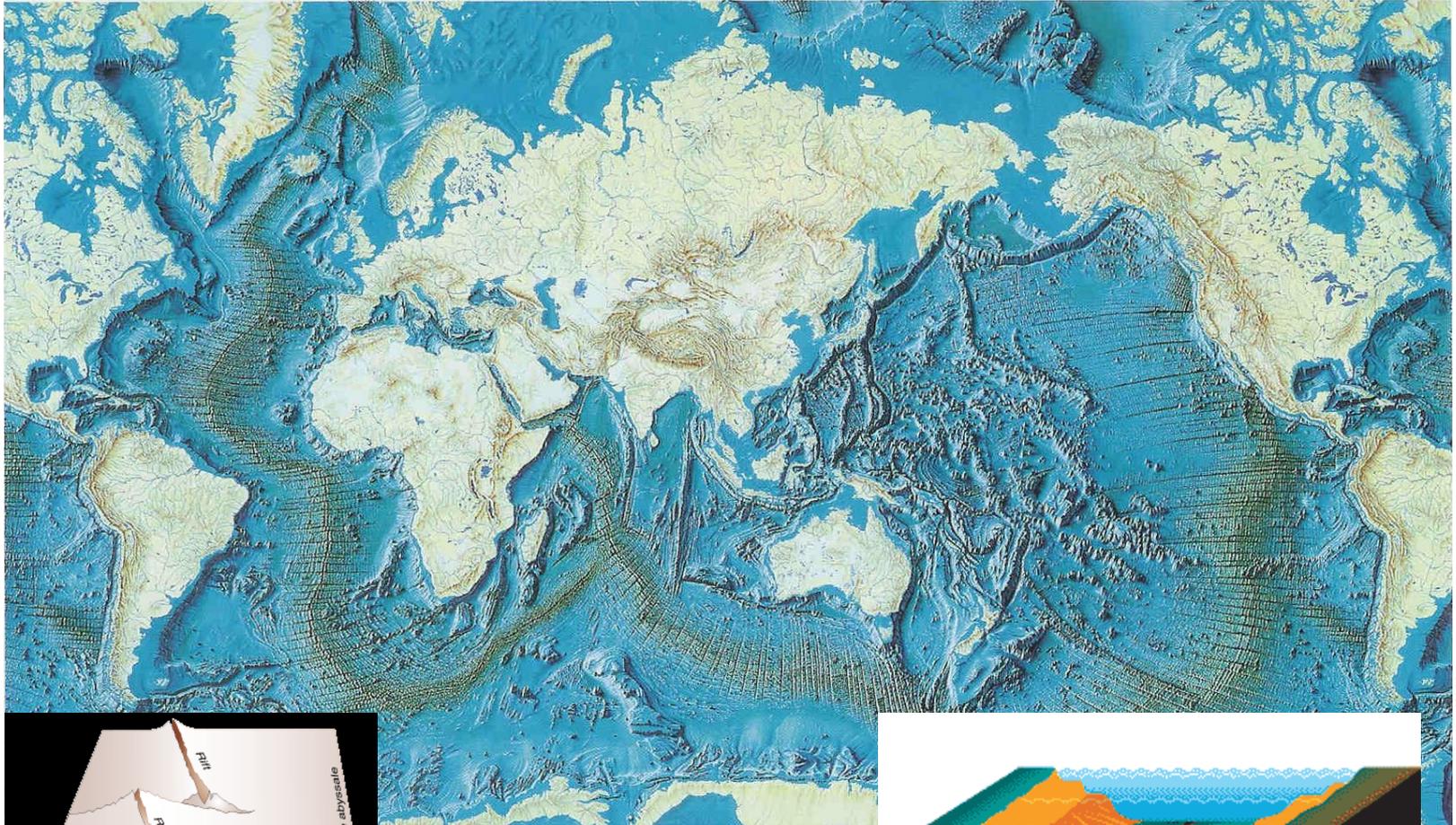
Distribution des cheminées hydrothermales (n~500)



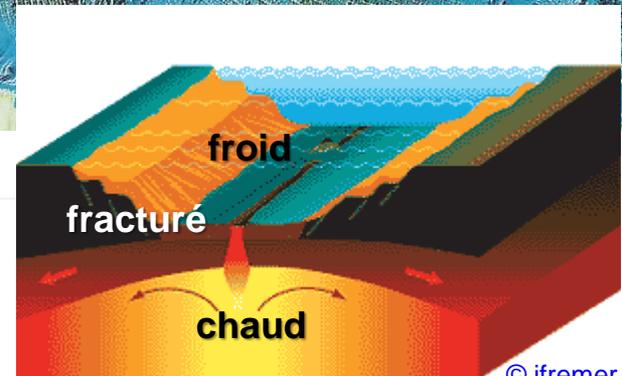
Legenda

- Hydrothermal vent fields
- Tectonic boundaries
- Land
- EEZ
- 0 m
- 1000 m
- 2000 m
- 3000 m
- 4000 m
- 5000 m
- 6000 m
- 7000 m
- 8000 m
- 9000 m

Cheminées hydrothermales: au niveau des dorsales, des zones de subduction, et volcanisme intra-plaque



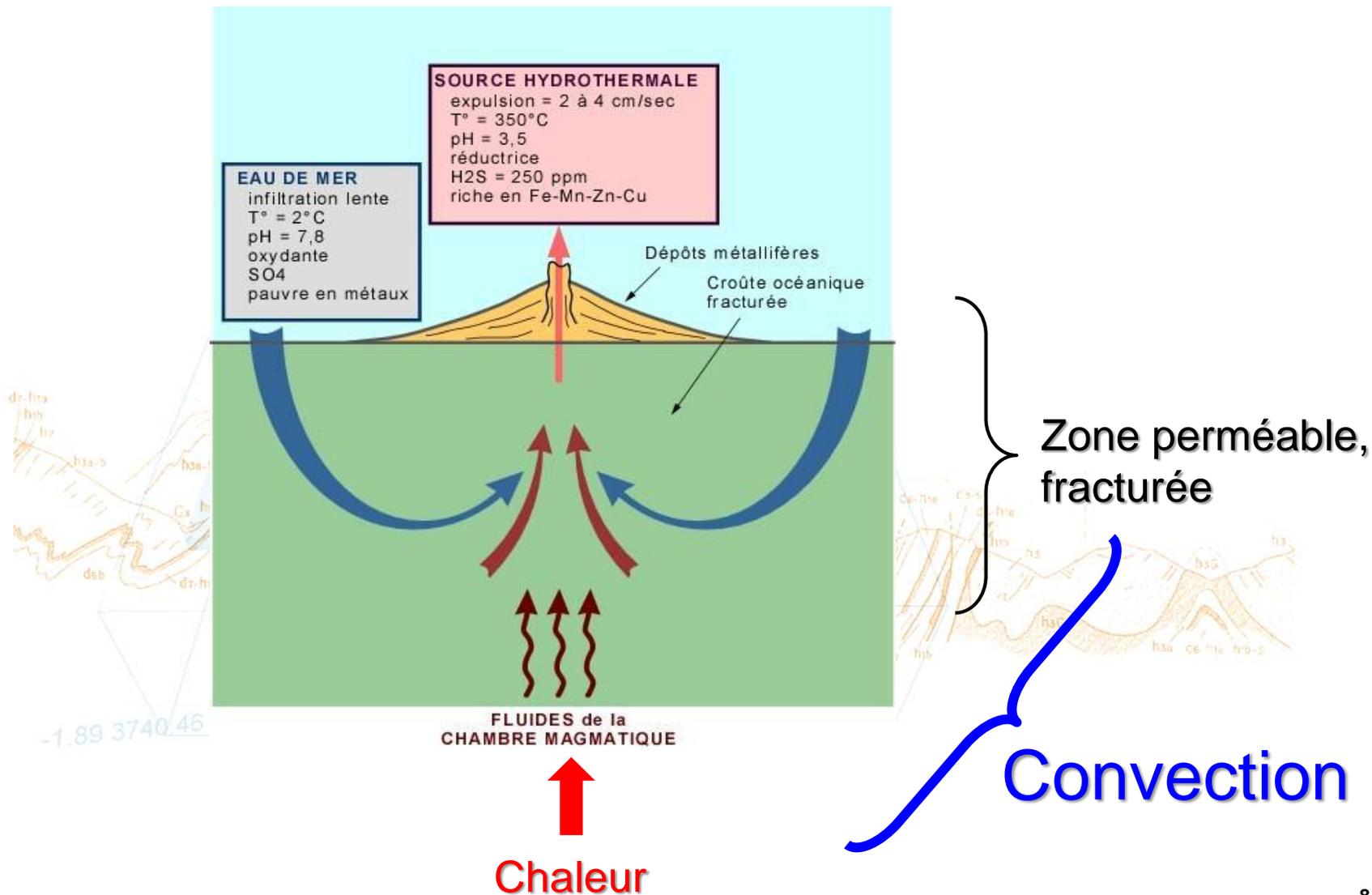
© ifremer



© ifremer

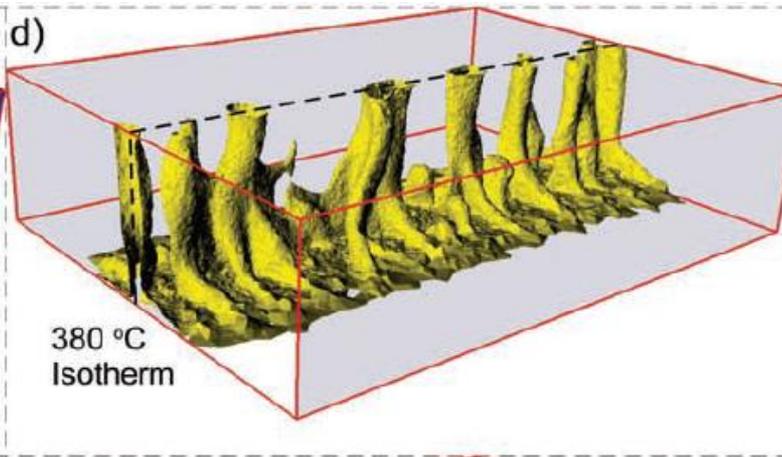
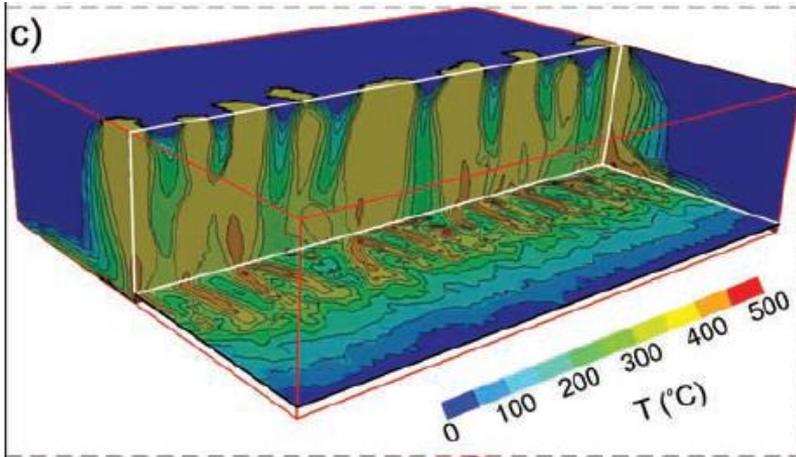


Fonctionnement des fumeurs noirs (Wikipedia)



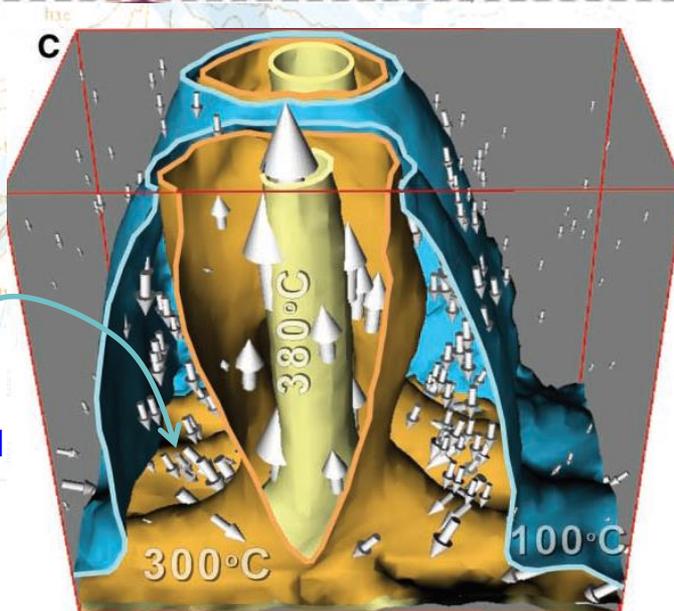


Modèles numériques de la convection hydrothermale des fumeurs noirs



Coumou et al., J.G.R. 2009.

Le fluide qui descend est à [100-300 °C]

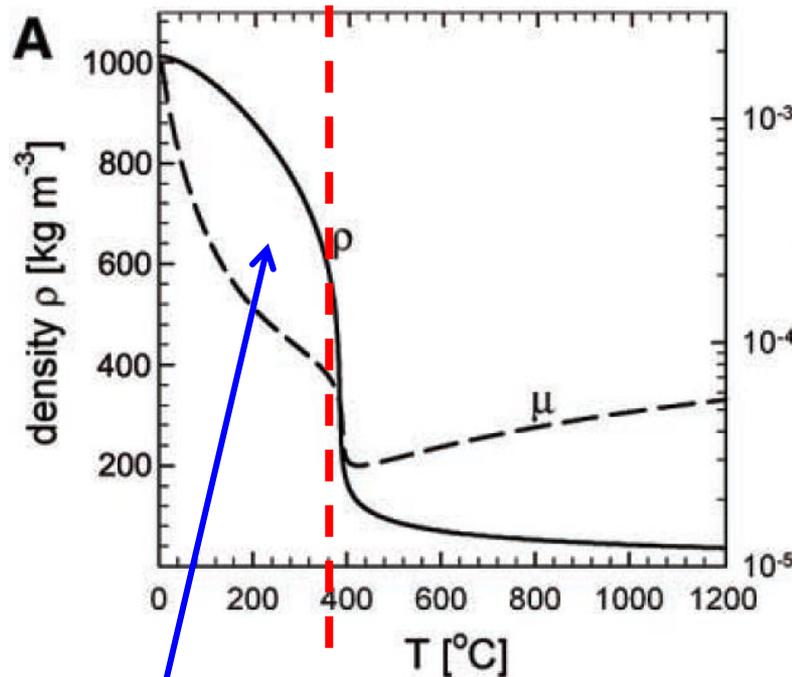


Le fluide qui remonte au centre de la cheminée est à **380°C**

Coumou et al., Science 2008

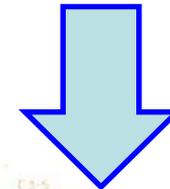


Propriétés physiques de l'eau de mer, chargée en sulfures, à 3 km de profondeur



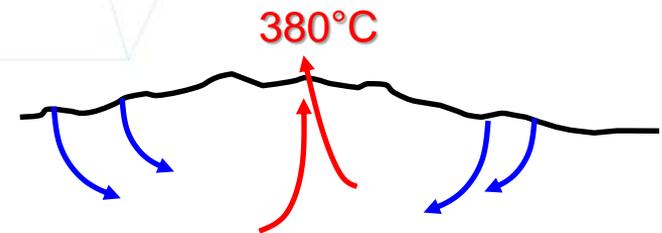
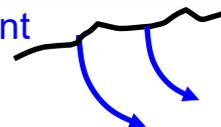
A 380°C, on observe:

- une forte baisse de la densité
- une forte baisse de la viscosité



La « fluxibilité » est maximale: la résistance hydraulique est minimale et le transport de chaleur par écoulement ascendant est favorisé.

Le fluide s'enfonce encore + facilement quand il est chauffé: écoulements descendants favorisés





Les « fumeurs blancs » rejettent des fluides sulfatés, moins chauds, entre 150 et 250°C... Composition du fluide différente: lois physiques différentes..



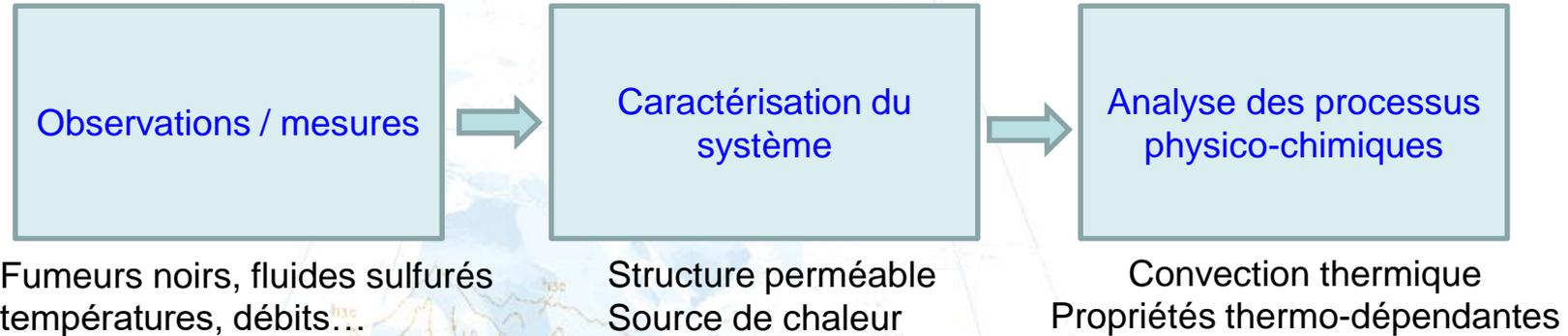
http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/04fire/logs/hirez/chimneys_hirez.jpg

© Ifremer – campagne Nautilau

Il est probable que les propriétés physiques des fluides hydrothermaux **sulfatés** diffèrent de celles des fluides hydrothermaux **sulfurés**, et que la fluxibilité maximale soit alors autour de 150-250°C...



Résumé



Simulation numérique des processus hydrothermaux (convection thermique, processus de dissolution/précipitation, etc)



**Compréhension du système, Reproduction des observations... et prédiction !!
→ Application aux ressources minérales et géothermales**



2. La convection dans la croûte terrestre

Sur le site de l'Ifremer, où des tas d'informations sur les « systèmes hydrothermaux » existent, on lit, pour ce qui concerne le « fonctionnement » de ces systèmes:

L'eau de mer se réchauffe en profondeur, réagit fortement avec les roches traversées et se charge de métaux dissous.

Plus chaude, donc plus légère, elle remonte et jaillit sur le fond à des températures atteignant parfois 400°C. Le choc thermique avec l'eau environnante fait précipiter, sous forme de cheminées, les métaux et sulfures qu'elle transportait.

<https://wwz.ifremer.fr/gm/Comprendre/Nos-questions/Les-systemes-hydrothermaux/Hydrothermalisme/Comment-fonctionne-un-systeme-hydrothermal>

- C'est bien la définition de la « **convection hydrothermale** » !
- Le terme « convection » est trop souvent « réservé » à l'atmosphère, aux océans, au manteau ou au noyau externe...
- Alors, oui, le milieu ne bouge pas... mais le fluide dans la roche perméable, si !
- Même chose pour les systèmes hydrothermaux continentaux...





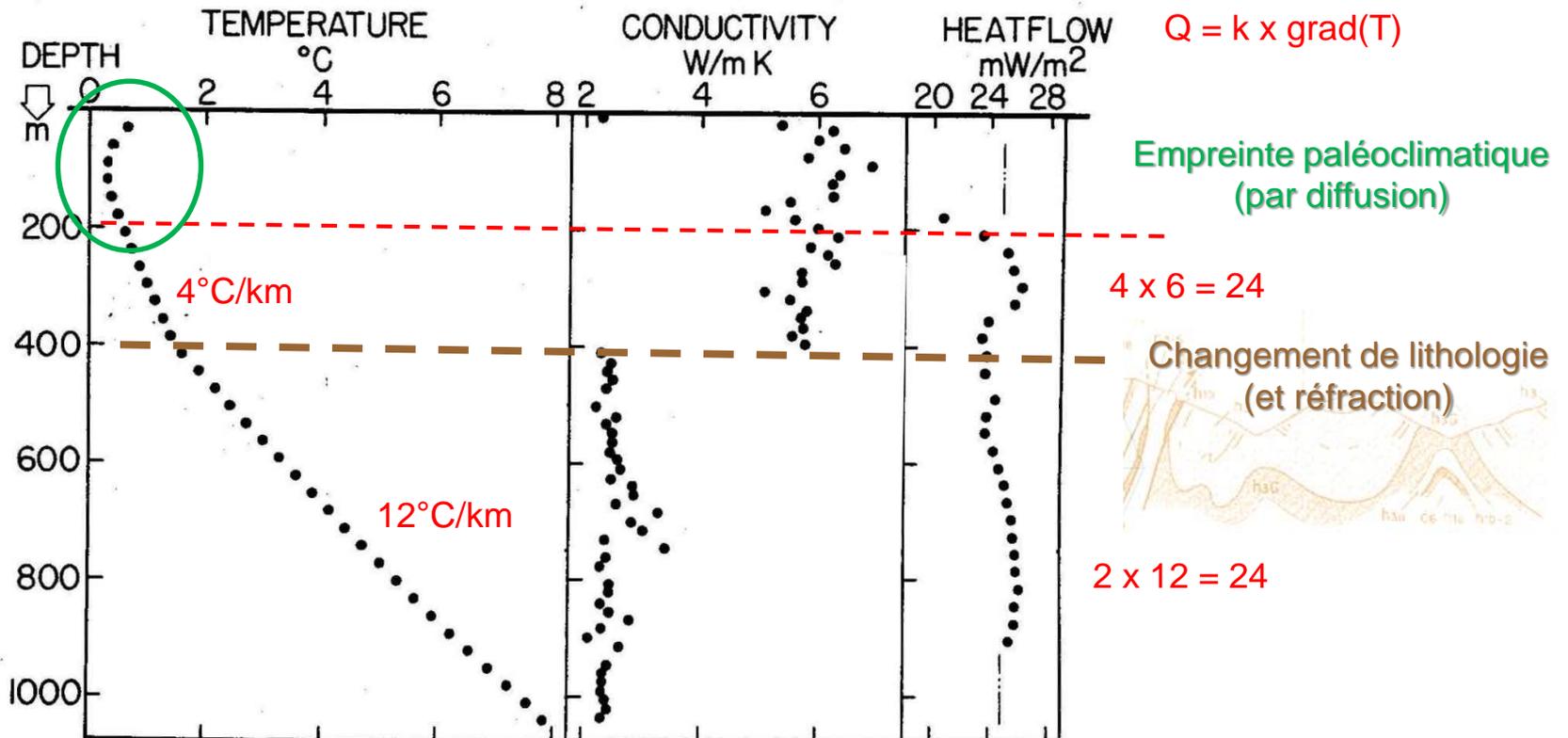
2. La convection dans la croûte terrestre

2.1 Signatures géologiques

(les photos de geysers, de sources chaudes, des fumeurs...)

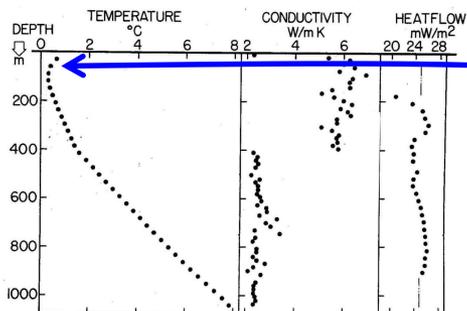
2.2 Signatures thermiques....

→ signatures de la **conduction** thermique (ici, diffusion et réfraction)



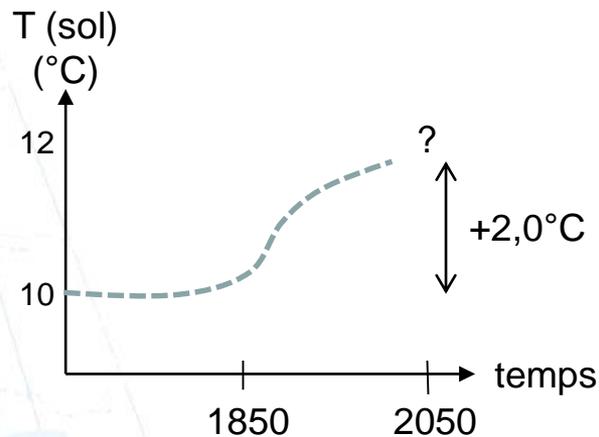


Signatures de la *conduction* thermique

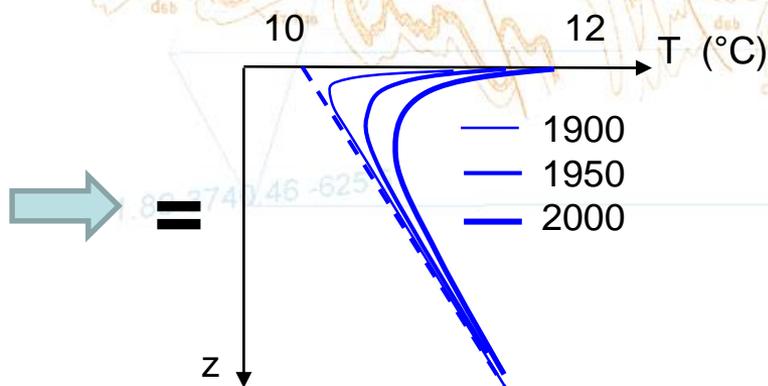


Signature paléoclimatique ???

... OUI, par diffusion thermique !

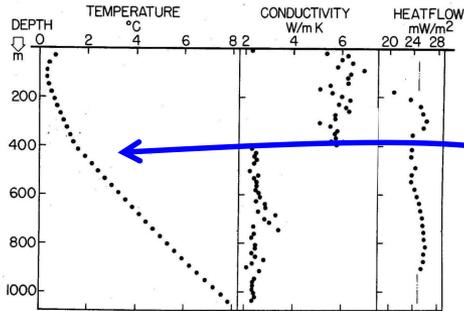


Gradient constant (non perturbé) + perturbation climatique



Il y a diffusion dans le sous-sol des perturbations paléoclimatiques (propagation vers le bas)

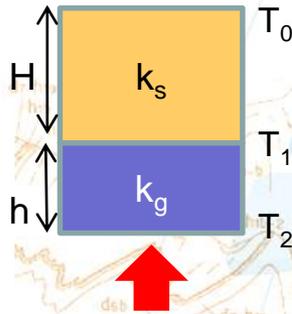
Seule méthode *directe* des variations de la température du sol (et de l'atmosphère !) au cours des âges



Changement de pente du géotherme ?

.... OUI, par réfraction thermique !

Pour une croûte « à l'équilibre thermique », c'est le flux de chaleur (d'énergie) qui est constant



$$Q = k_g \times (T_2 - T_1) / h = k_s \times (T_1 - T_0) / H$$

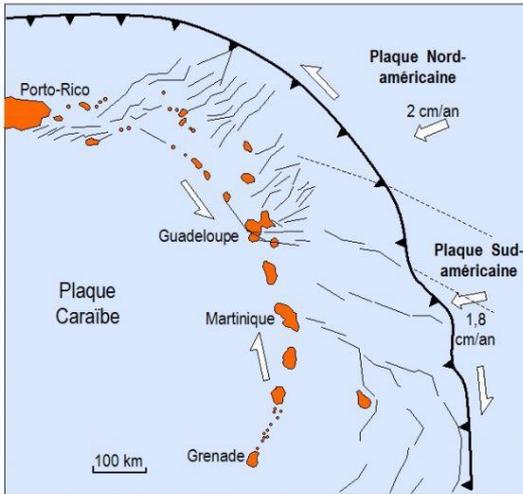
- Si la conductivité est faible, le gradient est élevé
- Si la conductivité est forte, le gradient est faible

flux rentrant = $Q = \text{conductivité} \times \text{gradient}$

Les ruptures de pente dans un géotherme sont typiques d'un changement de lithologie et d'un régime thermique purement conducteur (pas de convection thermique)



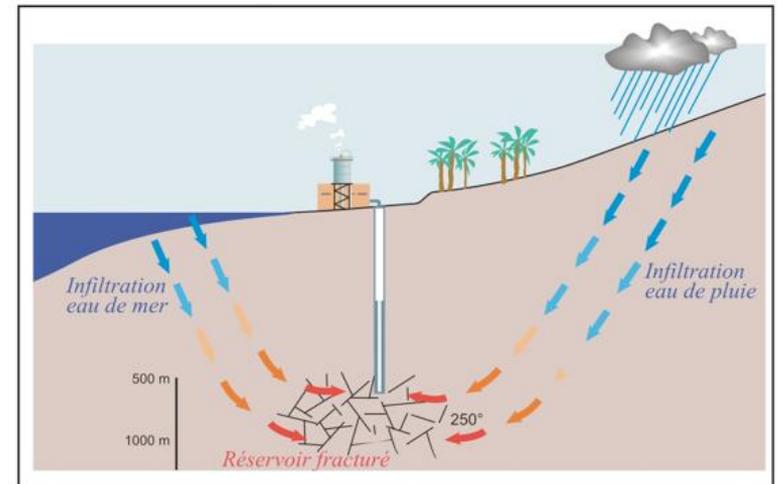
→ signatures de la **convection** thermique: températures anormalement élevées dans le proche sous-sol



Bouillante, Guadeloupe

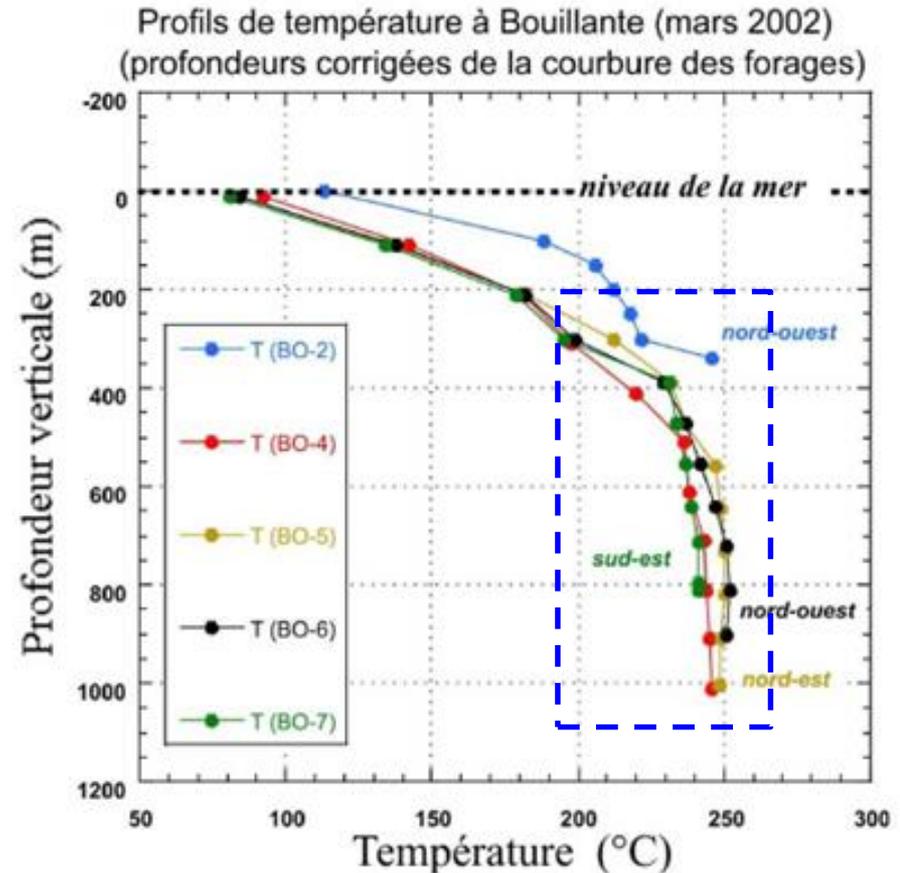
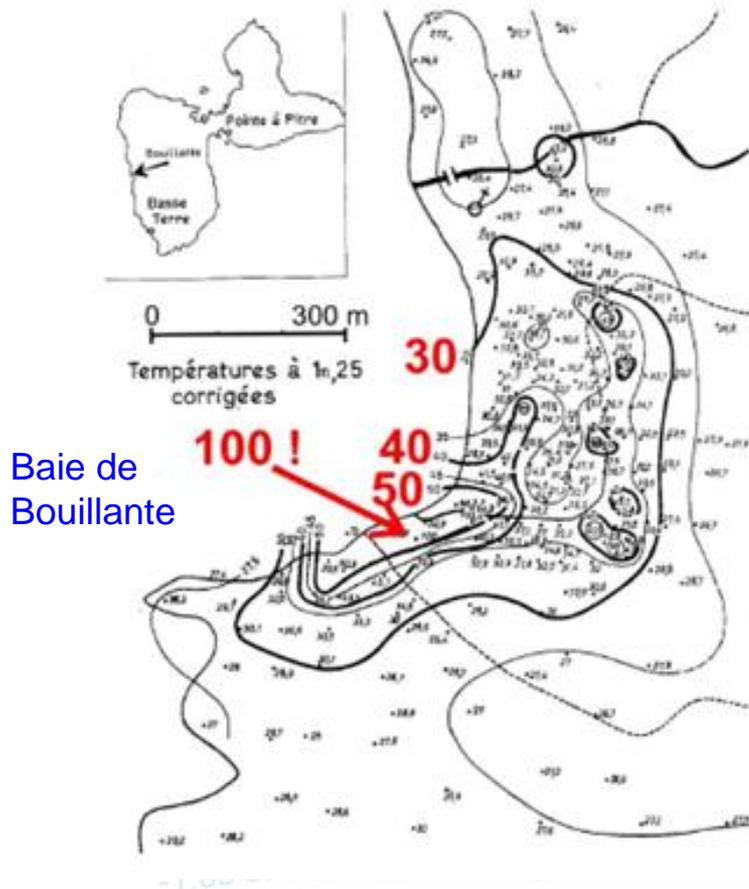
Centrale électrique
15 MW depuis 2005
Objectif: 45 MW en 2023

250°C à 400-600 m de profondeur !!





→ Signatures de la **convection** thermique: températures anormalement élevées dans le proche sous-sol



Forte diminution du gradient thermique... ou
 « verticalisation progressive du géotherme »

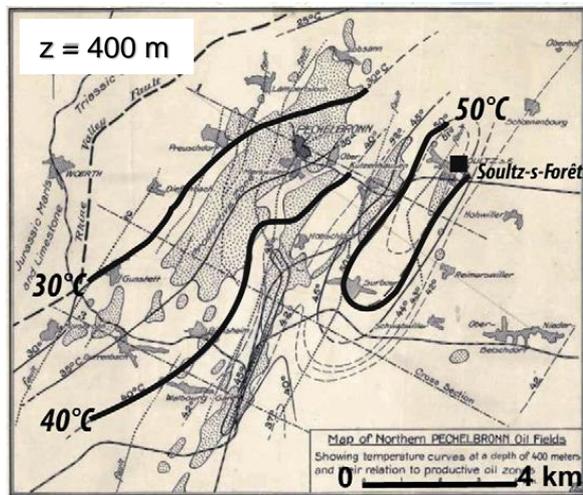
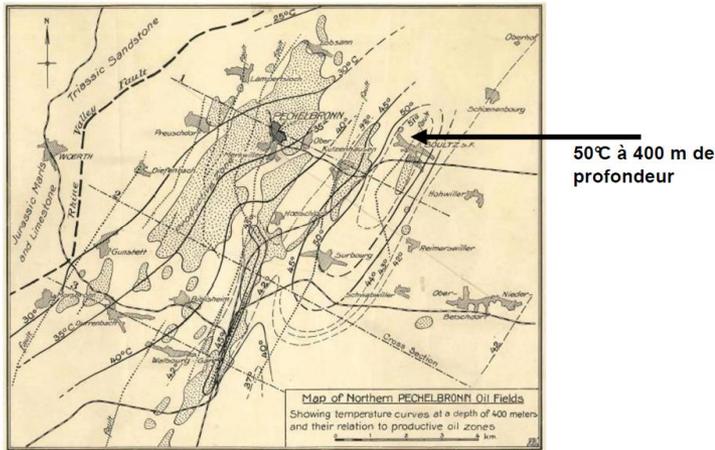
≠ rupture de pente !!



→ Signatures de la **convection** thermique: températures anormalement élevées dans le proche sous-sol

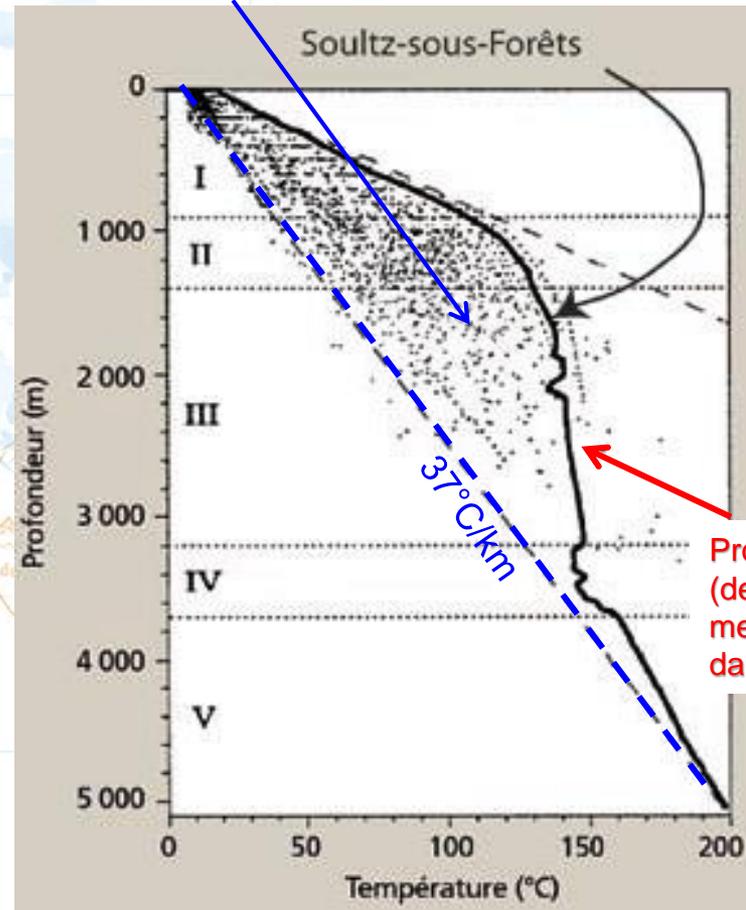
Sultz-sous-Forêts, Alsace

Premières mesures de T° profondes en 1929
 (forages pétroliers de Pechelbronn)



Haas & Hoffmann, 1929

Autres mesures de T° en Alsace

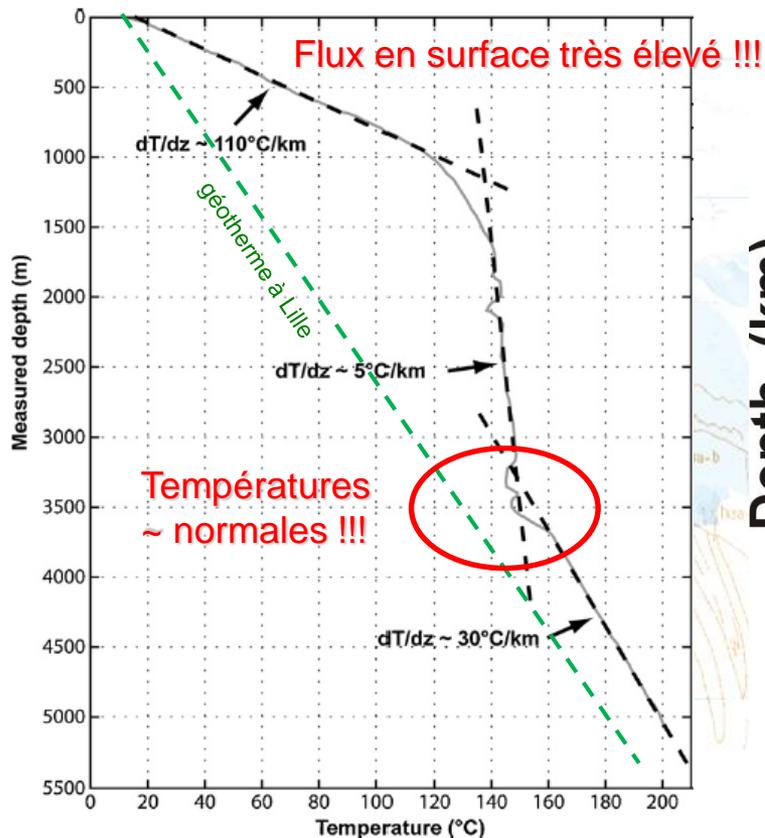


Profil typique....
 (de la convection !)
 mesuré en continu
 dans le forage GPK2.

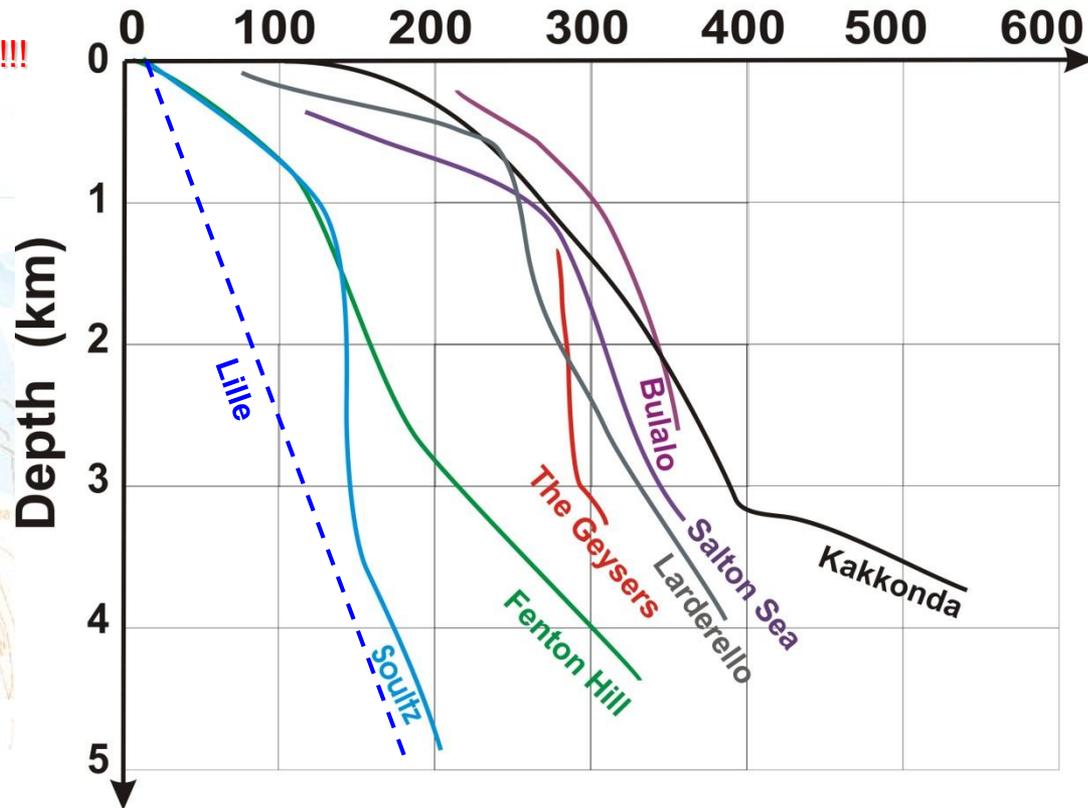


Exemples de profils thermiques mesurés dans les systèmes géothermaux

Soultz-sous-Forêts, Alsace

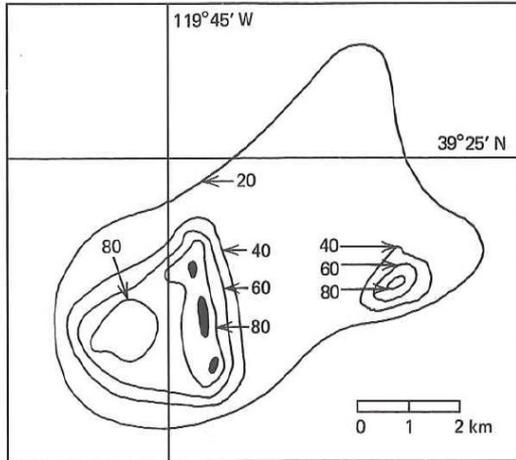


Temperature (°C)



- Flux de chaleur élevé en surface (très fort gradient thermique)
- Gradient très faible en profondeur, puis ré-augmentation vers une valeur ~ « normale »

Steamboat springs, Nevada

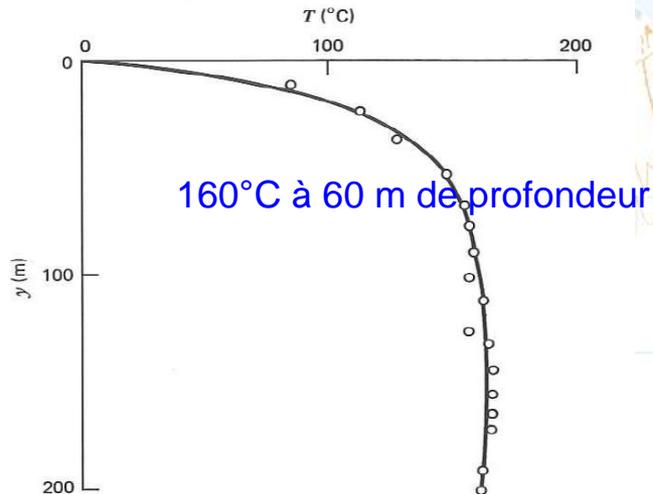


9-18 Groundwater temperature (°C) in the Steamboat Springs, Nevada, hydrothermal system. The solid areas are the regions of boiling hot springs and geysers.



Centrale électrique de Steamboat springs, 20 MW

9-19 Temperature as a function of depth in the Steamboat Springs hydrothermal system. The data are from the GS-3 well (White, 1968) and the solid line is from Equation (9-113).



Ici aussi, gradient élevé en subsurface, puis verticalisation progressive du profil de température



Conditions physiques permettant la convection thermique d'un fluide dans un milieu perméable

Le fluide léger va remonter au travers du milieu perméable, sauf si les forces résistantes sont trop importantes : compétition entre force motrice (gravitaire / flottabilité) et résistante (visqueuse)

En couplant les équations de la mécanique des fluides dans un milieu poreux/perméable (loi de Darcy) et celle des transferts de chaleur, on obtient un nombre sans dimension – le **nombre de Rayleigh** – permettant de quantifier l'importance de la convection.

$$Ra_{\text{poreux}} = \frac{g \alpha \Delta T k h}{\kappa \nu}$$

α en K^{-1} ,
 k (perméabilité) en m^2
 κ diffusivité thermique (m^2/s)
 ν viscosité cinématique (m^2/s)
 h hauteur du système (m)
 g 9,81 m/s^2

Nb de Rayleigh critique

$$Ra_c = 4 \pi^2$$

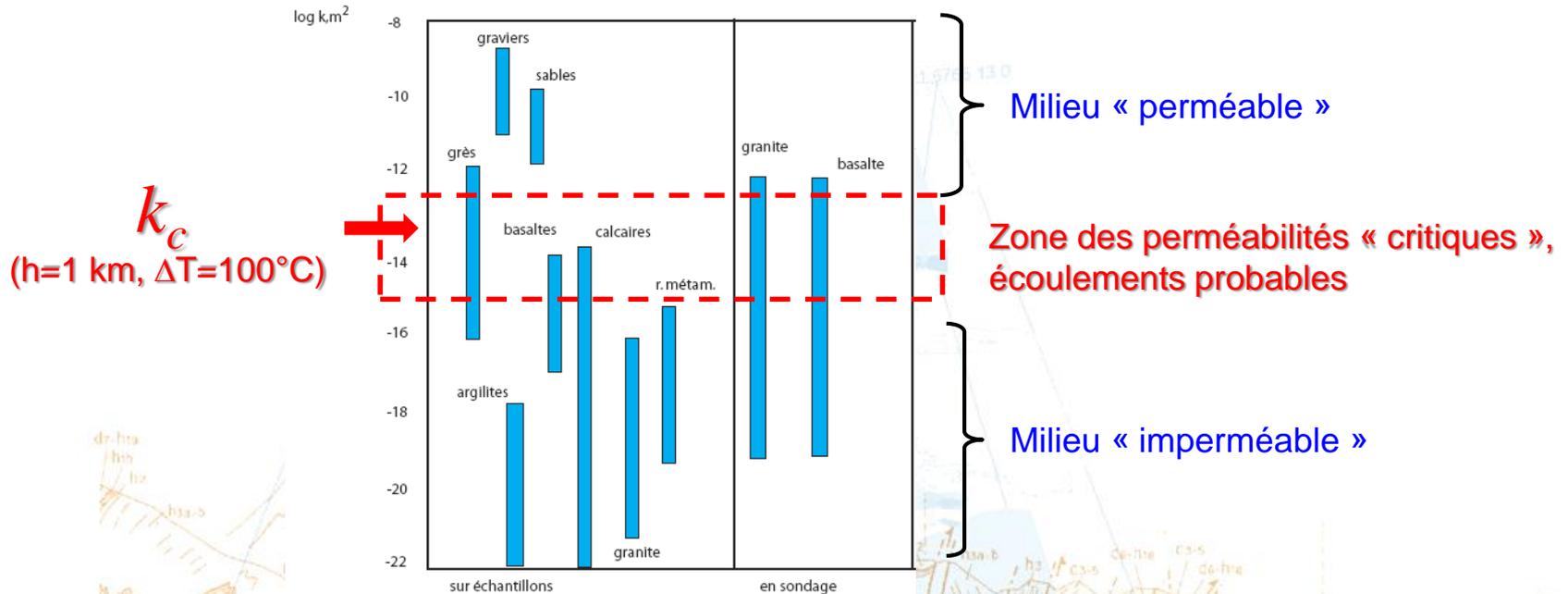
Conditions favorables : milieu perméable !! (les autres paramètres varient peu...)

Pour un système de 1 km d'épaisseur avec $\Delta T = 100^\circ C$, k doit être $> \sim 4 \cdot 10^{-14} m^2$

En réalité, cette expression de Ra correspond à une géométrie bien définie et des conditions aux limites bien spécifiques...



Valeurs typiques des perméabilités selon la lithologie



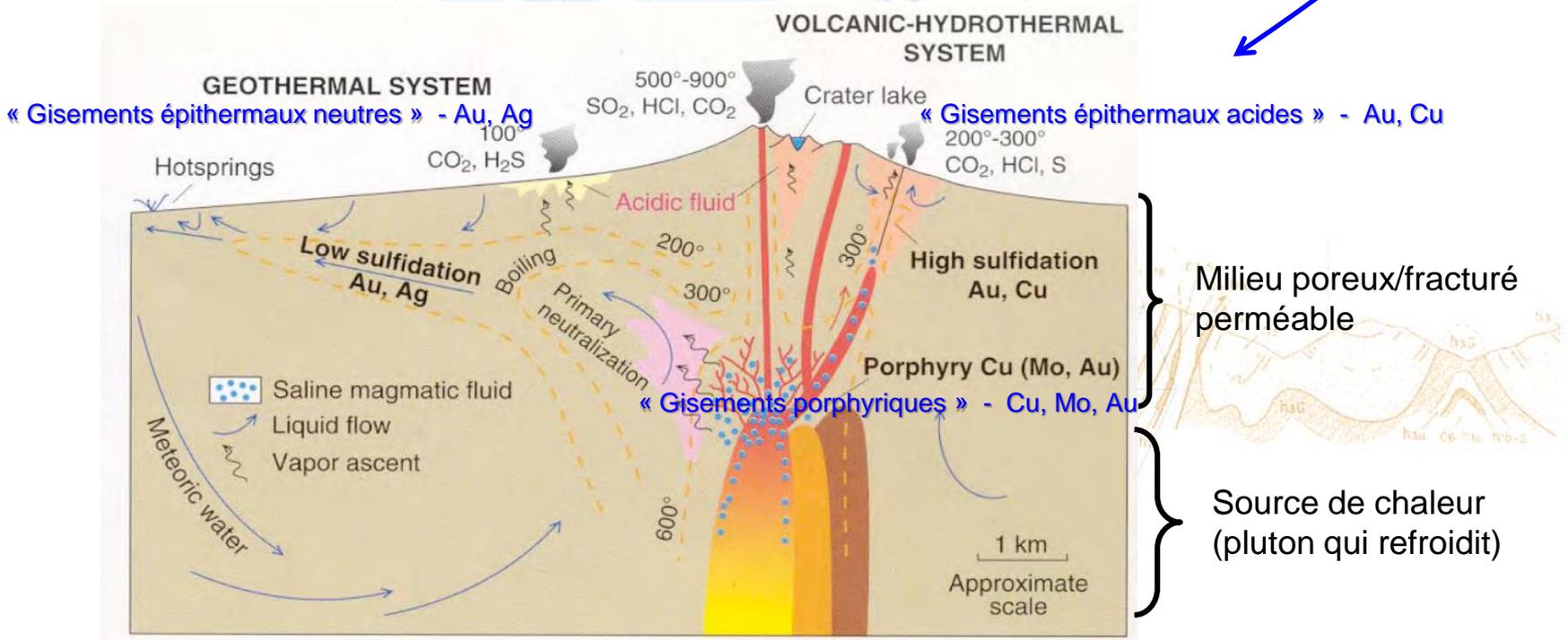
Résumé

- Les signatures thermiques de la **convection** sont identifiables facilement, et peu confondables avec des signatures **conductives**.
- Les conditions physiques pour que la convection hydrothermale se produise, se réduisent à la présence de lithologies **suffisamment perméables** (en ayant des ΔT suffisant, bien entendu)



3. Ressources minérales

- 1) Fumeurs noirs et gisements de type amas sulfurés
- 2) Systèmes hydrothermaux reliés à des intrusions magmatiques (« intrusion-related gold deposits »)
- 3) Zones faillées d'échelle crustale (« gisement d'or orogénique »)
- ...



Hedenquist and Lowenstern (1994)

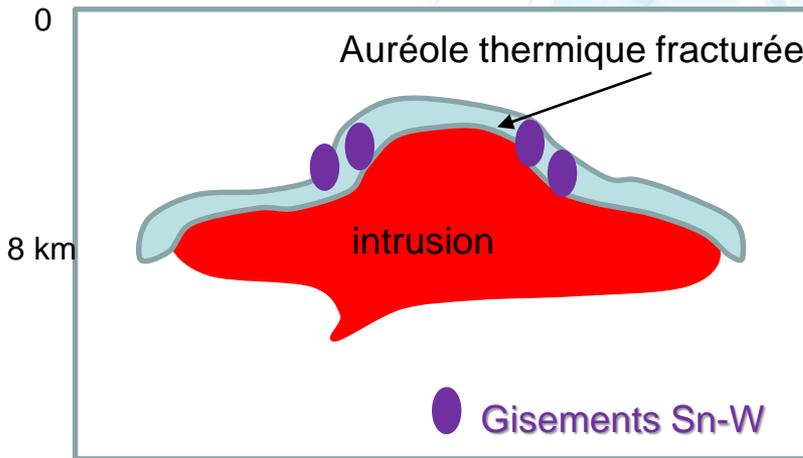


Minéralisations

- fluide hydrothermal contenant des métaux en solution
- précipitation (fonction de T, de P...)
- piégeage (pour une concentration importante)

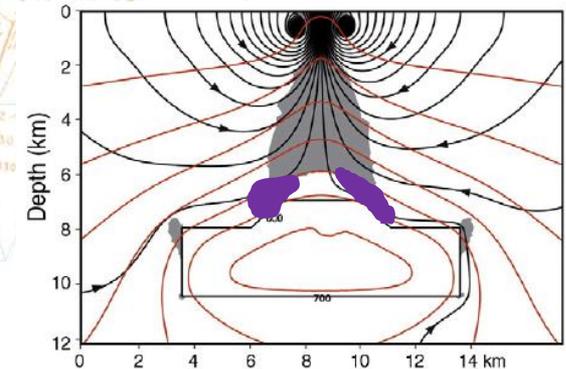
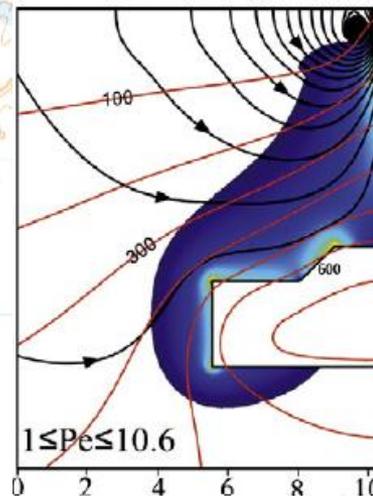
En 1^{ère} approximation, on peut rechercher dans les circulations hydrothermales, les zones où le refroidissement est le plus efficace, i.e. là où le fluide s'écoule rapidement vers les zones froides: $u \cdot \text{grad}(T) < 0$

Cas des intrusions (ici Sheelite dome, Yukon)

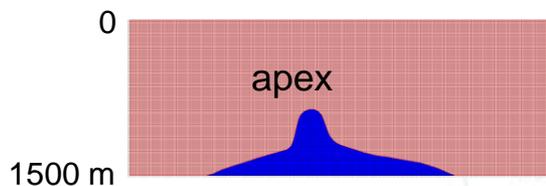


Modèle numérique de la circulation des fluides en tenant compte de la géométrie de l'intrusion.

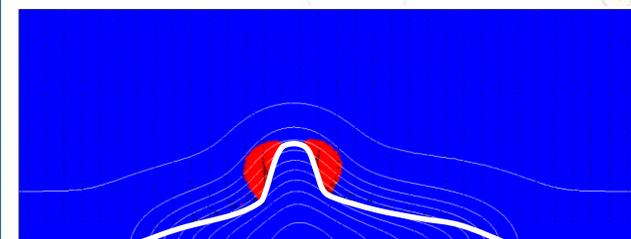
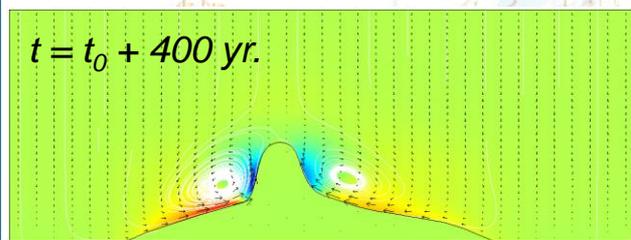
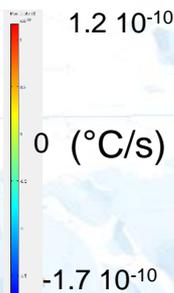
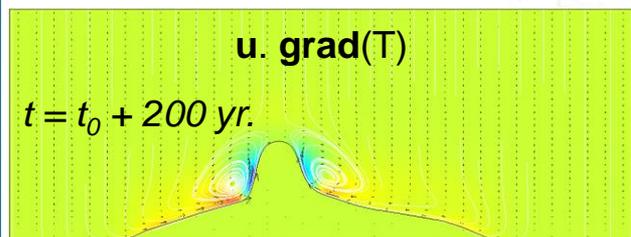
Localisation des minéralisations sur les bords inclinés du toit de l'intrusion



Zones où $T > 450^{\circ}\text{C}$



$T(t=t_0) = 750^\circ\text{C}$
Cooling from $t=t_0$



$t = t_0 + 400 \text{ yr.}$

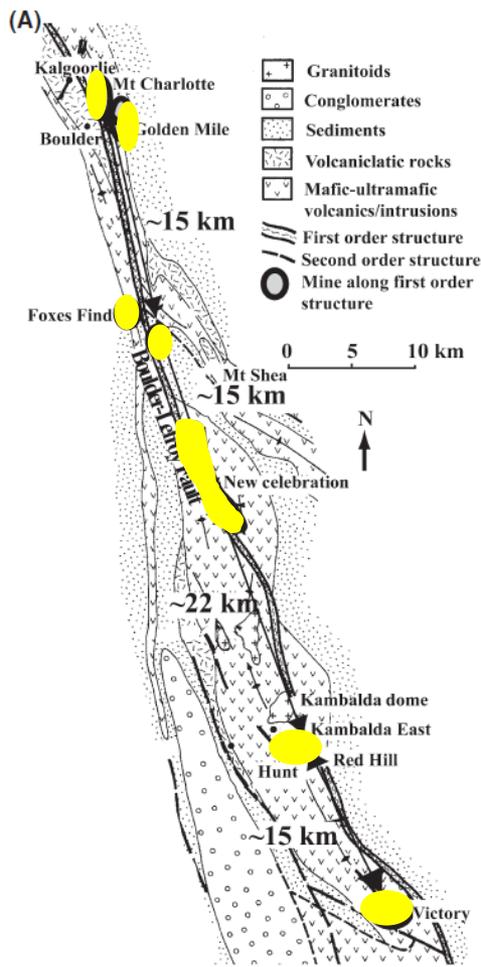
■ Zone favorable à la minéralisation

En réalité, les interactions chimiques eau-roche vont développer de la porosité, et la perméabilité du toit du granite va augmenter au cours du temps....

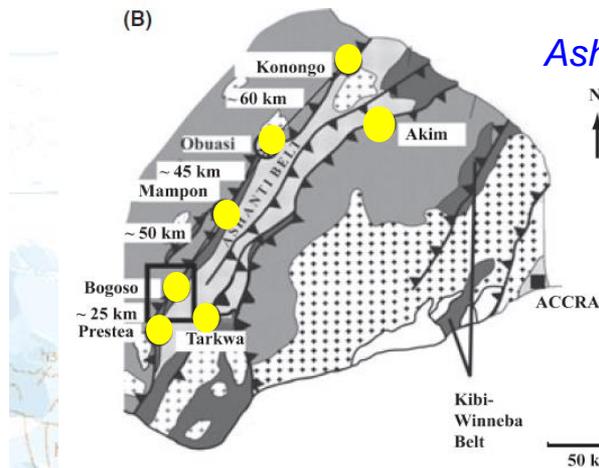
La prise en compte de cette **perméabilité dynamique** permet d'expliquer plusieurs autres caractéristiques de ces gisements liés à des intrusions (thèse G. Launay, décembre 2018)



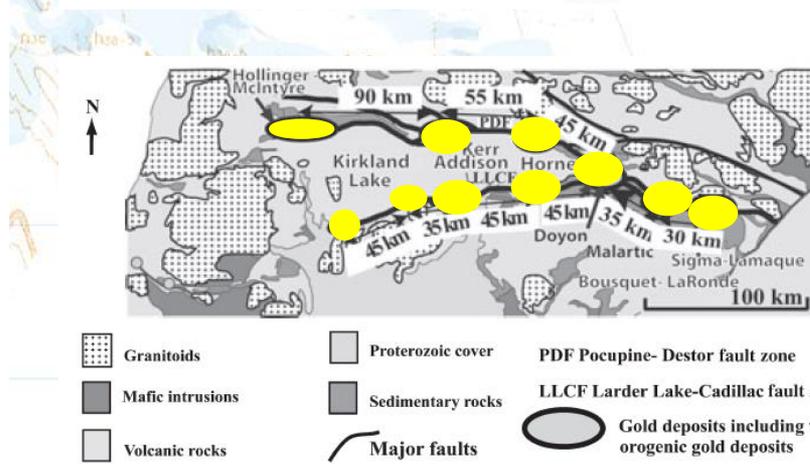
Zones faillées d'échelle crustale (« gisement d'or orogénique »)



Boulder-Lefroy, Australia 15-25 km



Ashanti, Ghana 45-60 km

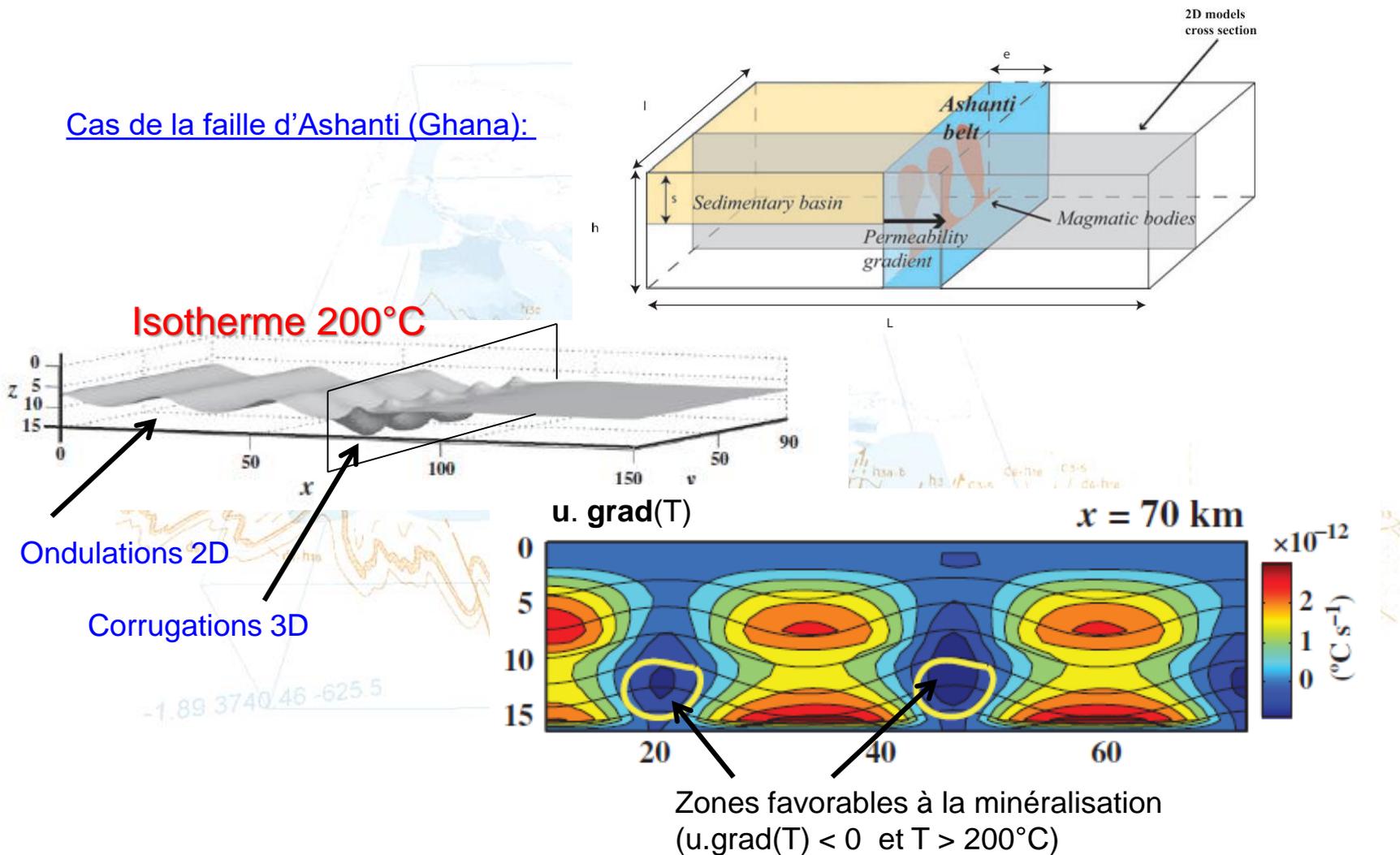


Cadillac, Canada 35-45 km



Question: l'espacement régulier des gisements peut-il être expliqué par la convection hydrothermale au sein des zones faillées ??

Cas de la faille d'Ashanti (Ghana):





4. Ressources géothermales

- Exemples précédents sur les profils thermiques (Bouillante, Soultz, Steamboat springs)
- 3 types de géothermie... mais plusieurs contextes géologiques
- Cas des caldeiras ignimbricitiques

3 différents types de géothermie
 (basse/moyenne/haute énergie)

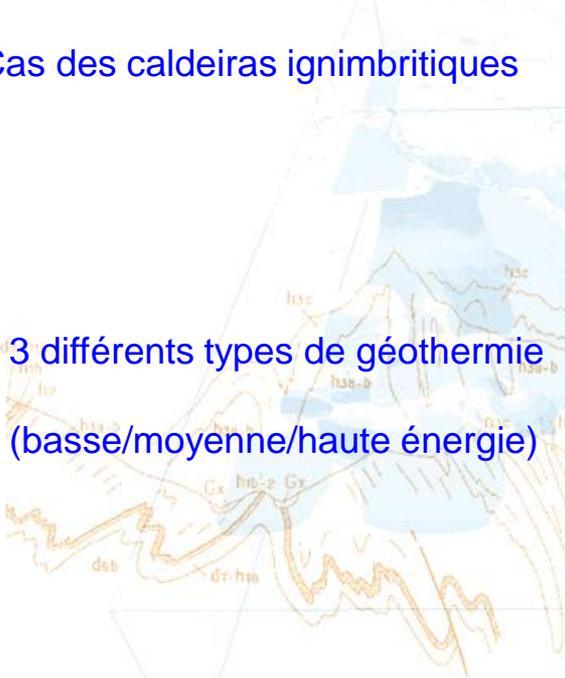
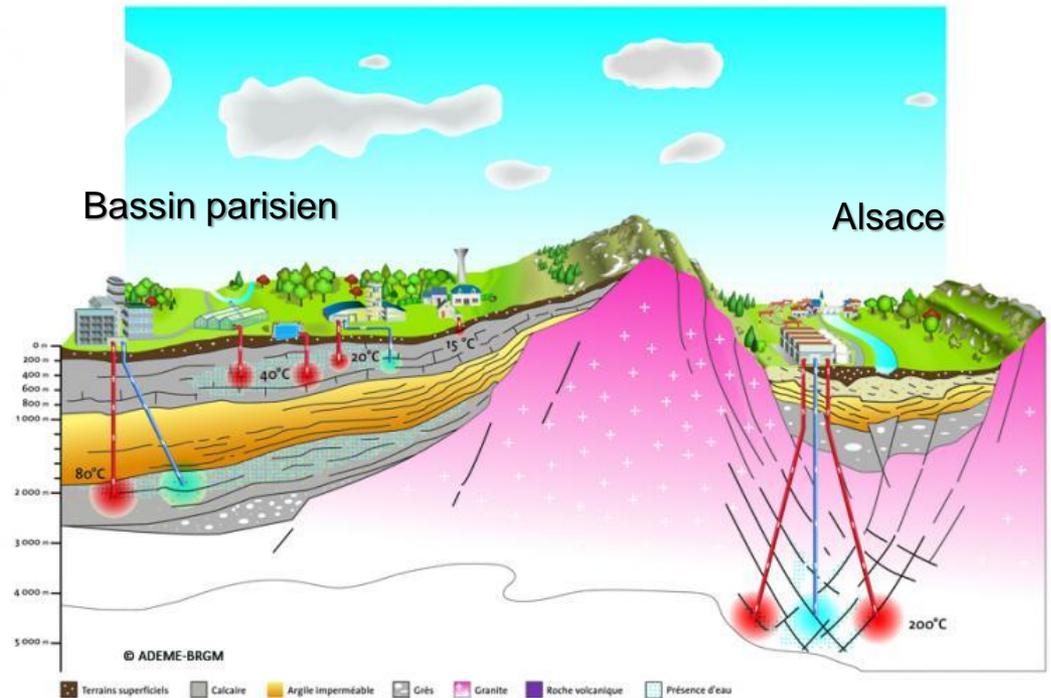


Diagramme typiquement « métropolitain »



Pas de convection hydrothermale
 (advection)

Hautes températures
 Convection



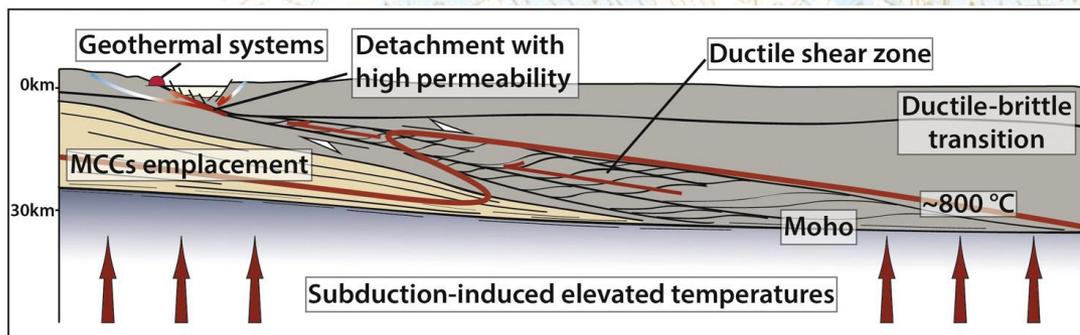
Autres contextes géologiques pour la haute énergie:

- régions volcaniques (ex: Bouillante)

- failles crustales

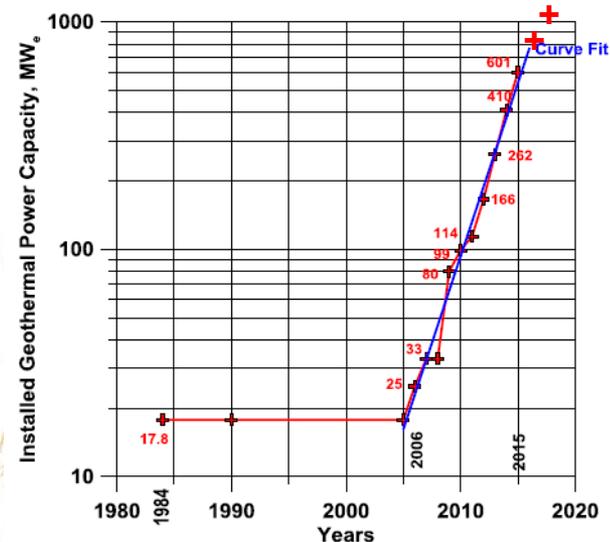
Exemple des caldeiras (à suivre)

Concept en développement (ex: les détachements en Turquie)



Le boom de la géothermie en Turquie

Turquie



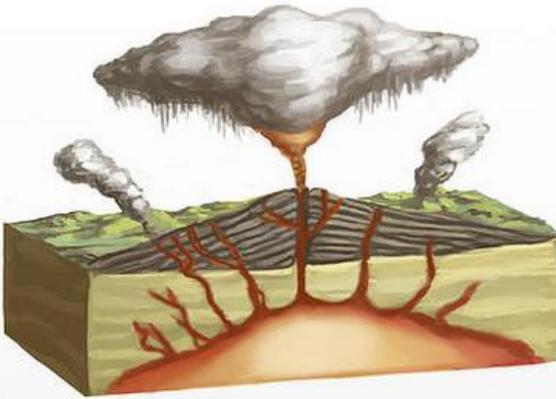
Tureyen et al., 2016

Mai 2017: 858 MW...

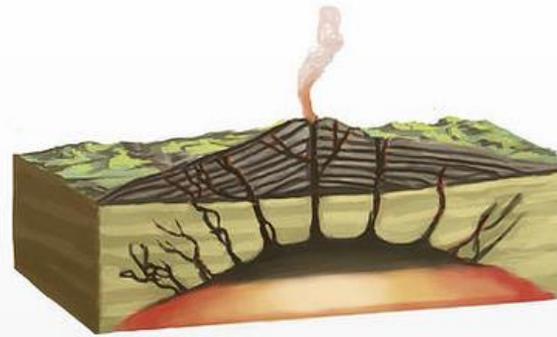
Janvier 2018: 1100 MW

Les fluides crustaux profonds (chauds) remontent naturellement (par flottabilité, donc par convection) le long des drains perméables

Caldeiras



Eruption of volcano



Empty space formed in magma-chamber



Effondrement

Volcanic cone collapses



Formation of crater-lake

© Spencer Sutton



Crater lake, oregon

Vidange
partielle

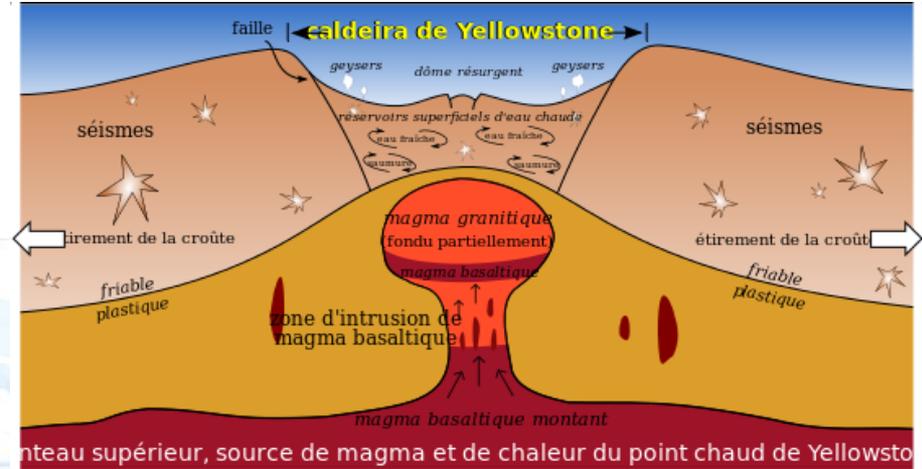
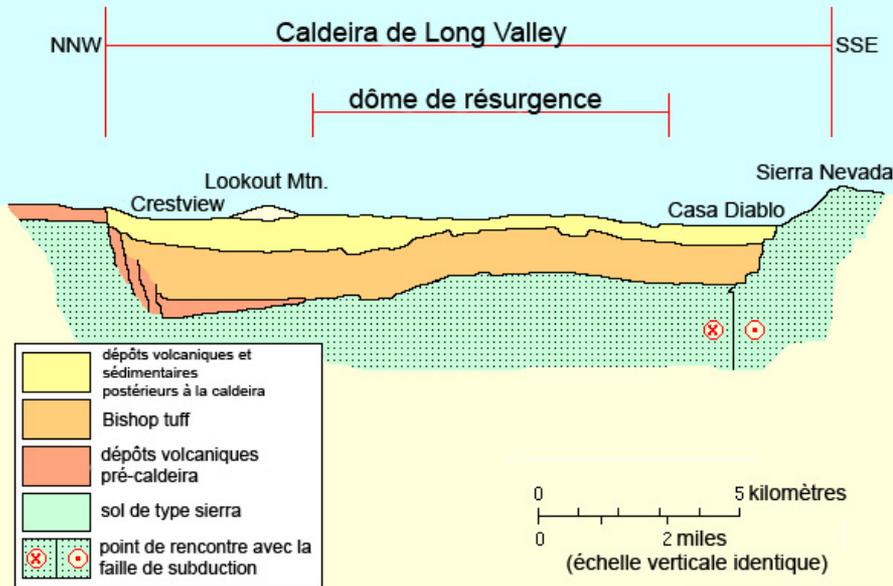
Lac, ou remplissage
par ignimbrites (ponces)



Santorin



Caldeira de Long Valley - coupe verticale



Source de chaleur en profondeur

Ata Caldera – Yamagawa Geothermal power plant
 Japan, (30 MW)



Le « Bishop Tuff » fait plusieurs km d'épaisseur

Ignimbrites (ponces) = Isolant thermique !

Source magmatique en profondeur

+ isolant en surface

→ Fortes anomalies de températures



Weiraki, région de Taupo (Nouvelle Zélande): caldeira.
181 MW



Long Valley caldeira, Californie. 40 MW



Bishop Tuff



Nombre de Rayleigh dans une caldeira ignimbritique ?

Les ignimbrites (ponces) sont des roches très poreuses, on utilise donc Ra_{poreux} :

Soient :

- $g = 10 \text{ m/s}^2$
- $\alpha = 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
- $\Delta T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
- $k = 10^{-13} \text{ m}^2$
- $h = 2 \text{ km}$
- $\kappa = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Ra_{poreux} = \frac{g \alpha \Delta T k h}{\kappa \nu}$$

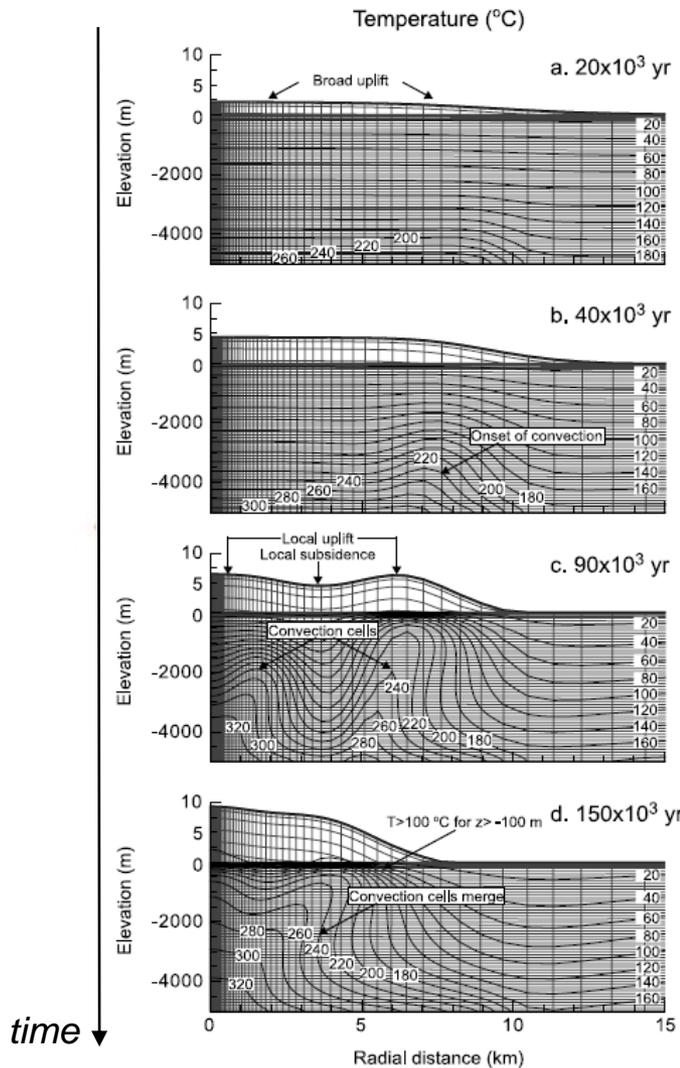
$$Ra = (10 \times 10^{-4} \times 400 \times 10^{-13} \times 2 \times 10^3) / (10^{-7} \times 10^{-6}) = 800$$

La valeur est bien **sur-critique** ($> 4 \pi^2$): la convection thermique s'y développe facilement...

(pour 2 km d'ignimbrites soumis à une différence de T° de 400°C , avec une perméabilité moyenne de 10^{-13} m^2)



Modèle de circulation hydrothermale dans une caldeira (2009) (avec réponse topographique)

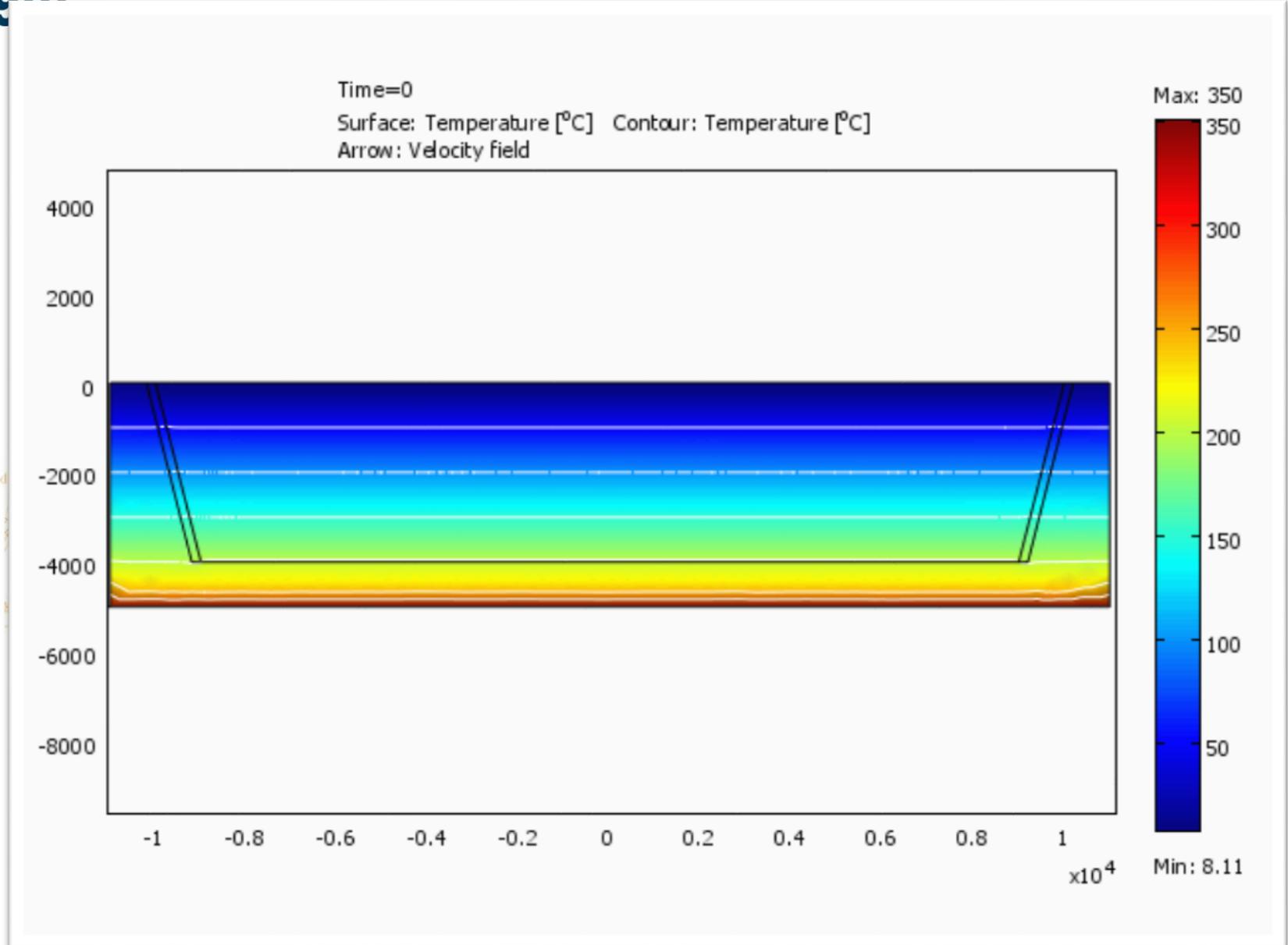


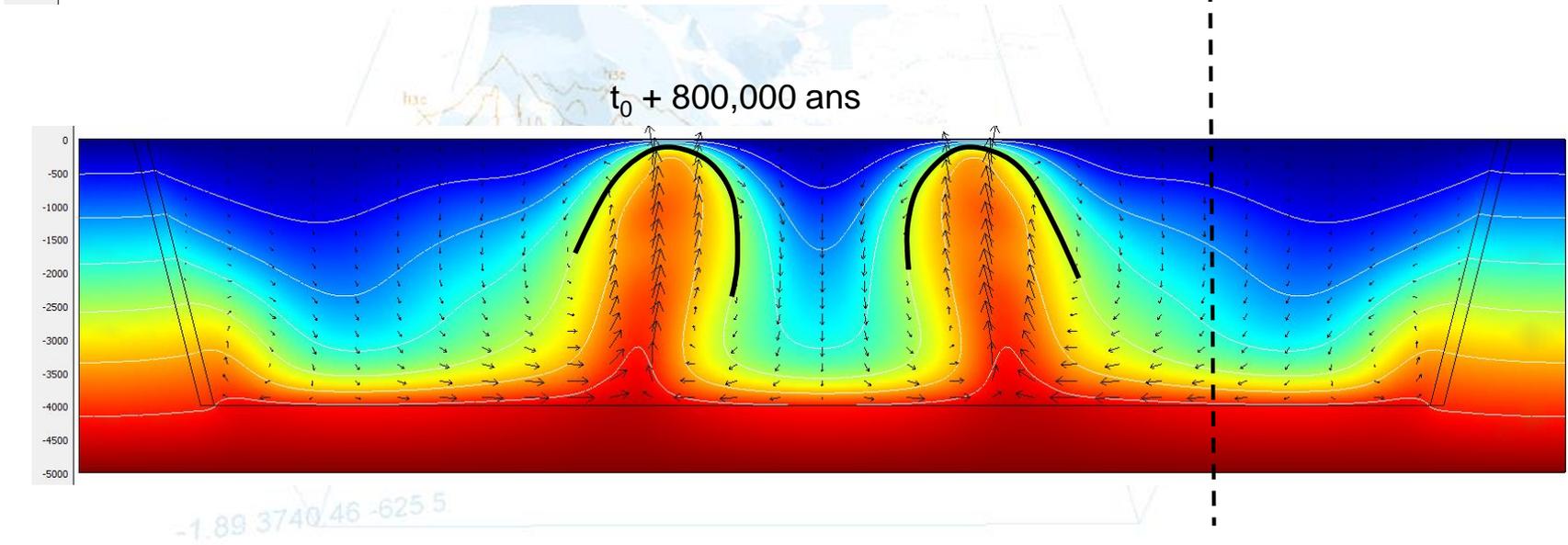
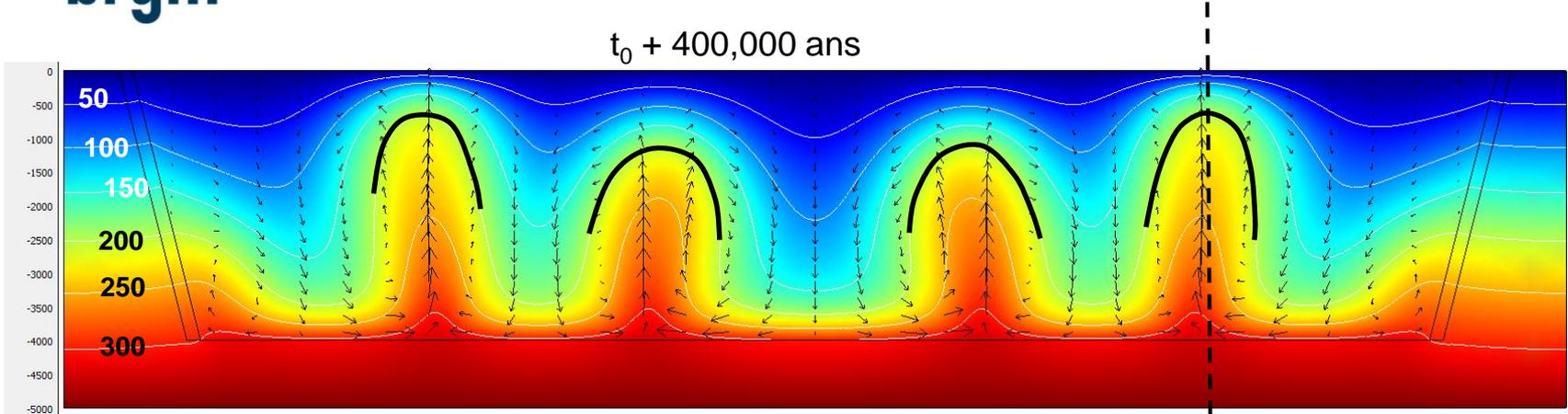
démarrage de la convection à $t_0 + 40,000$ ans

cellules de convection individualisées

cellules de convection qui se rejoignent

On obtient des températures d'~ 250 °C entre 1 et 3 km..., voire même davantage au centre de la caldeira.





Le nombre et la localisation des anomalies thermiques va évoluer au cours du temps !!!



Long Valley Caldera (éruption il y a 700,000 ans)

Long Valley Caldera in eastern California has been explored for geothermal resources since the 1960s. Early shallow exploration wells (<300m) were located around Casa Diablo near the most prominent hot springs and fumaroles on the southwest flank of the Resurgent Dome (Figure 1). Later deep ($\pm 2000\text{m}$) wells explored the southeastern caldera moat and evaluated federal lease offerings in and around the caldera's Resurgent Dome. Data from these wells revealed that **the principal geothermal reservoir in Long Valley is not located directly beneath the Casa Diablo Hot Springs and is not currently related to the Resurgent Dome. Instead, the hydrothermal system appeared to be more complex** with shallow production at Casa Diablo supplied by outflow from a more extensive upwelling geothermal source deep beneath the western caldera moat.

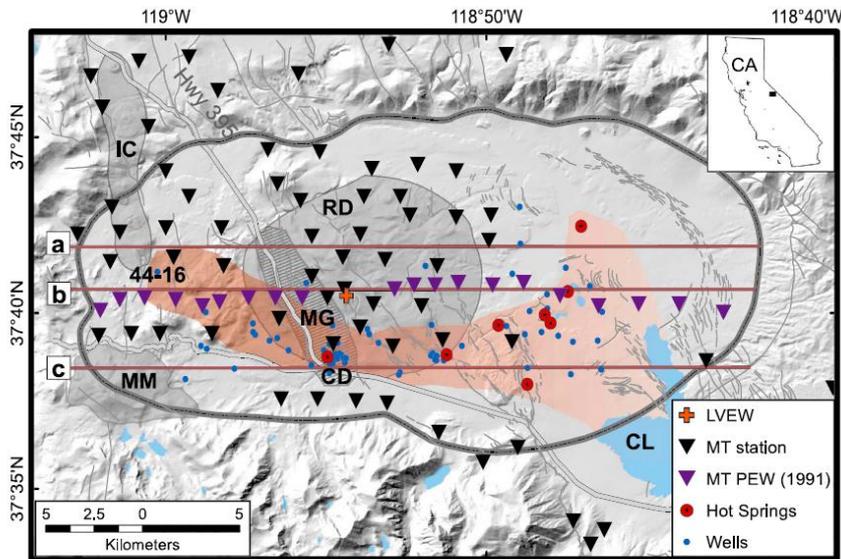


Figure 1. Location map of Long Valley Caldera, California. The dark ring is the topographic edge of the caldera, the orange polygon represents the shallow hydrothermal flow path [Sorey *et al.*, 1991] shaded by temperature, where hot water upflows near well 44-16 at $\sim 220^\circ\text{C}$ (dark orange) and flows east to Casa Diablo (CD) ($\sim 170^\circ\text{C}$) and farther east toward Crowley Lake (CL) ($\sim 50^\circ\text{C}$). MT stations from Wannamaker *et al.* [1991] are indicated by purple triangles, and black triangles represent MT stations collected by the U.S. Geological Survey in 2014 and 2015. Geologic features are RD, resurgent dome; MG, medial graben; MM, Mammoth Mountain; IC, Inyo Craters.

Peacock et al., 2016

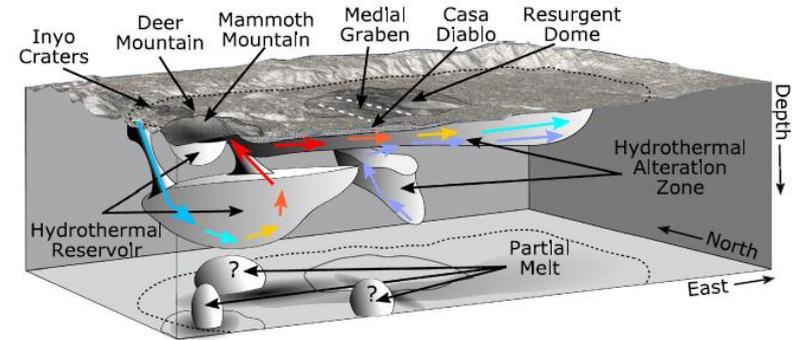


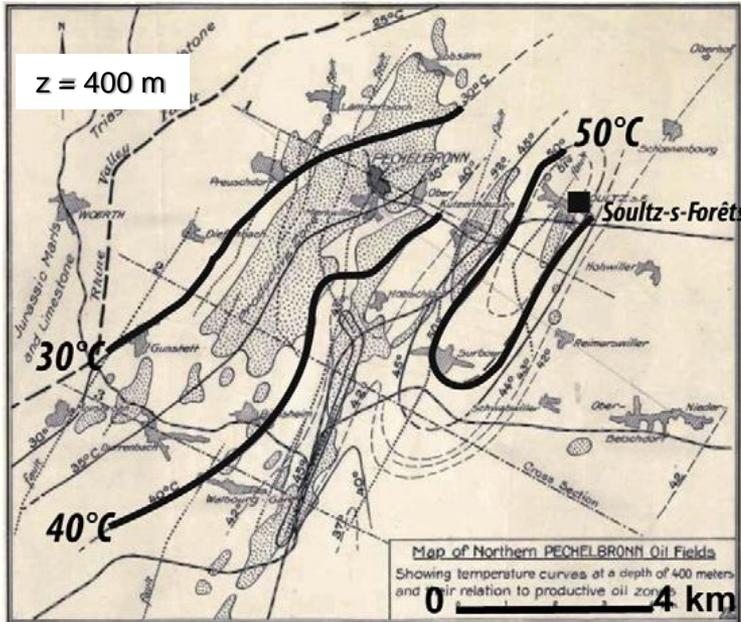
Figure 4. Schematic of the main features imaged in the 3-D resistivity model and hydrothermal flow path. Arrow colors symbolically represent temperature, where blues are cool and reds are warm. Purple arrows represent the paleohydrothermal flow.

Système hydrothermal complexe....
Régime transitoire...

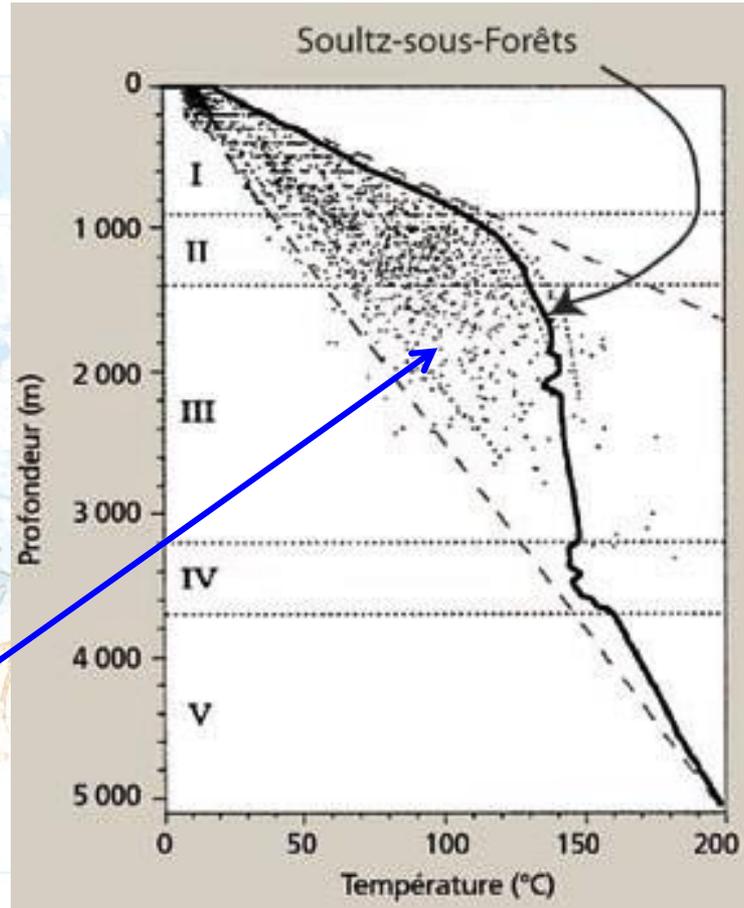
- **Comment prédire la localisation et l'amplitude des anomalies ?**
- **Besoin de données pour modéliser le fonctionnement du système hydrothermal**



Cas du graben du Rhin – Anomalies de Sultz-sous-Forêts et de Rittershoffen (Oligocène – 35-23 Ma)



Haas & Hoffmann, 1929

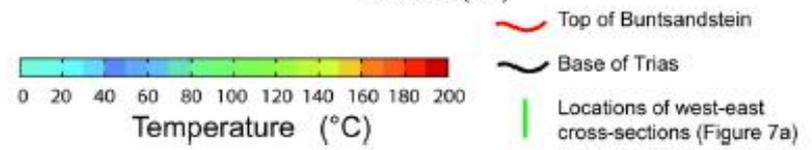
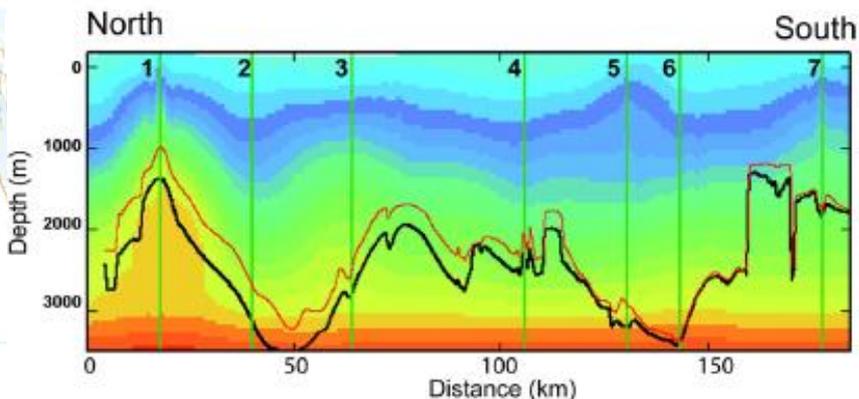
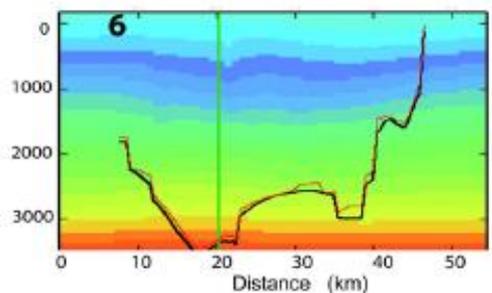
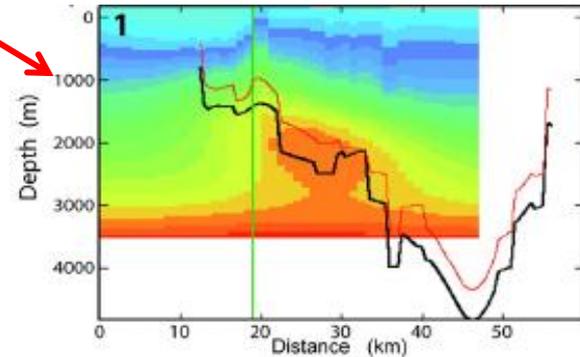
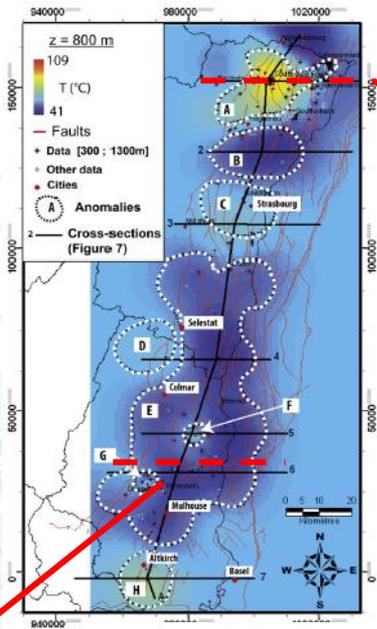
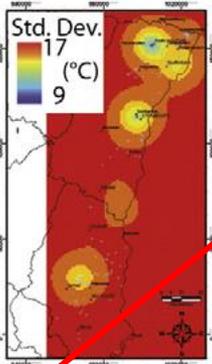
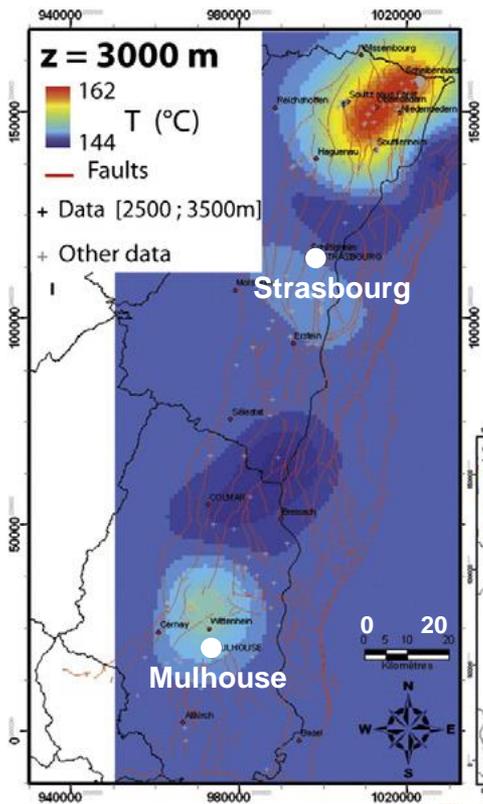


+ de 500 données de températures
Issues de forages pétroliers.

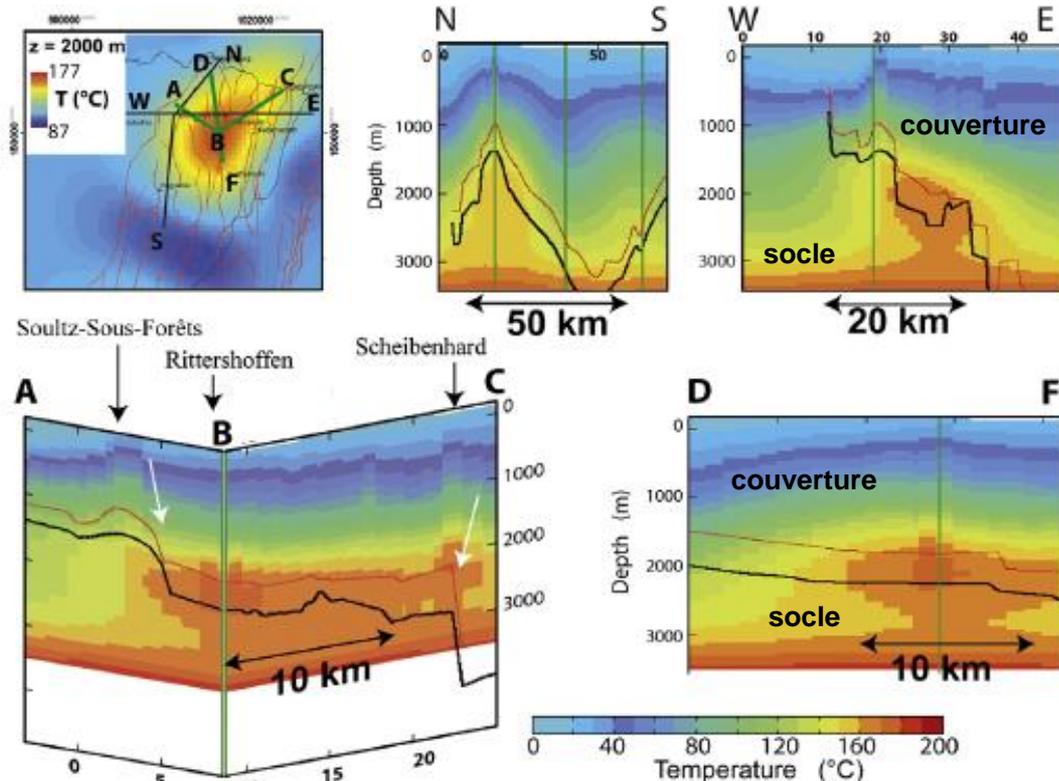
→ corrections..... → analyses géostatistiques..... → interpolation.... → nouvelles cartes et coupes



Z=800m



Zoom sur Soultz



1) La « bulle chaude » semble être hébergée par la formation gréseuse du Bundsandstein

2) La « bulle chaude » semble remonter le long de la pente de l'interface socle-couverture

— Top of Buntsandstein
— Base of Trias

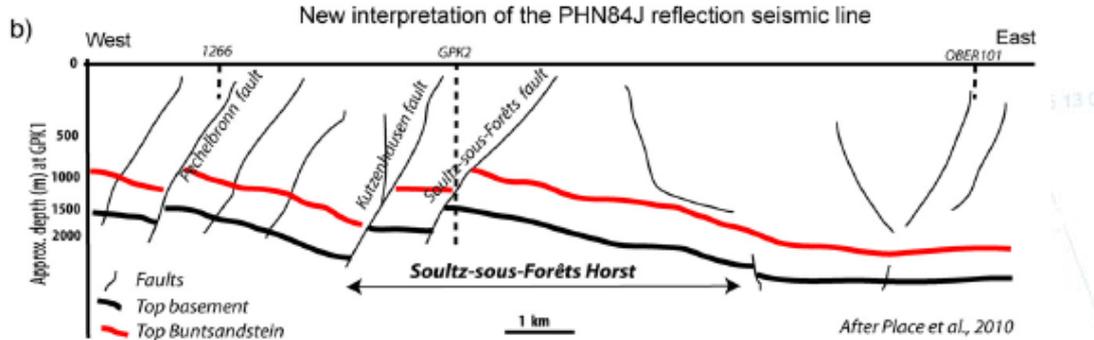
→ Quelle est cette structure convective ??

→ Modélisation 2D de la convection hydrothermale au niveau de Soultz

→ Utilisation des données géologiques, pétrophysiques, géophysiques...



Données sismiques



+ Données pétrophysiques: perméabilités, production de chaleur, conductivité thermiques...

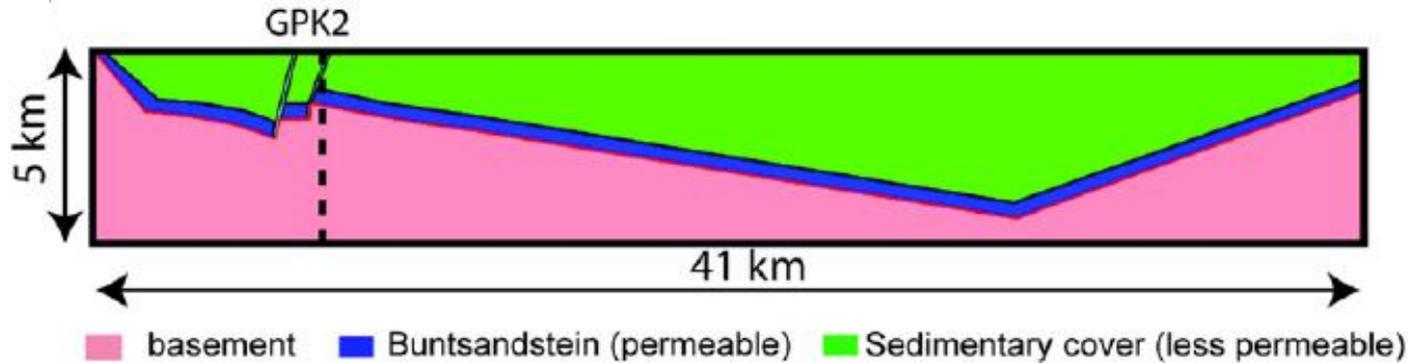
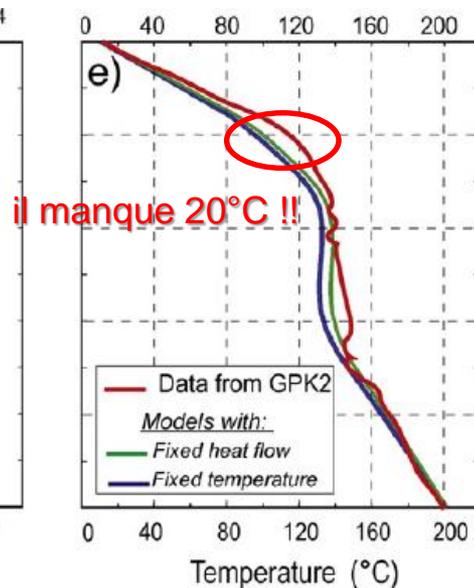
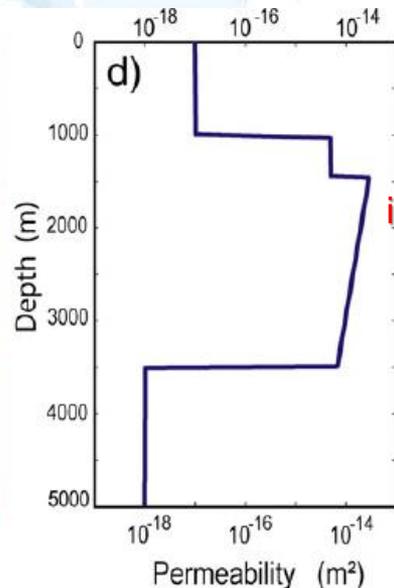
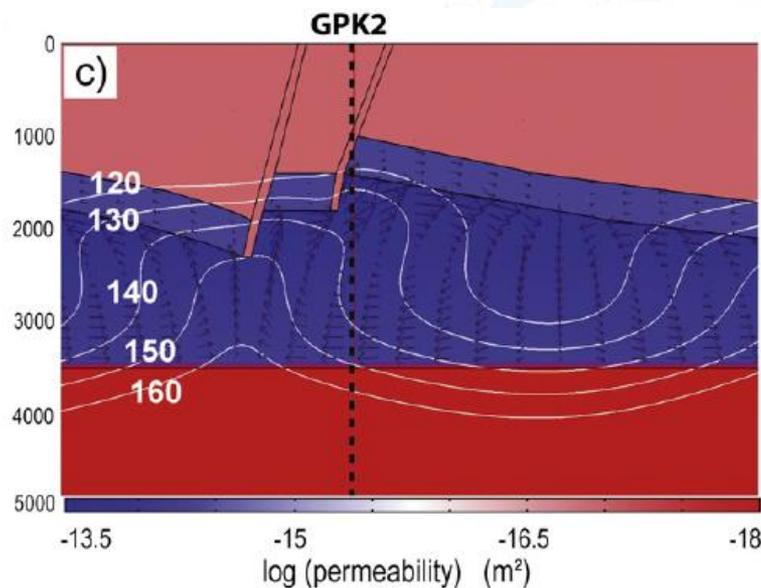
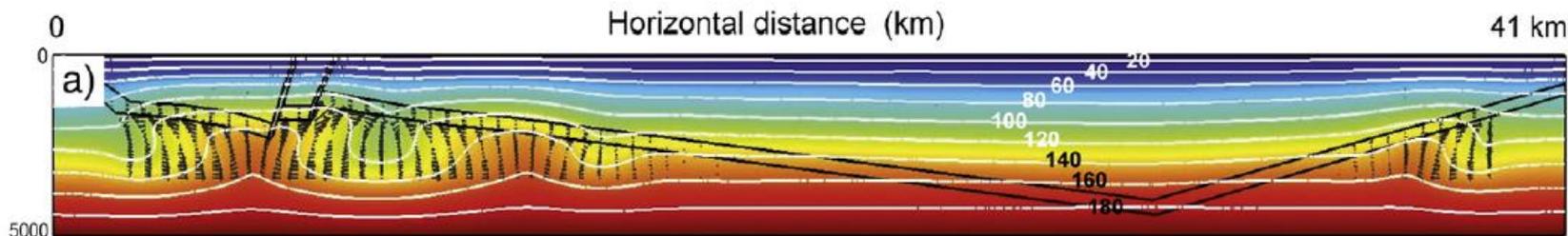


Table 2

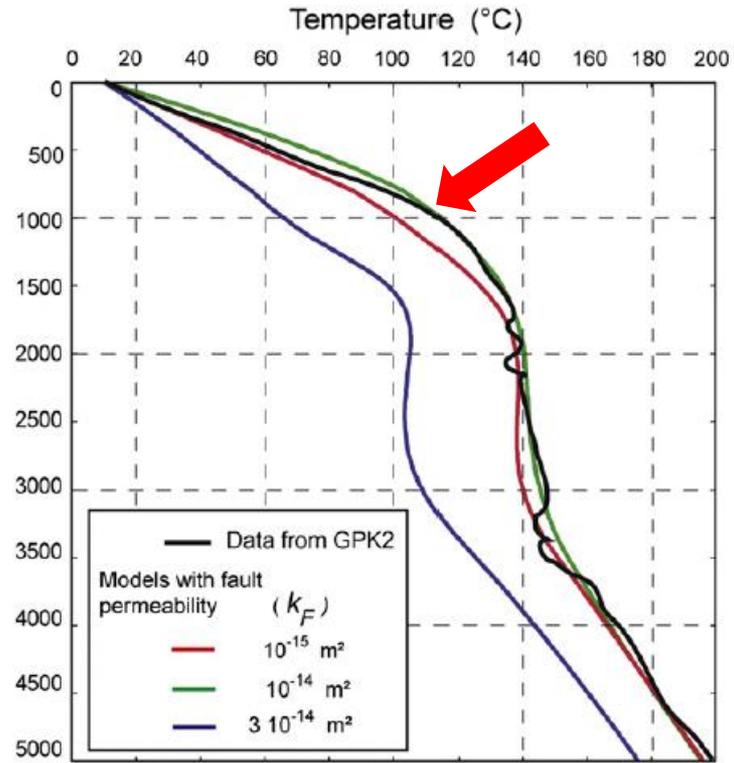
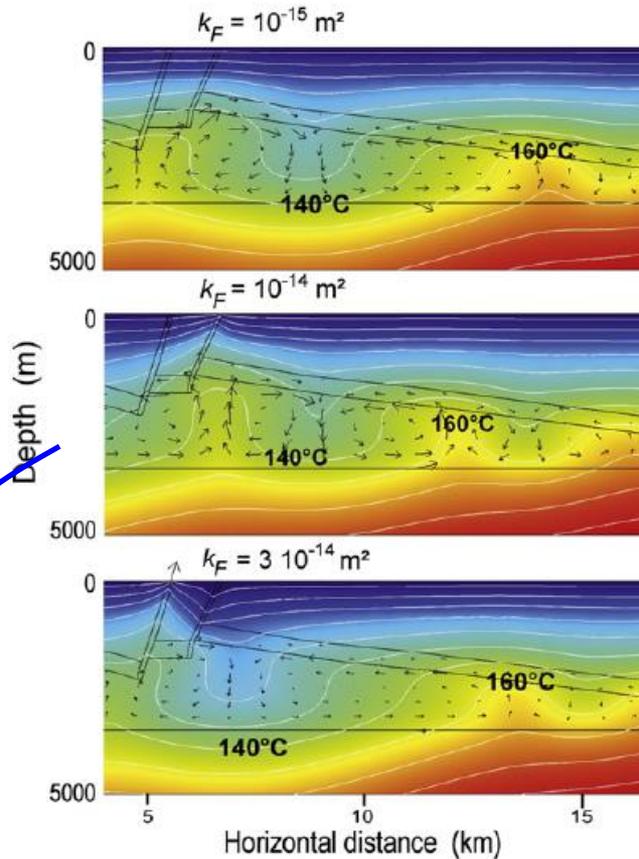
Physical properties attributed to the basin-scale models, and corresponding to laboratory measurements on core samples of geothermal boreholes at Soutz-sous-Forêts. Units: (1) Pechelbronn oil layers and Jurassic limestones; (2) Keuper and Muschelkalk formations; (3) Buntsandstein sandstones; (4) permeable part of the granitic basement; and (5) less permeable granitic basement.

Unit depth (Soutz) (m)	Porosity (%)	Thermal conductivity (W/m/K)	Permeability (m ²)	Heat production (μW/m ³)
(1) 0–800	15	1.4	10 ⁻¹⁷	1.0
(2) 800–1000	15	2.1	10 ⁻¹⁶	1.0
(3) 1000–1400	15	2.5	5 · 10 ⁻¹⁵ –10 ⁻¹⁴	1.0
(4) 1400–3700	9	3.0	$k_{G0} \exp(-z/\delta)$	6.0 (top) to 2.7 (bottom)
(5) 3700–5000	1	3.0	10 ⁻¹⁸	2.7
Faults	15	2.5	10 ⁻¹⁷ –3 · 10 ⁻¹⁴	1.0



-1.89 3740.46 -625.5

En imposant les 2 failles de Soutz comme perméables, on retrouve le profil mesuré....



Ce 2^{ème} test, avec une perméabilité de faille à 10^{-14} m^2 , permet de reproduire au mieux le profil mesuré à Soultz.

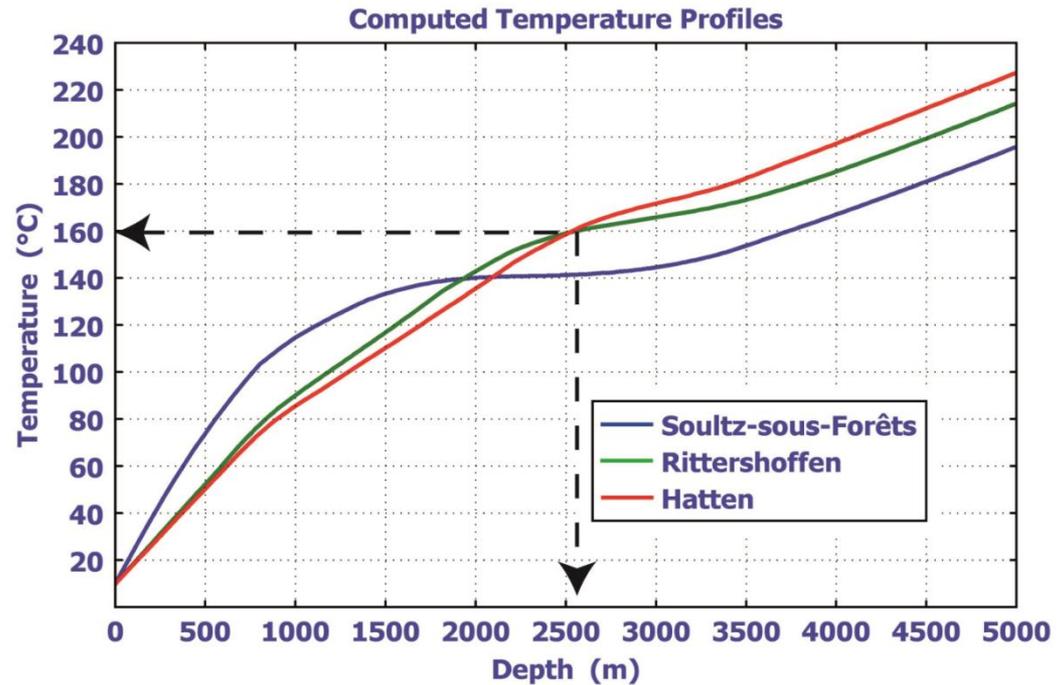
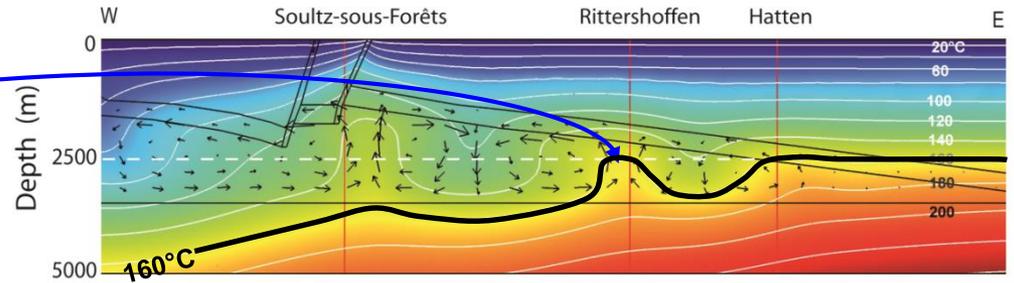
... mais ce n'est pas tout...

Ce « meilleur » modèle permet de prédire une anomalie **plus chaude à moins grande profondeur** !!!!

et à 7 km à l'est de Soultz (= Rittershoffen).

Le modèle prédit 160°C à 2500m...

.... valeur mesurée en 2013 dans un nouveau forage à Rittershoffen !!!!!



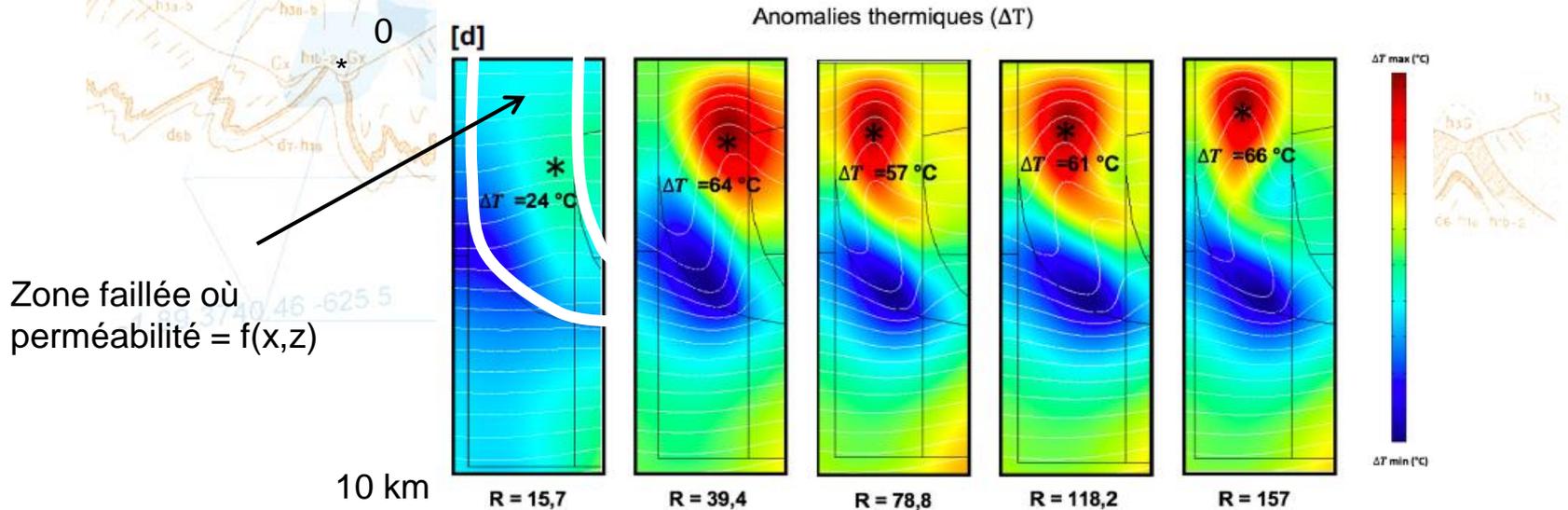
La modélisation numérique de la convection hydrothermale correspond donc à un outil d'exploration géothermique !!



La compréhension des structures convectives (leur intensité, leur localisation, leur évolution dans le temps) permet de prédire l'existence d'autres anomalies jusqu'ici non soupçonnées.

Sujets de recherches actuelles:

- Les failles d'échelle crustale sont-elles suffisamment perméables pour héberger des circulations hydrothermales ? (indices de paléocirculations, minéralisations..)
- Si oui, quelles sont les règles qui contrôlent la position et l'amplitude des anomalies thermiques ?



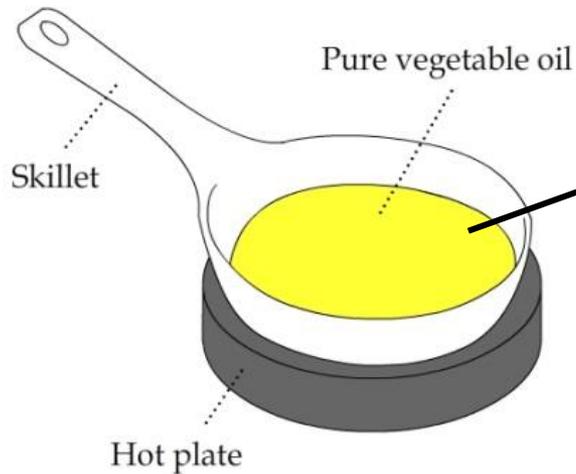
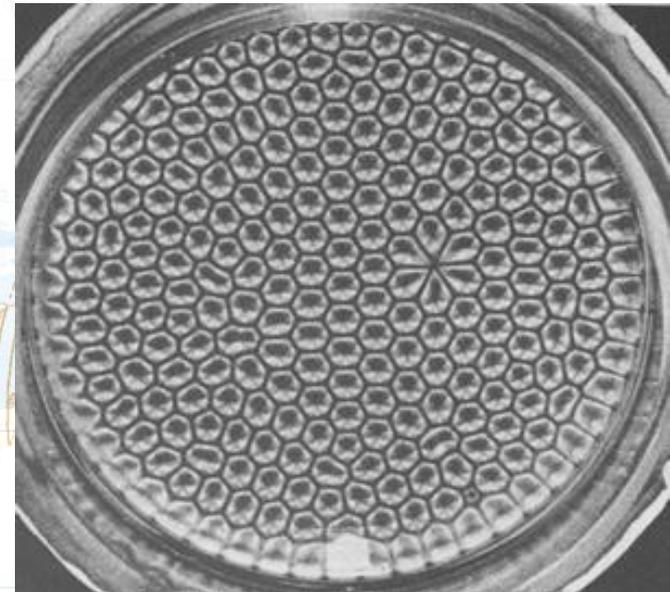


Pour motiver les élèves / étudiants

Montrer l'exemple de la convection thermique dans une poêle remplie d'huile, chauffée (doucement) par-dessous...



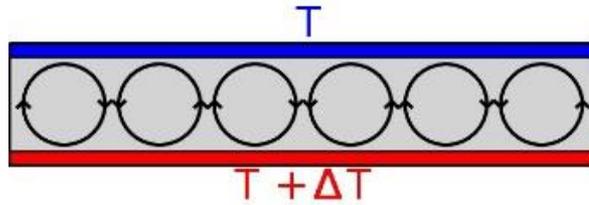
(ou en cuisine...)



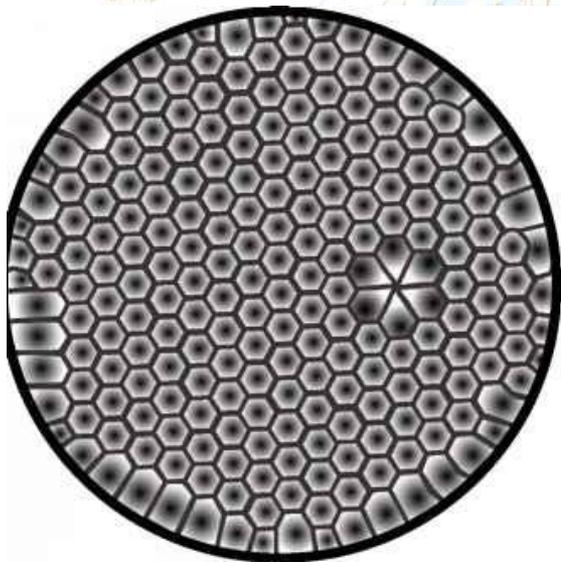
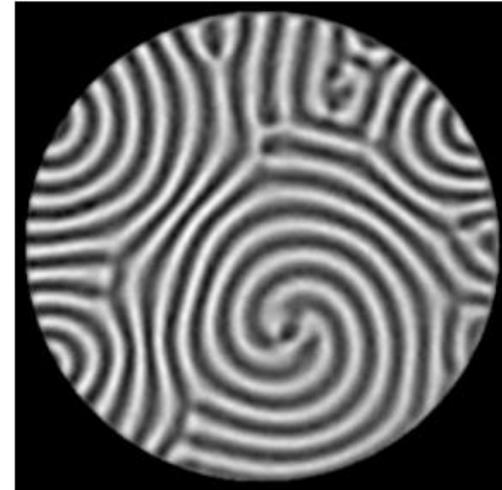


View From Above

View From Side



Noir: courant ascendant
 Blanc: courant descendant





Merci pour votre attention