

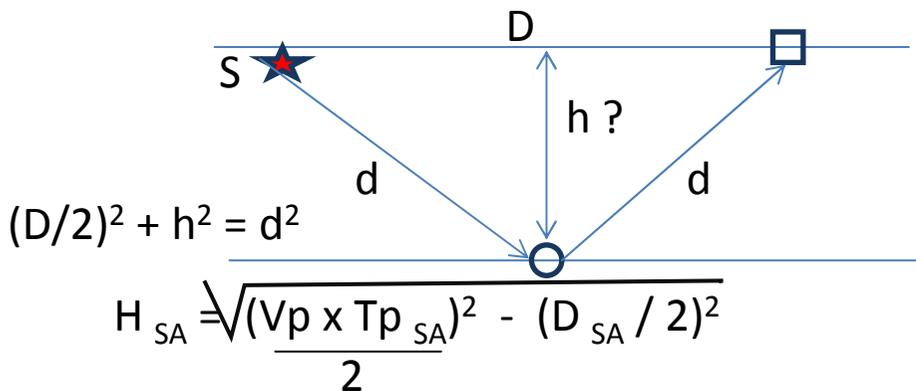
Correction de la géothermie

Les ondes issues d'un séisme survenu en Alsace sont enregistrées dans différentes stations (Doc. 1). On dispose ainsi du temps de parcours des ondes P réfléchies sur le Moho jusqu'à chacune de ces stations (Doc. 2).

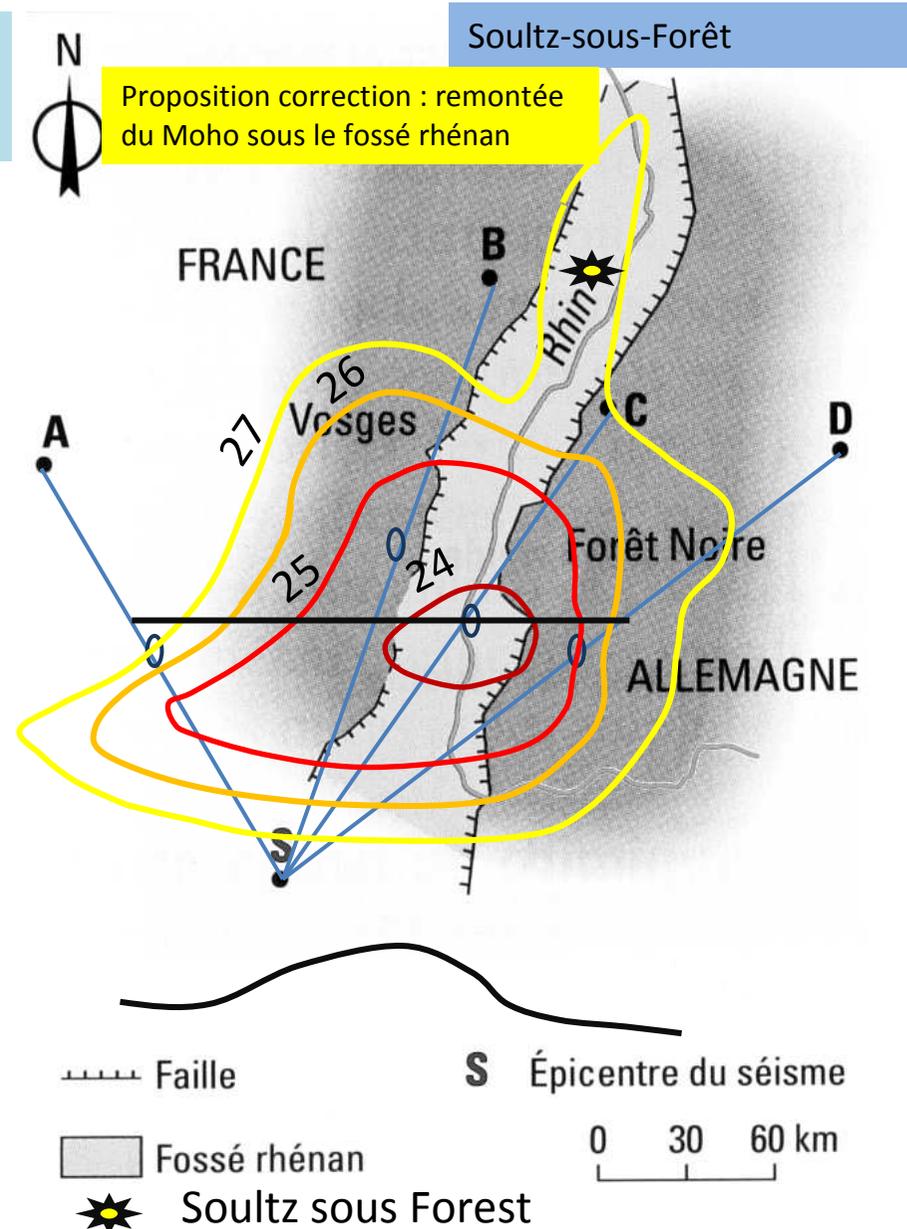
- On considère le foyer du séisme comme superficiel et la vitesse V_p des ondes P constante et égale à $6,25 \text{ km.s}^{-1}$.
- Expliquez en quelques mots pourquoi le Moho provoque l'apparition d'ondes P réfléchies.
 - Indiquez sur la carte pour chaque station le point de réflexion des ondes P sur le Moho.
 - Calculez la profondeur du Moho pour chacun de ces points. Expliquez votre raisonnement par un schéma.
 - Reportez les valeurs obtenues sur la carte. Identifier la profondeur du Moho au niveau du fossé rhénan ?

Doc 2

Station	Distance D à l'épicentre (km)	Temps de trajet T des ondes P réfléchies (s)
A	177,2	29,6
B	234,5	38,3
C	208,7	34,2
D	374,9	60,7



Stations	H_{SA}	H_{SB}	H_{SC}	H_{SD}
Profondeur du Moho en km	26,576	24,03	23,09	29,04



Doc. 1. Localisation de l'épicentre du séisme et des stations d'enregistrement.

Critique ?

- On assimile le foyer à l'épicentre et on induit une erreur.

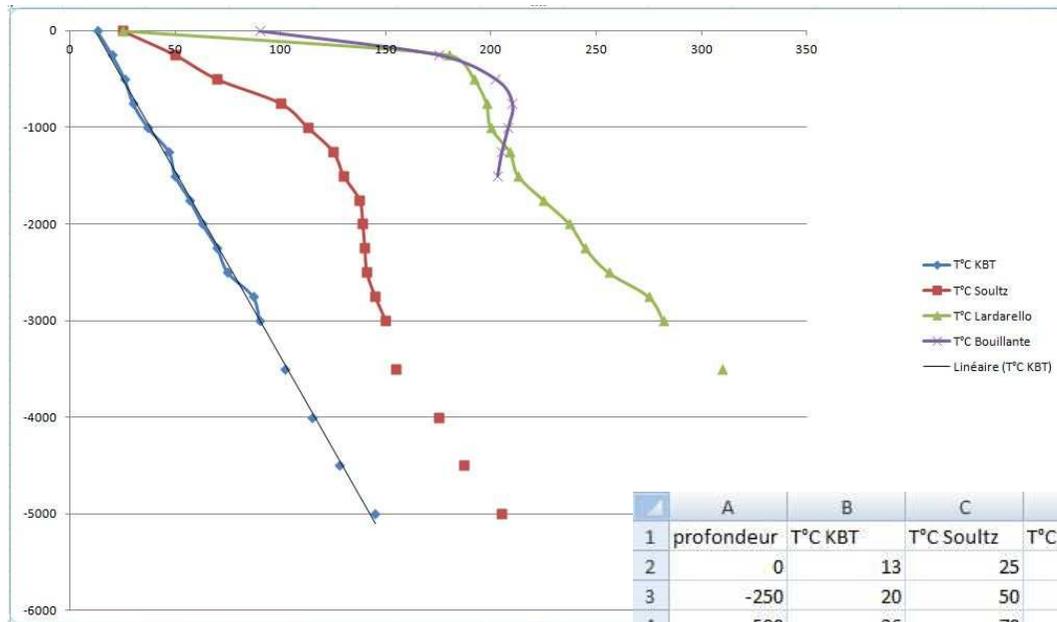
Mais bref

On veut montrer...

Un Moho peu profond et une remontée du manteau

Possibilité d'exploitation des données

Proposition correction : traitement des données des sondages 1/2

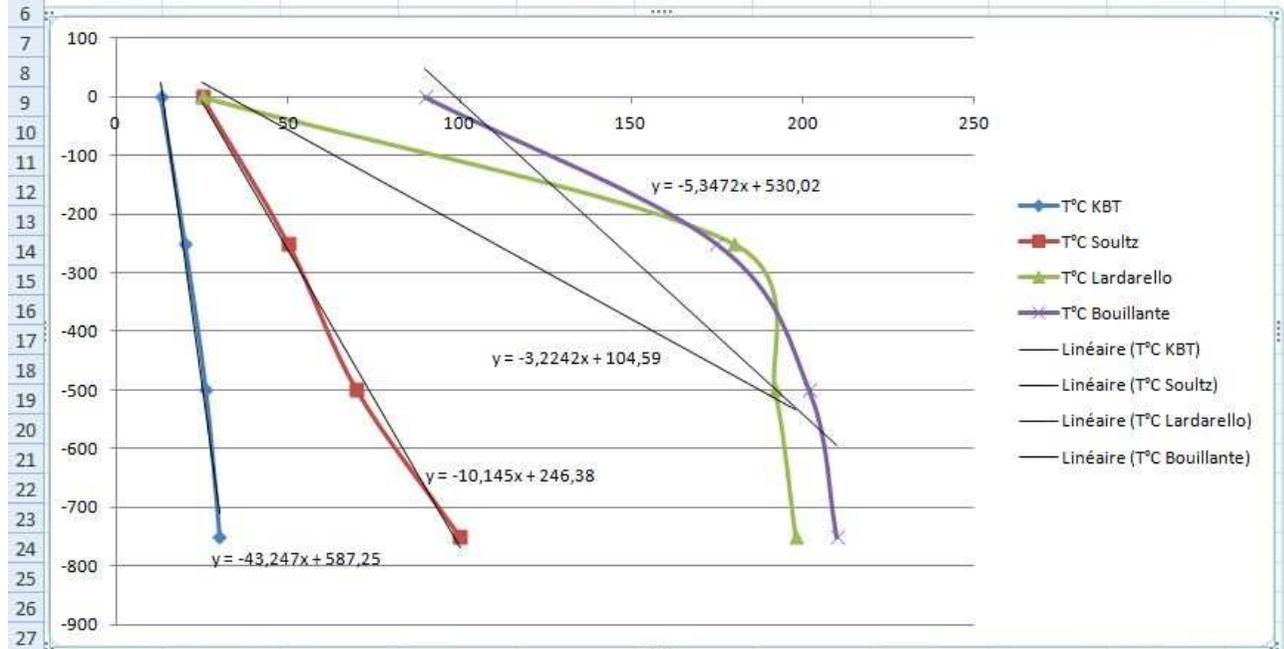


En Y les profondeurs
En X les températures

Sélection du premier km.
Outil : clic droit sur courbe ; ajouter une courbe de tendance ; afficher l'équation

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	profondeur	T°C KBT	T°C Soultz	T°C Lardarello	T°C Bouillante					
2	0	13	25	25	90					
3	-250	20	50	180	175					
4	-500	26	70	192	202					
5	-750	30	100	198	210					

Ici, le choix des X et Y n'est pas pertinent pour calculer le gradient géothermique
Il faut inverser X et Y et ne pas avoir de profondeurs négatives.



Critiques ?

- Quelle représentation de graphique choisir ...
que placer en X et en Y ?
 - comment calculer le gradient géothermique ?
 - avec Excel en plaçant la température en Y et la profondeur en X grâce à l'équation de la courbe de régression.
 - en réfléchissant quand la profondeur est en Y et la température en X..
 - Réfléchir quand on fait apparaître des droites de régression alors que les points ne sont pas alignés

Le gradient géothermique moyen existant dans la croûte continentale est de 30°/km.

Lieu	Profondeur (km)	Température (°C)	Sources
Soultz (Alsace, France)	5,01	203	http://www.soultz.net/fr/documents/Resume_geothermie_Soultz.pdf
Le Mayet de Montagne (Massif-Central, France)	0,8	33	http://www.geothermal.ethz.ch/content/Geothermal%20publications/EvansEtAl_2005_EGS-Apercu.pdf
Fresnes (Ile de France, France)	1,537	71,7	Données de forage issues d'InfoTerre
Fresnes (Ile de France, France)	1,8	73	http://www.geothermie-perspectives.fr/07-geothermie-france/02-basse-energie-02.html
Kyrdalshryggur, Islande	2	350	http://acces.inrp.fr/eedd/climat/dossiers/energie_demain/geothermie/gradient_geothermique_correction.xls/view
Ogachi, Japon	1	250	http://www.geothermal.ethz.ch/content/Geothermal%20publications/EvansEtAl_2005_EGS-Apercu.pdf
Hijiori, Japon	2,2	270	http://www.geothermal.ethz.ch/content/Geothermal%20publications/EvansEtAl_2005_EGS-Apercu.pdf
Bouillante, Guadeloupe	1	250	rapport BRGM : BRGM/RP-52452-FR
Lipsheim, Alsace, France	1,764	94,4	Rapport BRGM. BRGM/RP-55729-FR
Eschau, Alsace, France	1,619	117,3	Rapport BRGM. BRGM/RP-55729-FR

Document 1 : Mesure de la température en fonction de la profondeur en différents points du globe

Construction de la courbe représentant un géotherme moyen :

l'équation $y = ax$ Température = $a * \text{profondeur}$

D'après le gradient $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$, si $x = 1\text{km}$, on sait que la température $y = 30^{\circ}\text{C}$,
donc $a = 30$

Pour que le graphique puisse être tracé à l'aide d'un tableur grapheur, il faut tout d'abord créer un tableau de données avec les valeurs nécessaires à la réalisation du graphique.

Pour la colonne profondeur du tableau, il est nécessaire de rentrer les valeurs manuellement (valeurs comprises entre 0 et 7 km)

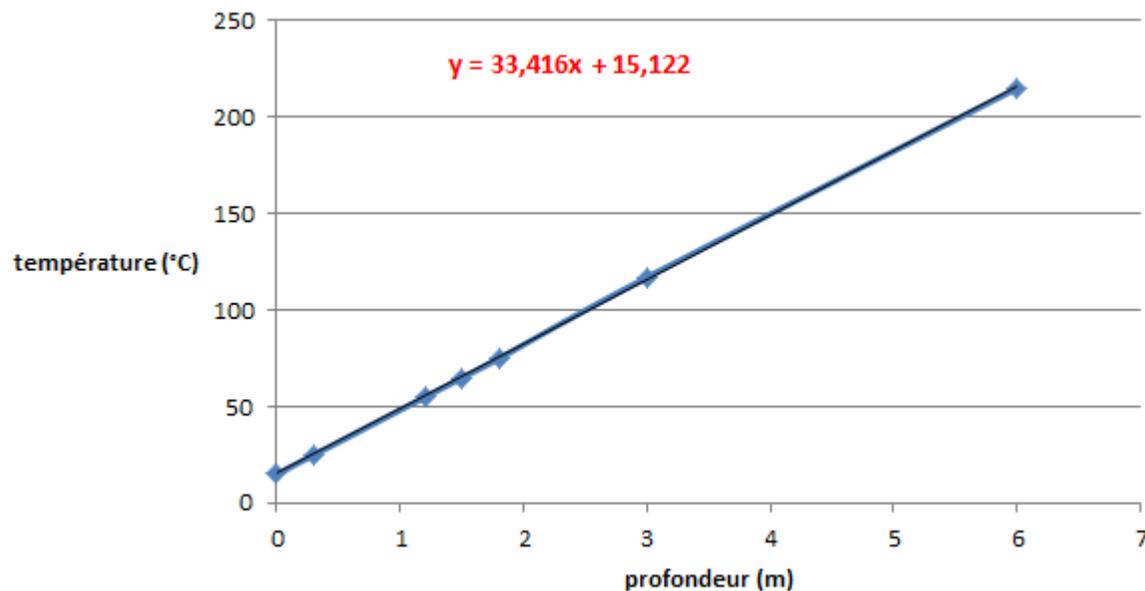
Profondeur (km)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
0	0
1	30
2	60
3	90
4	120
5	150
6	180
7	210

Pour la température du tableau, la valeur est liée à celle de la profondeur d'après la formule trouvée à la question précédente.
La température = $30 * \text{la profondeur}$.

	A	B	C	D
1	température(°C)	profondeur(m)	profondeur(km)	température(°C)
2	15	0	0	15
3	25	-300	0,3	25
4	55	-1200	1,2	55
5	65	-1500	1,5	65
6	75	-1800	1,8	75
7	117	-3000	3	117
8	215	-6000	6	215

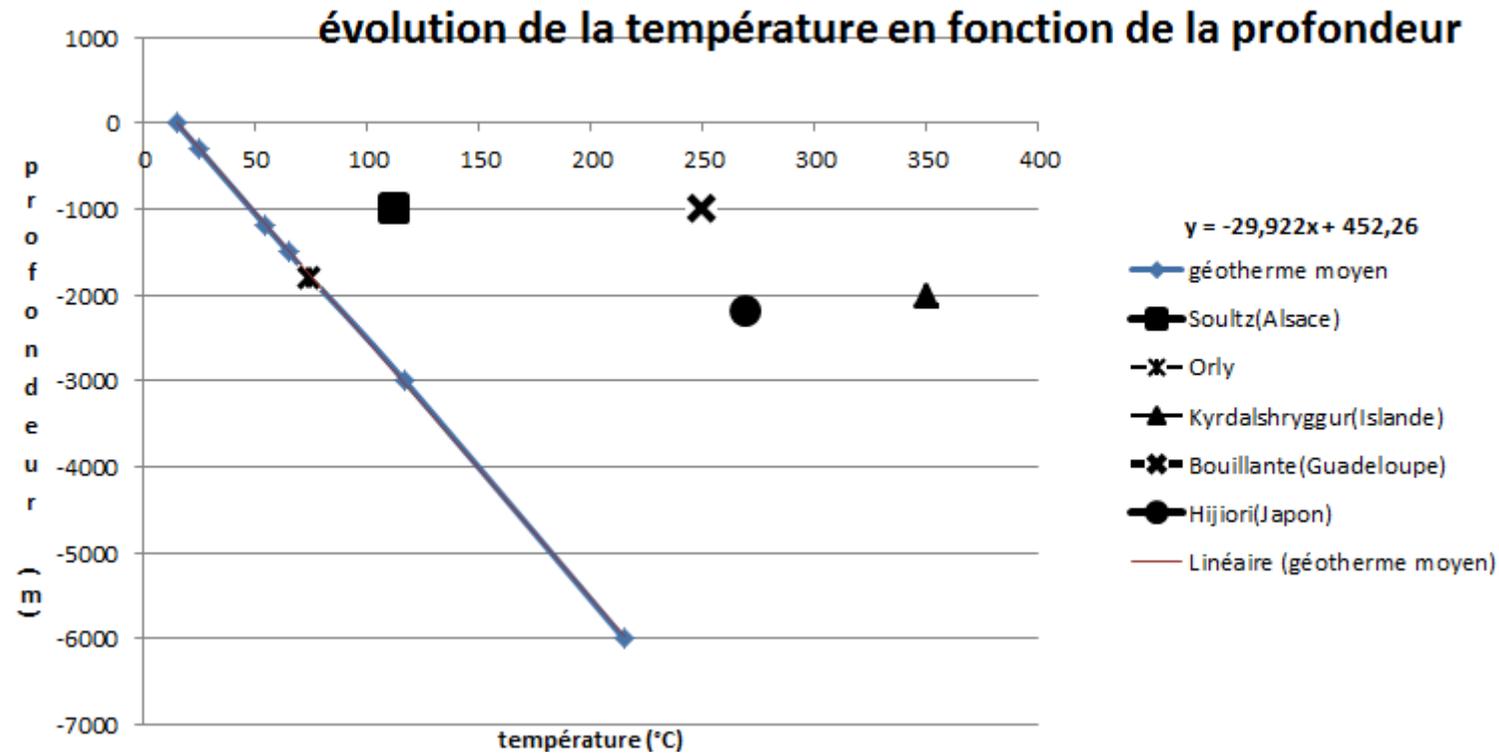
Calcul du gradient géothermique cad de l'augmentation de la température par km :

Il faut placer en "y" la variable cad la température et en "x" la profondeur exprimée en km.



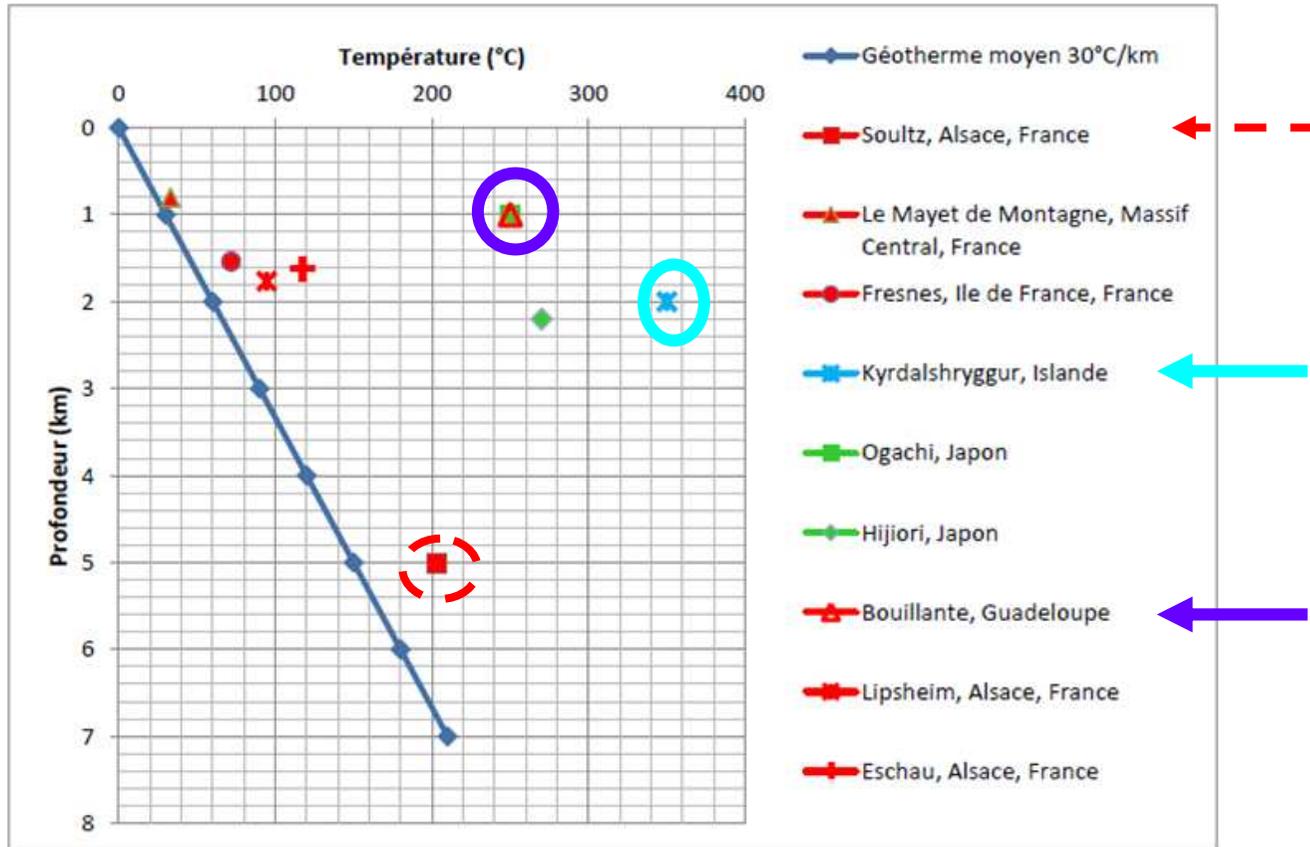
Le graphique de la variation de la température en fonction de la profondeur est une droite et l'équation de la droite de régression donne par son coefficient la valeur de cette augmentation : 33°C par km.

On inverse les coordonnées et on place en "y" vers le bas la profondeur.



rq : on peut retrouver la valeur du gradient géothermique : c'est l'inverse du coefficient de la droite de régression : $1/30 = 0,033$ °C par mètre soit 33,3 °C par km.

Placer sur le graphique des données de températures relevées à différentes profondeurs pour plusieurs sites localisés en différents points du monde



→ En Alsace (**Soultz**, Eschau, Lipsheim), le gradient paraît légèrement plus élevé que le gradient moyen, **50 à 60°C/km**.
 Dans le cas de l'**Islande**, de **Bouillante** (Guadeloupe) et du Japon, le gradient géothermique est beaucoup plus élevé (100 à 200°C/km)

**On constate :
des valeurs différentes de gradient thermique
et on peut en chercher l'origine**

Les données de la station de Soultz

- Présence de failles **liées à l'extension passée**
- Un Moho peu profond
- Un flux géothermique pas si important
- Contexte géologique global caractéristique d'un rift



Pour aller plus loin :
il ne faut pas oublier le facteur TEMPS

Temps et distances, caractéristiques du transfert de chaleur par conduction dans la croûte, sont donnés par les solutions généralisées de l'équation de Fourier:

$$x = \sqrt{\alpha \cdot t} \quad \longleftrightarrow \quad t = x^2 / \alpha$$

1 Ma. = $3,154 \cdot 10^{13}$ secondes et pour le granite $0,7 < \alpha < 1,3 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$

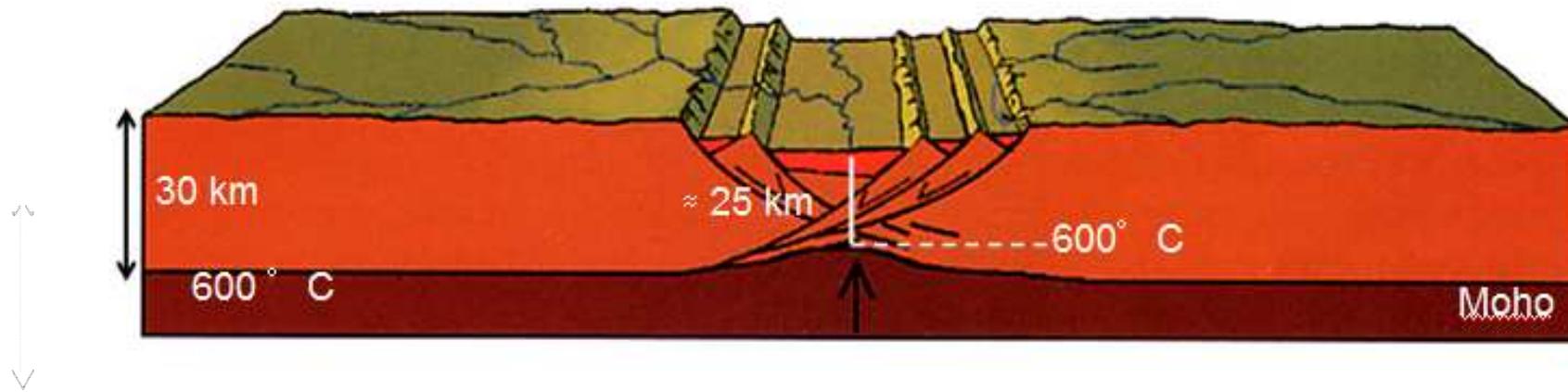
α = **Diffusivité thermique** qui s'exprime en $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ (variable selon la nature des roches)

X = distance

On peut donc relier le temps nécessaire au transfert de chaleur

En 1 Ma, la chaleur est transférée par conduction sur 5 à 6 km

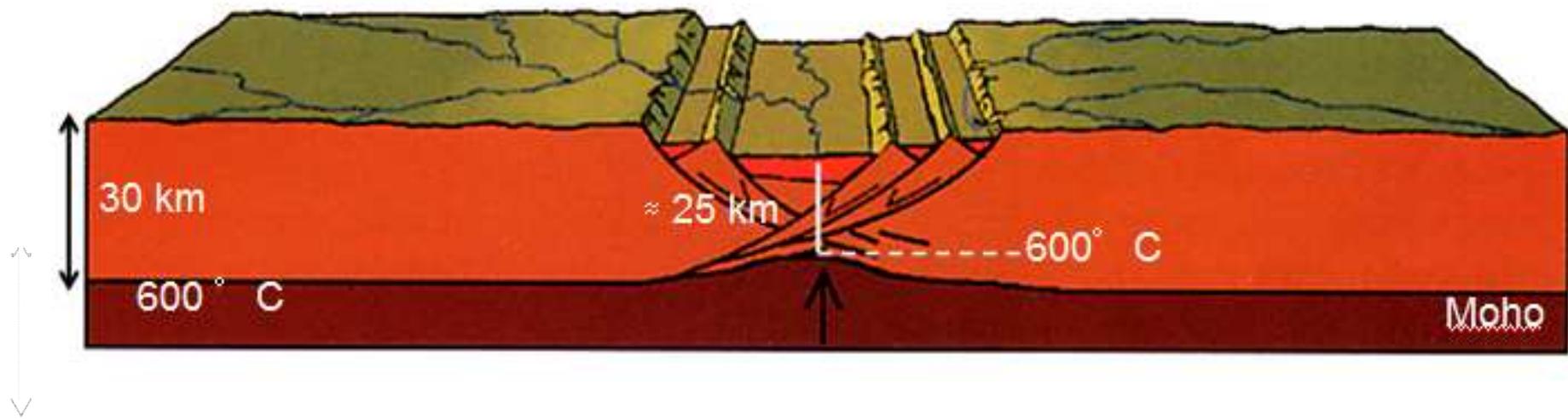
Distance de transfert	Temps critique en Ma
10 km	3-4
20 km	12-13
25 km	19-20
30 km	28-30



La remontée du manteau lors de l'extension => apport de chaleur à la base de la croûte amincie (**25 km**) :

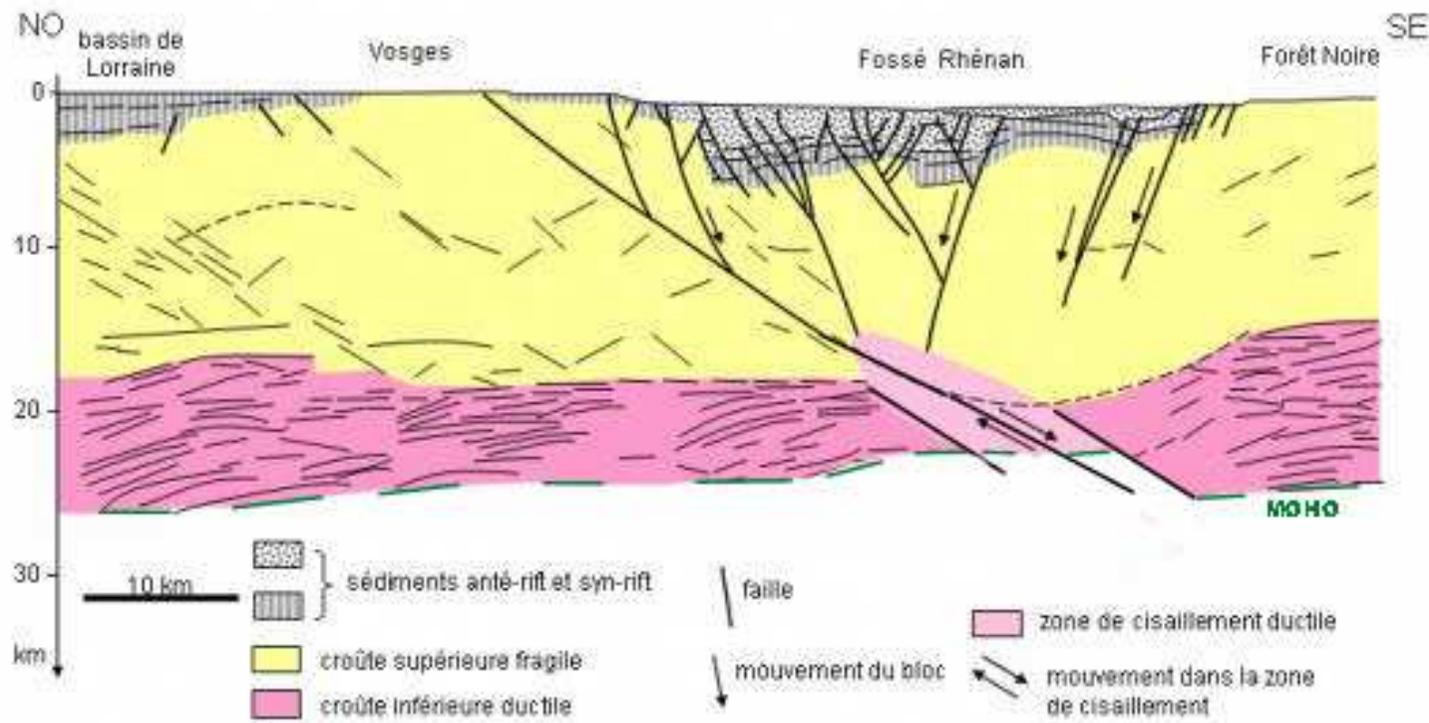
Il faut environ **12-13 Ma** pour que cette chaleur soit transférée en surface dans un site exploitable en géothermie.

La production de chaleur dans le manteau est très faible, donc s'il apporte de la chaleur à la croûte, il va se refroidir (re-équilibre thermique par conduction). Cela prendra entre **1 et 4 Ma** selon le volume de manteau impliqué et la différence de température entre croûte et manteau.



L'anomalie du flux de chaleur aura été totalement dissipée verticalement dans la croûte **17 Ma** après l'extension continentale

- Si on applique ce raisonnement au fossé rhénan



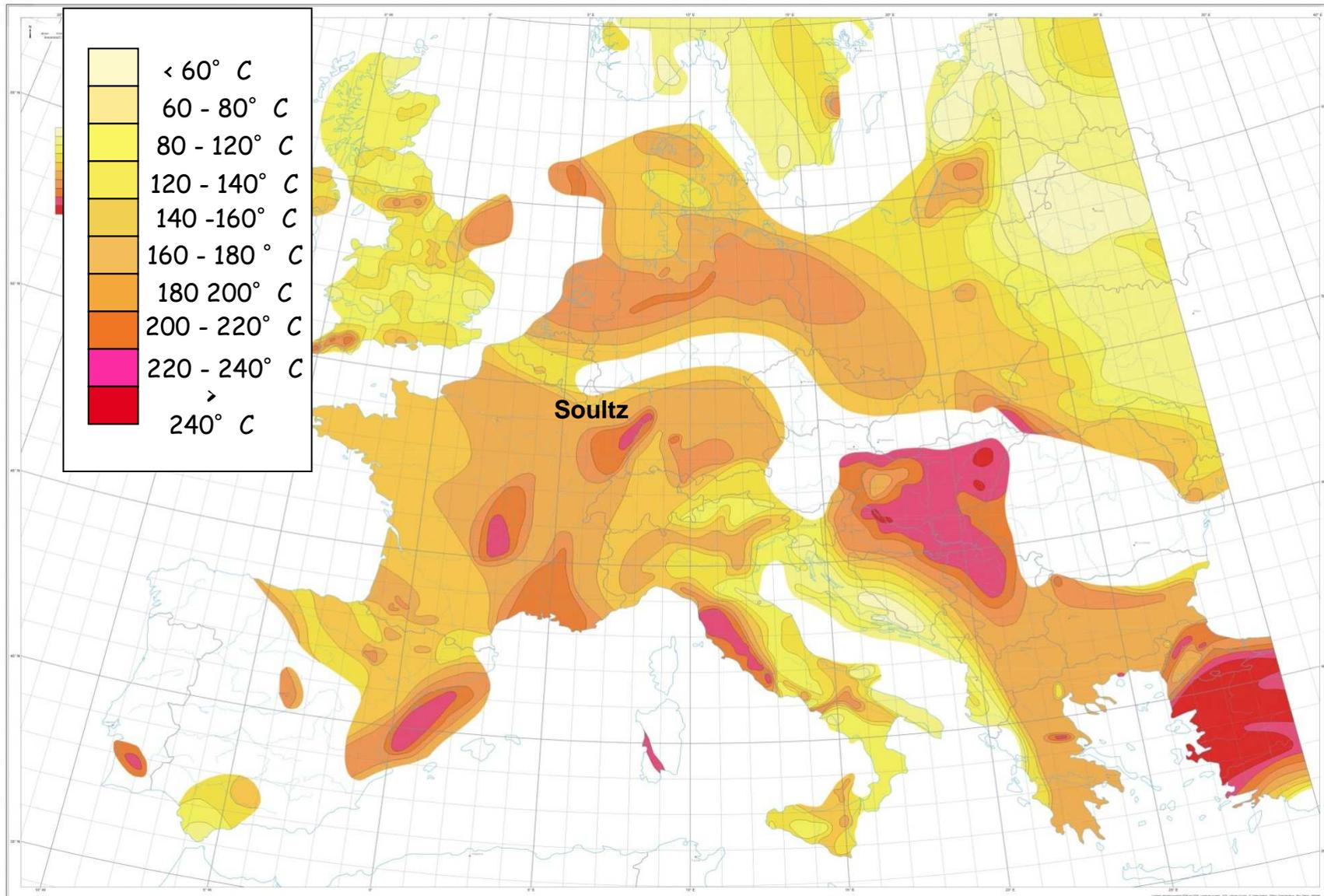
L'extension est datée Oligocène : 33 Ma
 La profondeur du Moho \approx 24 à 25 km

L'anomalie thermique a été dissipée en \approx **23 Ma**
DONC

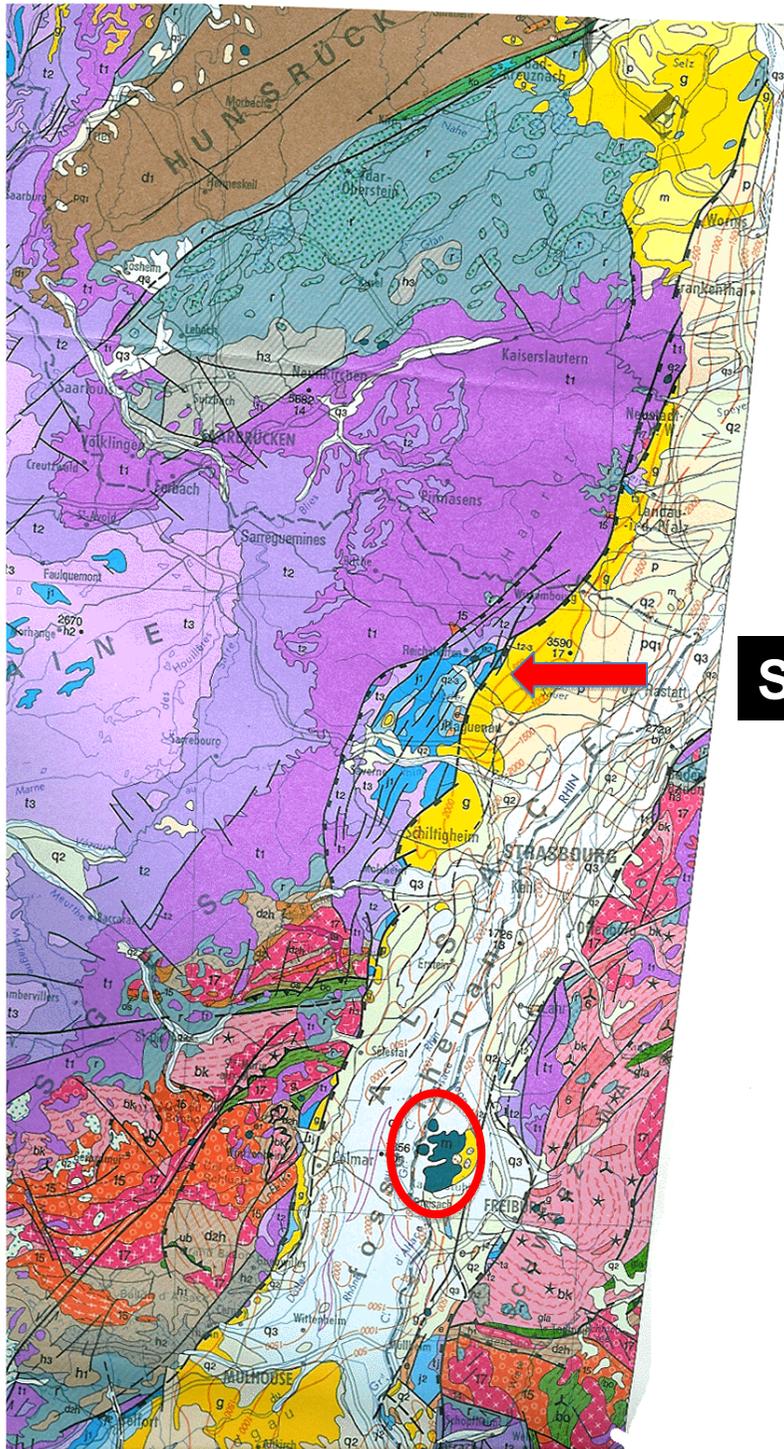
Le gradient géothermique devrait être normal depuis 10 Ma !

Températures à 5 km de profondeur en Europe

MAP OF THE TEMPERATURES EXTRAPOLATED AT 5 KM DEPTH
SCALE 1:4,000,000



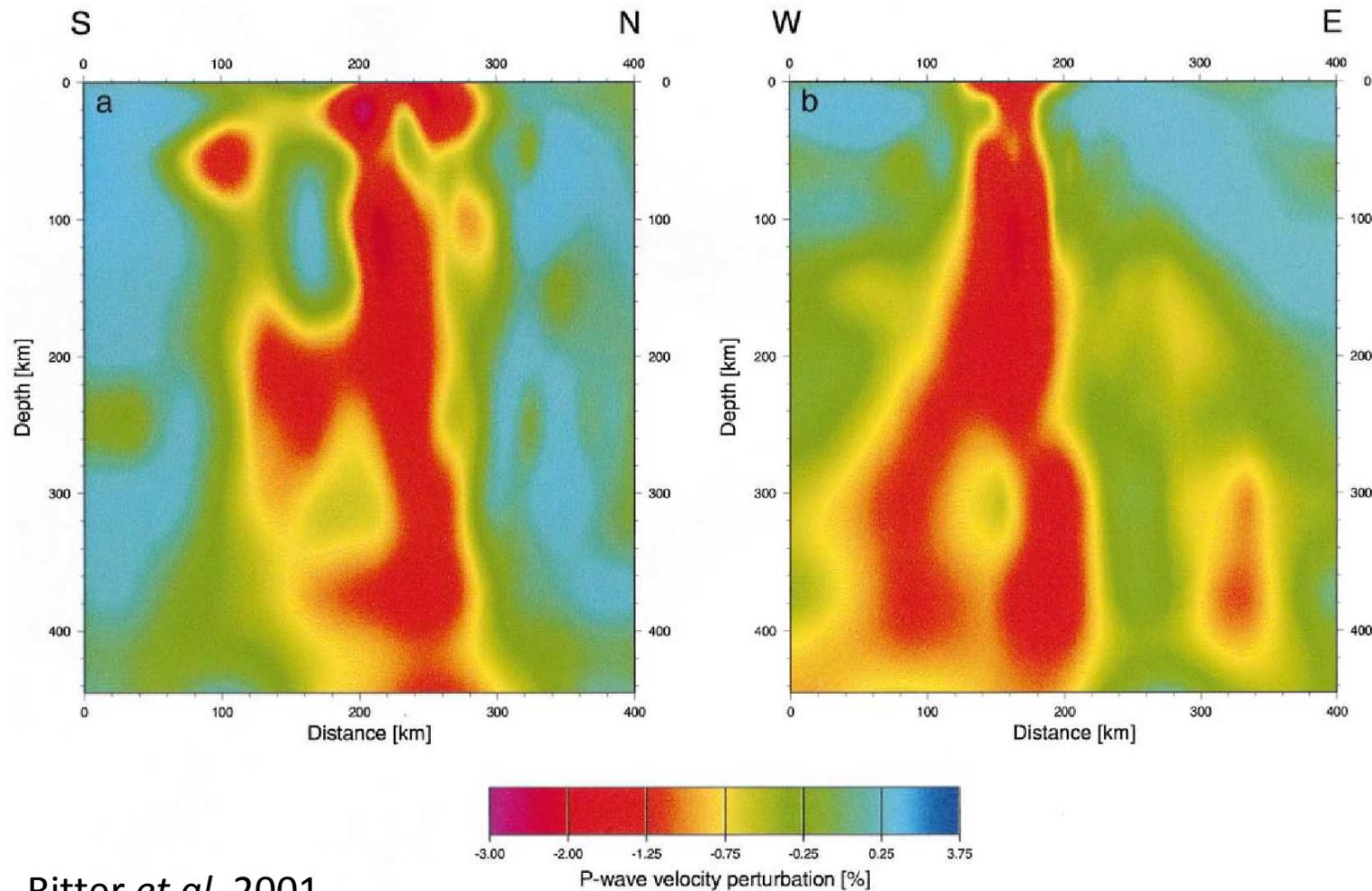
La réalité est donc un peu plus complexe ...



Soultz

Il existe une autre anomalie thermique plus récente entre 18 et 16 Ma liée au volcanisme alcalin du Miocène

Tomographie sismique Eifel



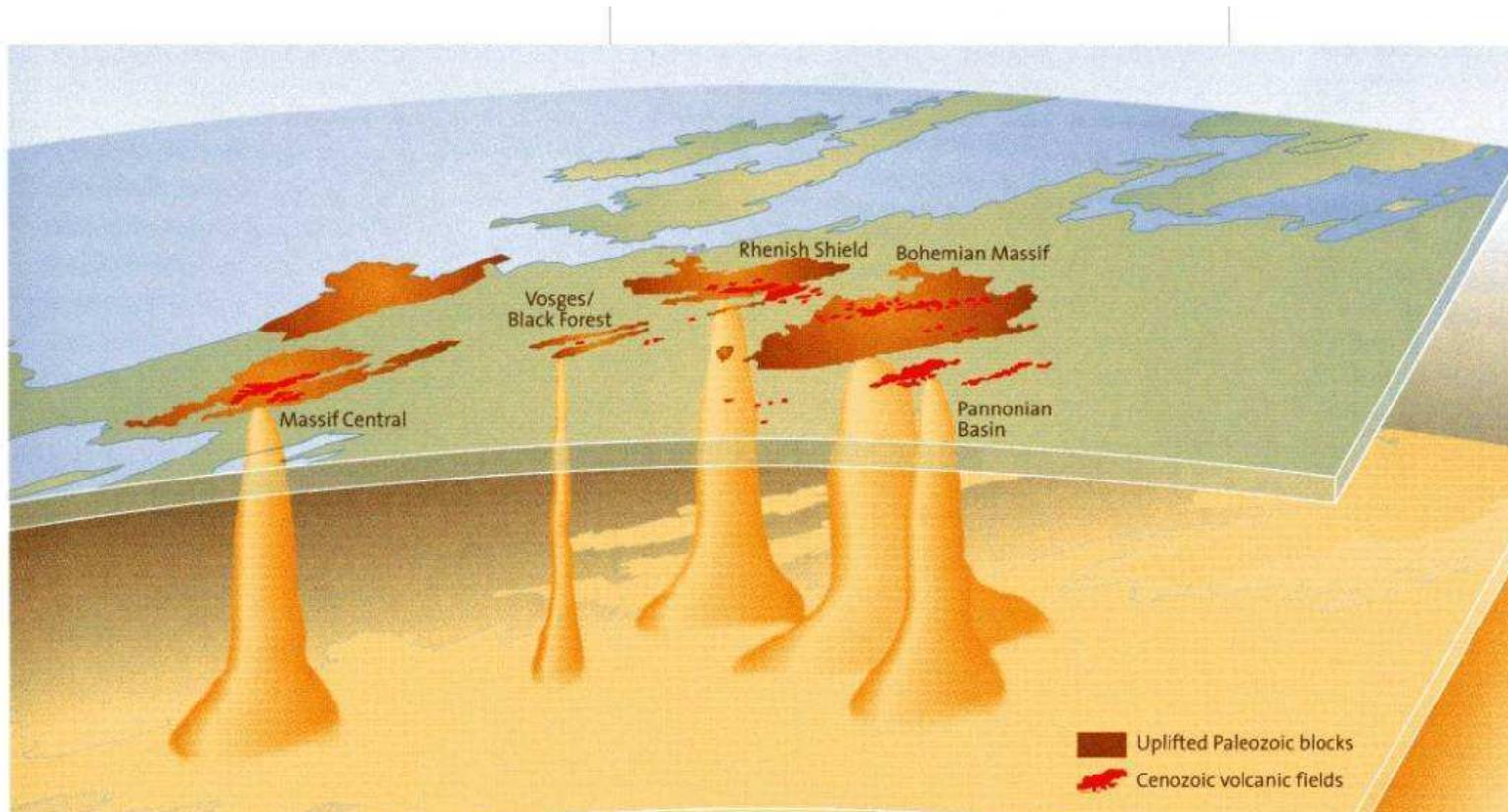
Ritter *et al*, 2001

Anomalie de vitesse des ondes P sur environ 100 km de large,
et de 70 jusqu'à au moins (?) 400 km sous l'Eifel

Interprétations ?

Remontée de petits diapirs mantellique
de 100 à 200 ° C plus chauds que le manteau ambiant
→ **mini ou "baby plumes"** .

Attention tous ces panaches n'ont pas été mis en évidence



C'est cet événement Miocène qui génère l'anomalie du flux de chaleur actuelle

Et pour Bouillante :

→ Pourquoi à Bouillante même ??



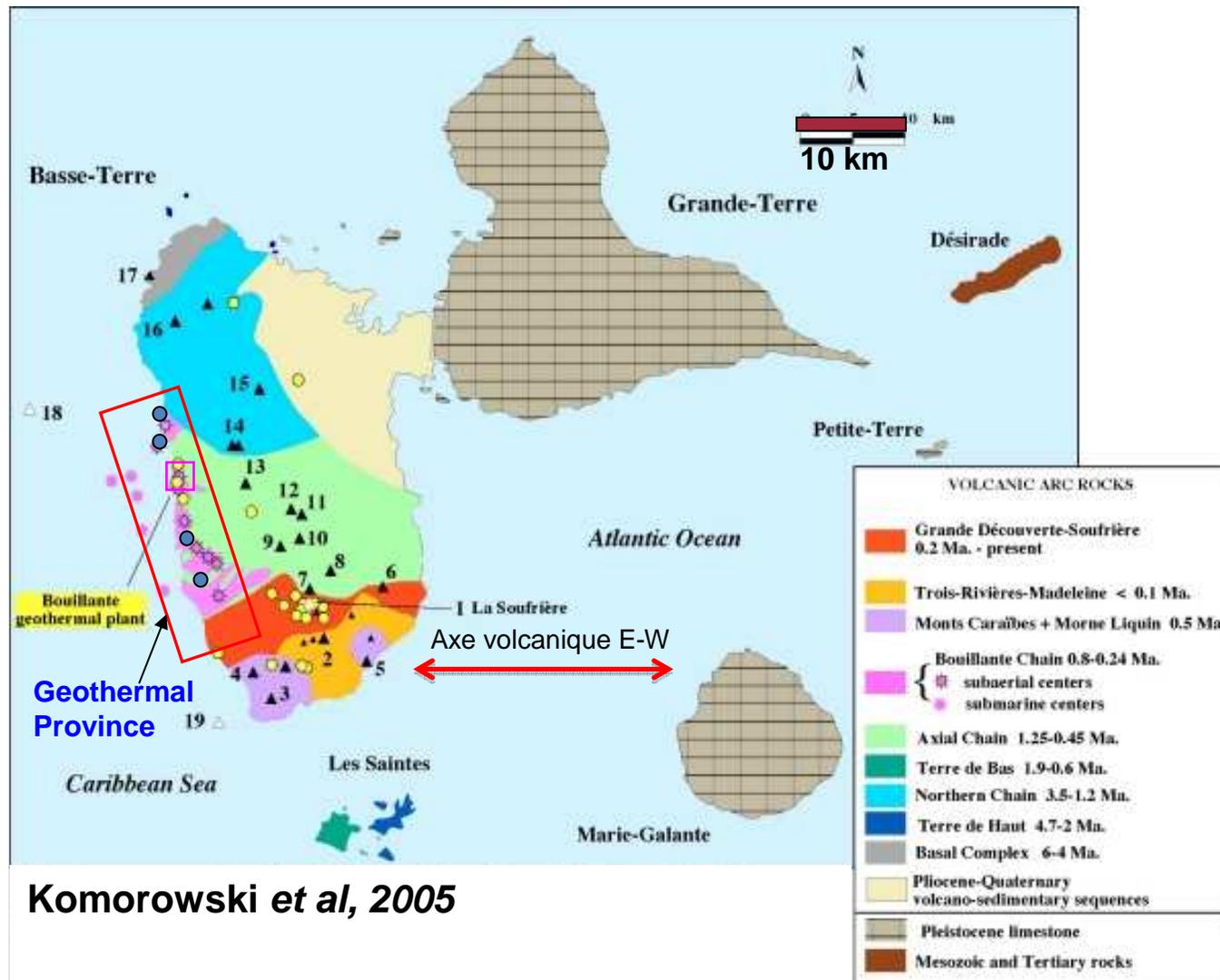
et pas à Deshaies par exemple situé à 20 km au Nord?????



ou près du volcan de la Soufrière ???



Le système géothermal de Bouillante n'est pas localisé sur l'axe volcanique de la Soufrière !



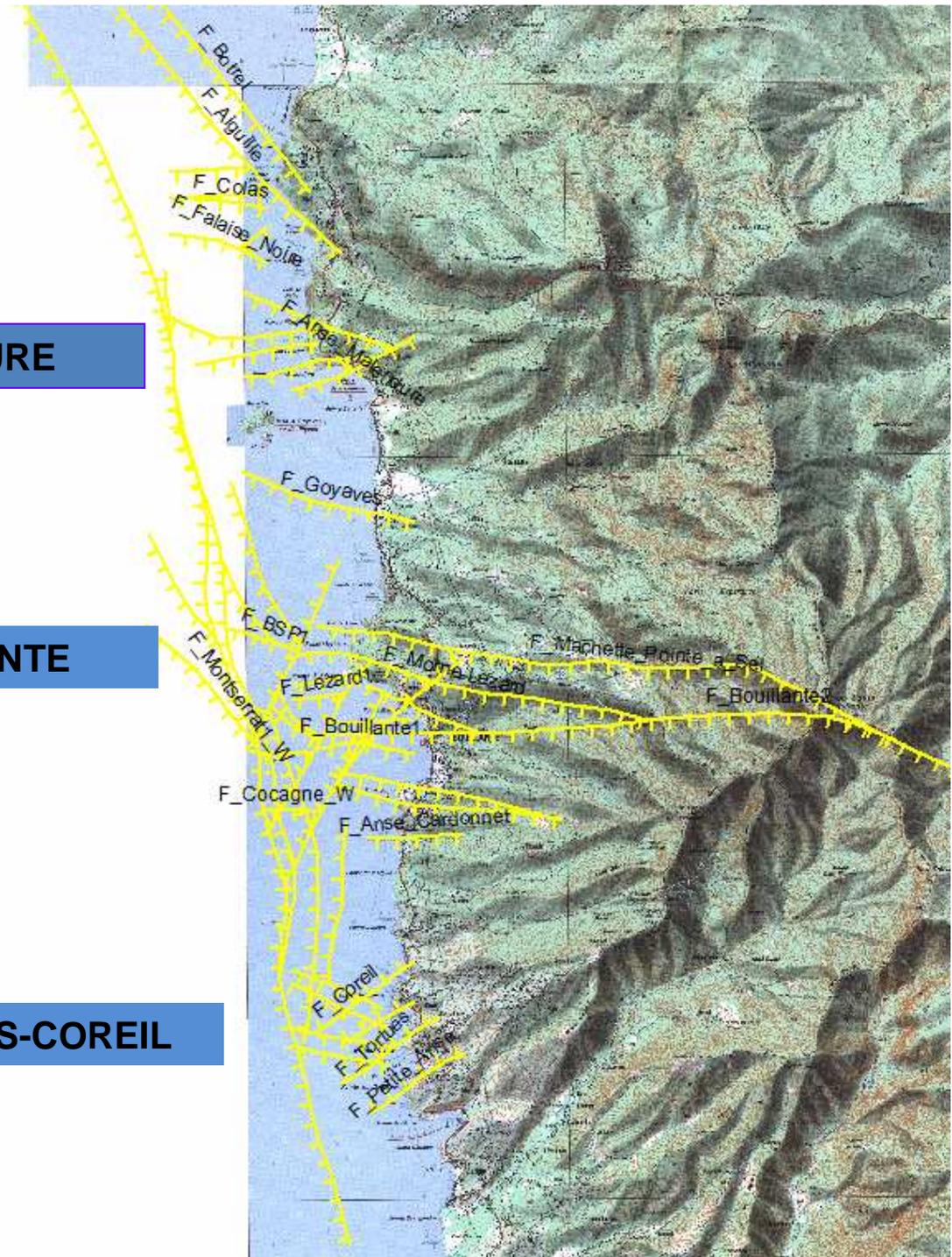
A Bouillante le réseau de failles est dense et complexe

MALENDURE

BOUILLANTE

Le site géothermique de Bouillante est donc positionné dans un mini graben dans lequel un réseau de failles EW en « touche de piano » favorise la circulation de fluides.

THOMAS-COREIL





Bouillante



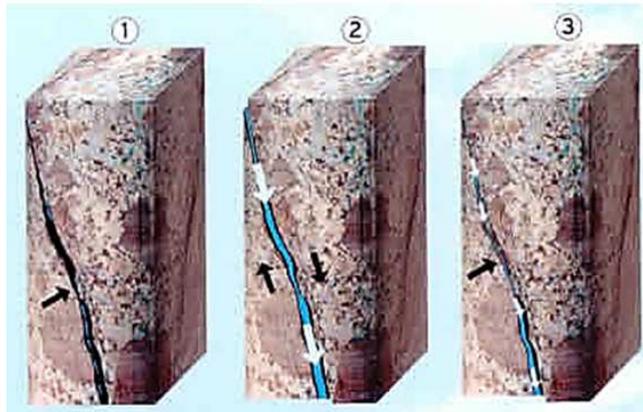
Il y a donc un contexte tectonique favorable à la géothermie

MAIS AUSSI

un contexte local ... des failles qui permettent la circulation des fluides

La technique utilisée à Soultz

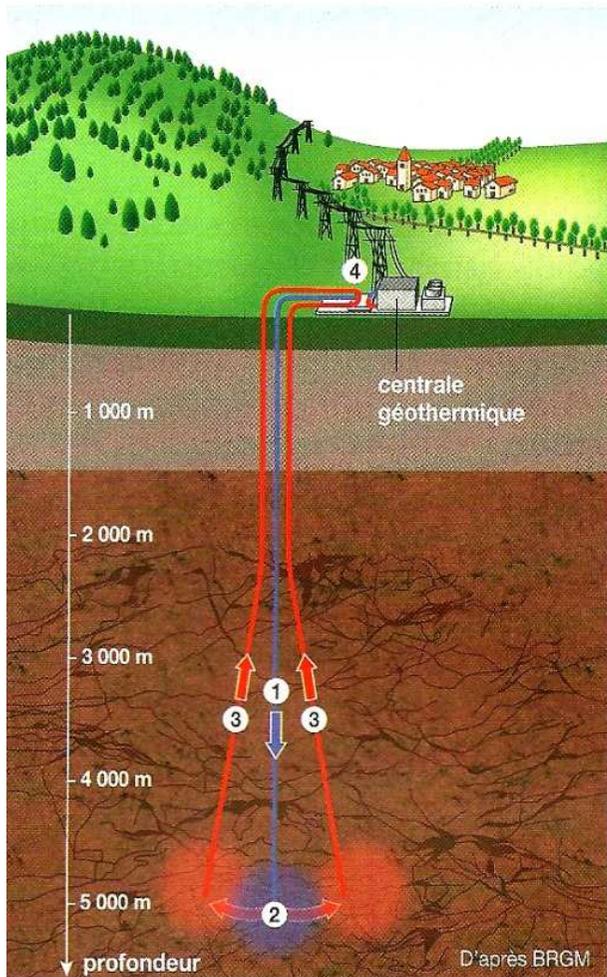
A Soultz un programme de recherche a démarré en 1997 avec la perspective de pouvoir exploiter l'énergie des roches chaudes profondes. Mais en absence d'eau cette énergie ne peut être captée. L'idée est venue de créer artificiellement des réservoirs potentiels par la technique des « **roches chaudes fracturées** ». De l'eau chaude a été injectée à très forte pression pour **élargir les fractures naturelles** du granite.



- ①: état initial : la faille naturelle est plus ou moins colmatée par des dépôts hydrothermaux
- ②: les injections sous pression (flèches blanches) provoquent le glissement de la faille (flèches noires)
- ③: après l'arrêt des injections la fracture initiale est « débouchée » et constitue un chemin géothermal où l'eau pourra circuler

<http://www.geothermie-soultz.fr/>

Schéma de la centrale expérimentale de Soultz



- 1 : injection d'eau froide à 5 000 m de profondeur par le puits central
- 2 : circulation d'eau dans les **fractures naturelles élargies** et réchauffement au contact de la roche chaude (200°C)
- 3 : extraction de l'eau réchauffée par 2 puits de production
- 4 : en surface transformation par l'intermédiaire d'un échangeur thermique de l'eau chaude du circuit primaire en vapeurs d'eau dans le 2° circuit pour entraîner des turbines et produire de l'électricité