

Epreuve - Matière : 103 3762 Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

Le sujet de l'exposé est "Le géotherme terrestre". Le terme géotherme provient de géo - la Terre et thermo - chaleur.

Nous nous proposons d'étudier ce sujet en utilisant la problématique suivante :

Pourquoi peut-on affirmer que le géotherme ^{terrestre} occupe une place centrale en archéologie en géologie ?

Nous favoriserons la démonstration et les objets concrets aussi souvent que possible, nous ne détaillerons pas la démarche utilisée dans l'introduction, le plan de l'exposé étant disponible p 3

2 / 20

Plan

I) Le géotherme terrestre: détermination, origine et implication thermodynamique planétaire

- 1) Détermination et origine
 - a) manifestation et mise en évidence
 - b) origine du géotherme terrestre
- 2) Conséquences du géotherme à différentes échelles
 - a) conséquences rhéologique
 - b) Nombre de Rayleigh

II) Géotherme et magmatisme

- 1) Géotherme et LVZ
- 2) géotherme et fusion partielle

III) La détermination du géotherme en fait précis de contextualisation

Exemple dans les Alpes occidentales

1. métamorphisme et gneiss pérographique
- 2) Application dans les Alpes: Queyria et Montviso
3. Gradient métamorphique Nord-Sud
écologique

IV) Intérêts économiques et planétologiques du géotherme

- 1) géotherme et transition écologique
- 2) Planétologie

I) Le géotherme terrestre : détermination, origine et implication thermodynamique planétaire

1) Détermination et origine

a) manifestations / prise en évidence

Les manifestations de l'activité interne de la Terre sont variées, certaines comme le volcanisme et les processus s'y rapportant (hydrothermalisme) permettent depuis longtemps de supposer une chaleur interne à notre planète.

De plus, depuis plusieurs milliers d'années avant notre ère, les hommes ont cherché des ressources en creusant. Dans ces mines, (à une époque plus moderne et avec des techniques plus adaptées) y règne des températures largement supérieures à celles régnant en surface.

La pratique des forages profonds s'est très vite heurtée à des difficultés techniques liées à la chaleur rencontrée qui augmente avec la profondeur. Actuellement, le forage le plus profond est celui de la péninsule de Kola qui atteint environ 12 km de profondeur. C'est notre limite à l'étude directe de la température de la Terre.

La Terre présente une température interne qui augmente avec la profondeur

L'observation, en surface d'indices de mesure des flux géothermiques met en évidence des zones présentant des anomalies (à la moyenne) positive au niveau des dorsales océaniques par exemple.

Des techniques sismiques (ici la tomographie sismique) permet d'observer un fléchissement des isothermes dans des zones de subduction, ce sont des anomalies négatives.

La température de surface de la Terre n'est pas uniformément répartie.

La variation de la température en fonction de la profondeur (augmentation) et/ou du contexte sera étudié lors de cet exposé.

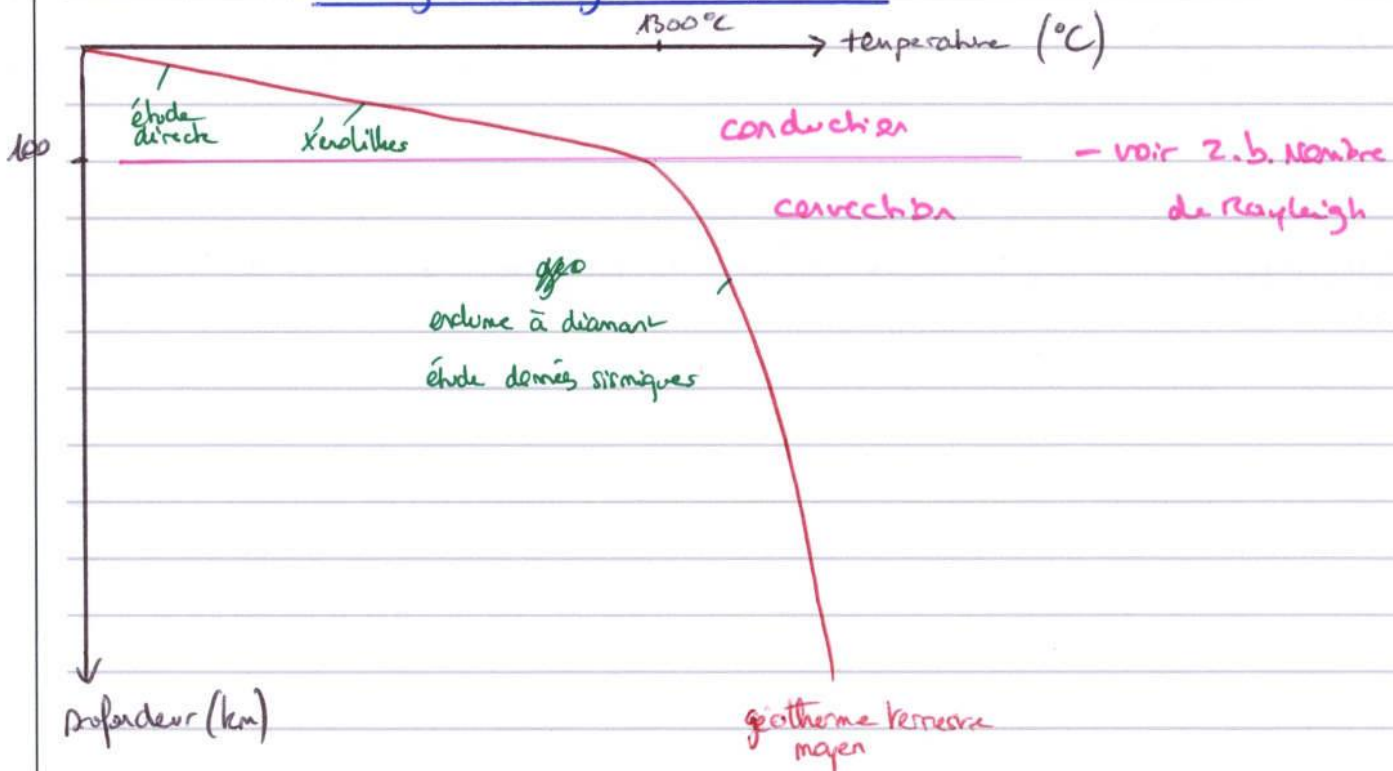
Nous considérerons, dans les premiers kilomètres un géotherme "classique" de $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ "standard".

Epreuve - Matière : 103 3762 Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

b. origine du géotherme terrestre



Graphique 1 : graphique de la température terrestre en fonction de la profondeur

Le géotherme d'une zone stable présenté sur le graphique 1 a été réalisé à la croisée de multiples méthodes (directes pour les 12 km) et indirectes. Rappelons que les géophysiciens et géochimistes ont mis au point une méthode pour simuler les conditions de Pression (P) et température (T).

La description de la méthode sera succincte par souci de temps.

Deux diamants biseautés choisis pour leur dureté sont enchassés dans un farreau, au sein d'une presse hydraulique.

Un échantillon d'une taille inférieure au $1/2 \text{ mm}$ est positionné entre ces diamants. Un laser infrarouge permet de chauffer le creuset.

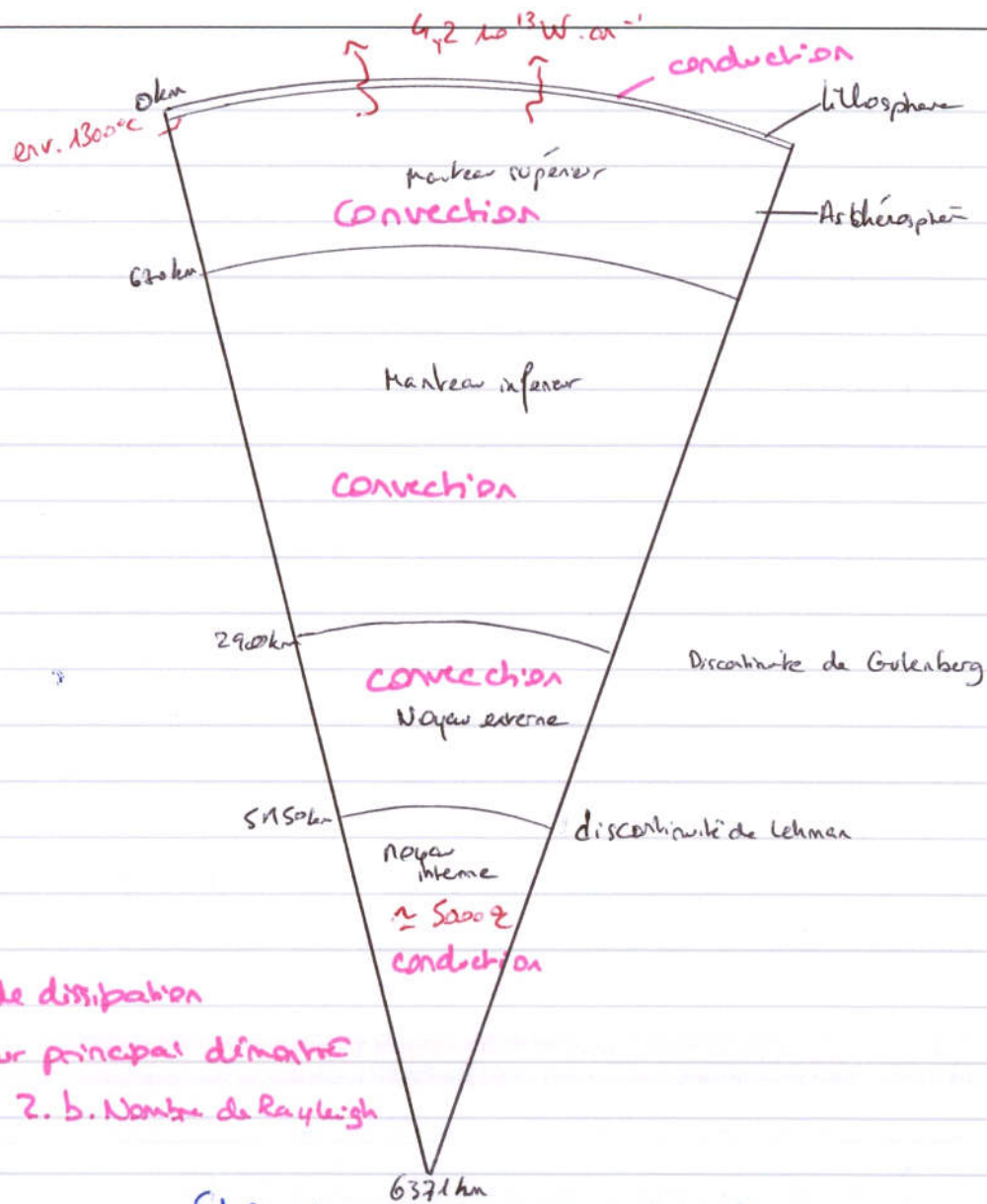
Ainsi on reproduit des P/T importante pour reproduire des conditions supposées et observer des transformations minéralogiques. Des rayons X peuvent être transmis à l'échantillon et la diffraction de ces rayons peut être analysée (feuillets de phyllosilicates pour déterminer... cristallographiquement un minéral).

D'où provient cette chaleur ?

De multiples approches (isotopes de chondrites / achondrites) permettent de proposer le tableau suivant

Processus	Part dans la chaleur interne
Désintégration d'éléments radioactif dans la masse	75%
Énergie thermique résiduelle liée à l'accrétion + choc Géia-Théia	25%
Cristallisation du noyau externe + Friction liée au découplage noyau (liquide) externe - noyau interne (solide)	difficilement quantifiable mais de l'ordre de quelques pourcents

On estime la dissipation de chaleur interne à $4,2 \cdot 10^{13} \text{ W.an}^{-1}$ (contre $1,8 \cdot 10^{17} \text{ W.an}^{-1}$ de chaleur solaire reçue)

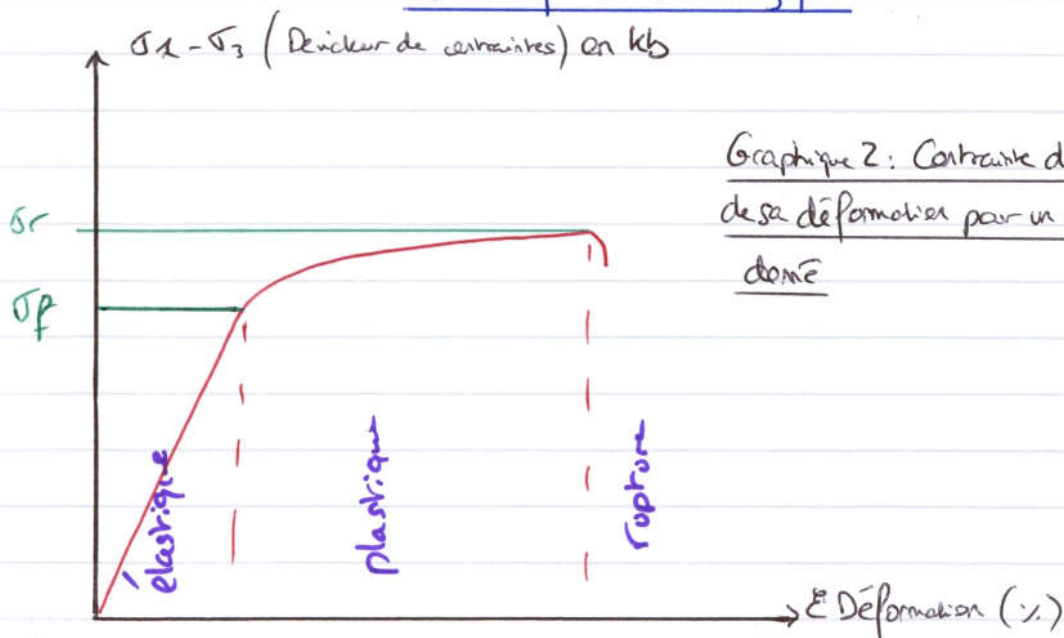


— mode de dissipation de chaleur principal diminue plus loin 2. b. Nombre de Rayleigh

Schéma 1 : structure concentrique interne et températures estimées

2. Conséquences du géotherme à différentes échelles

a) conséquences rhéologiques



L'intérêt ici n'est pas de détailler les déformations au sein des enveloppes terrestres mais de mettre l'accent sur les techniques permettant d'inférer certains comportements rhéologiques liés au géotherme.

L'application d'un déviateur de contrainte à un échantillon permet d'observer sur le graphique 2 plusieurs phénomènes :

- un comportement initialement élastique (retour à la forme d'origine possible)
- un comportement plastique irréversible
- une rupture

Ces comportements sont liés à des seuils

- σ_f seuil de plasticité
- σ_r seuil de rupture

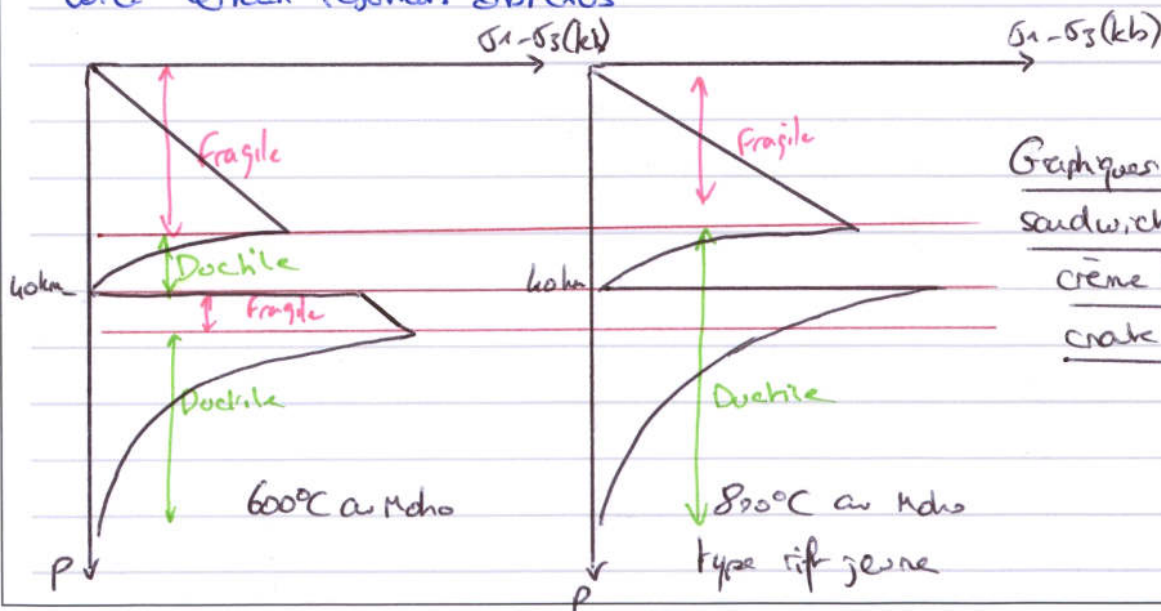
Nous ne faisons pas ici la démonstration complète des études rhéologiques mais les résumerons ainsi :

* Il s'agit d'une étude empirique dont les limites sont discutables (vitesses des phénomènes notamment)

* Byerlee démontre que σ_r est proportionnel à la P quelque soit les roches considérées, pour une température donnée

* σ_f dépend du matériau considéré (plus bas graphique 3 en représentera la crôte continentale par la quartz)

En reproduisant certaines contraintes géothermiques et de profondeur voici certains résultats obtenus



Graphique 3 : modèles sandwich à la gelée et crème bulée pour une crôte continentale

Epreuve - Matière : 103 3762 Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

Cette étude tectonique présente de modèles supposés "sandwich à la gelée" et "crème brûlée".

Selon la température au Moho (donc par notre exposé, le géotherme local) le comportement de la croûte continentale présente, ou non une stratification compatible avec les données sismiques (foyers dans les zones dites fragiles).

À l'échelle locale, le géotherme provoque un comportement rhéologique différent selon ses valeurs.

b. Nombre de Rayleigh

La dissipation de chaleur se manifeste par 3 phénomènes majeurs en thermodynamique

- le rayonnement (photons)
- la conduction (échange de proche en proche sans mouvement)
- la convection (mise en mouvement de matière).

Dans le cadre de l'étude de géotherme nous proposons ici l'application du nombre de Rayleigh au manteau terrestre.

$$R = \frac{g \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot d^3}{K \cdot \nu}$$

$\begin{matrix} m \cdot s^{-2} & K^{-1} & K & m \\ | & | & | & | \\ g & \alpha & \Delta T & d^3 \end{matrix}$

 $\begin{matrix} & K & \\ & | & \\ m^2 \cdot s & \nu & m^2 \cdot s \end{matrix}$

avec g : accélération de la pesanteur $m \cdot s^{-2}$

α : coefficient de dilatation thermique (K^{-1})

ΔT : la différence de température entre les parties du système (K)

d : l'épaisseur du système (m)

K : diffusivité thermique ($m^2 \cdot s^{-1}$)

ν : viscosité dynamique ($m^2 \cdot s^{-1}$)

L'analyse dimensionnelle du nombre de Rayleigh (R) indique un nombre sans dimension.

Un système considéré devient convectif lorsque $R > 1000$.

L'application aux données mantelliques donne une valeur pour R entre 10^6 et 10^8 : des mouvements convectifs sont possibles au sein du manteau.

Les conditions géothermiques (entre autres) permettent de rendre compte d'une dissipation par convection au sein du manteau.

L'application aux différentes couches terrestres est ajoutée en rose sur le schéma 1 p 7.

Le géotherme implique des modes de dissipation de la chaleur dépendant des conditions du système à grande échelle.

Le géotherme influence le comportement rhéologique à petite échelle.

II) Géotherme et magmatisme

Nous présentons ici des mécanismes qui ont été démontrés expérimentalement par les techniques géophysiques et géochimiques précédentes, croisées avec les données sismiques, pétrologiques de terrain.

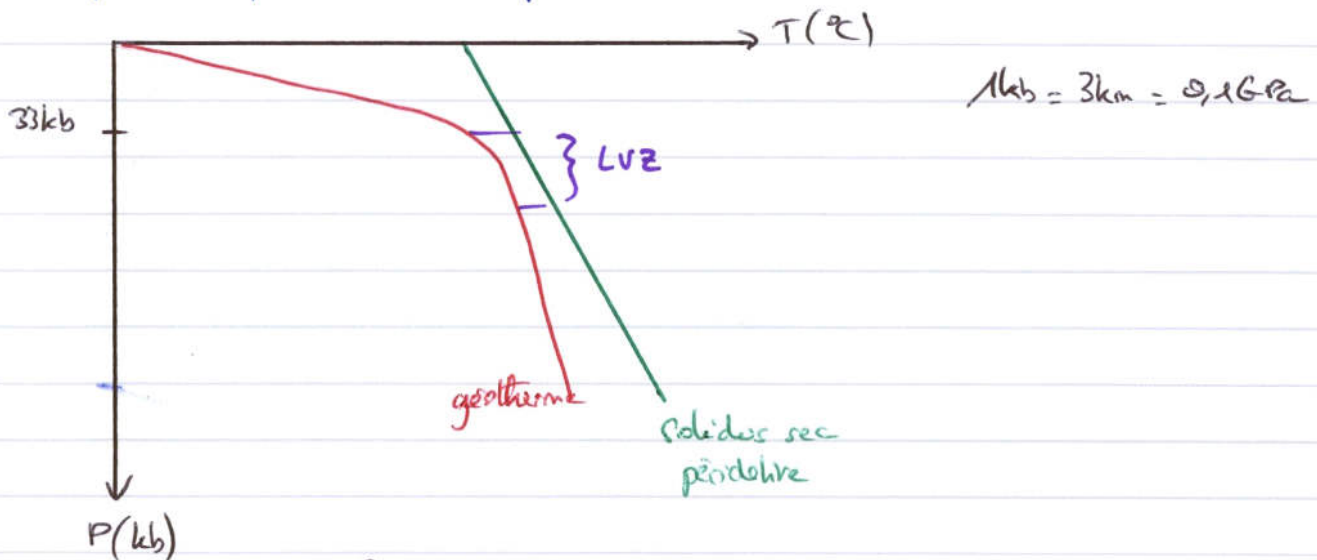
L'intérêt de cette partie est de présenter les mécanismes de fusion partielle, processus centrés autour du géotherme. Nous serons brefs afin de proposer une application de l'étude du géotherme dans le cas des Alpes en 3^e partie.

i) Géotherme et LVZ

Une étude de la vitesse des ondes sismiques en fonction de la profondeur met en évidence une anomalie négative entre 100 et 200 km de profondeur. Autrement dit, une zone dans laquelle la vitesse des ondes P et S observées est inférieure à celle attendue dans le cadre d'une répartition homogène de la densité des roches.

Les ondes P et S se déplacent au sein de cette zone à faible vitesse (LVZ) donc le matériau est solide (la composante de cisaillement des ondes S empêchant leur déplacement dans les liquides).

Cependant, le matériau présente une densité moindre.



Graphique 4: géotherme sur le graphique de la Température en fonction de la profondeur

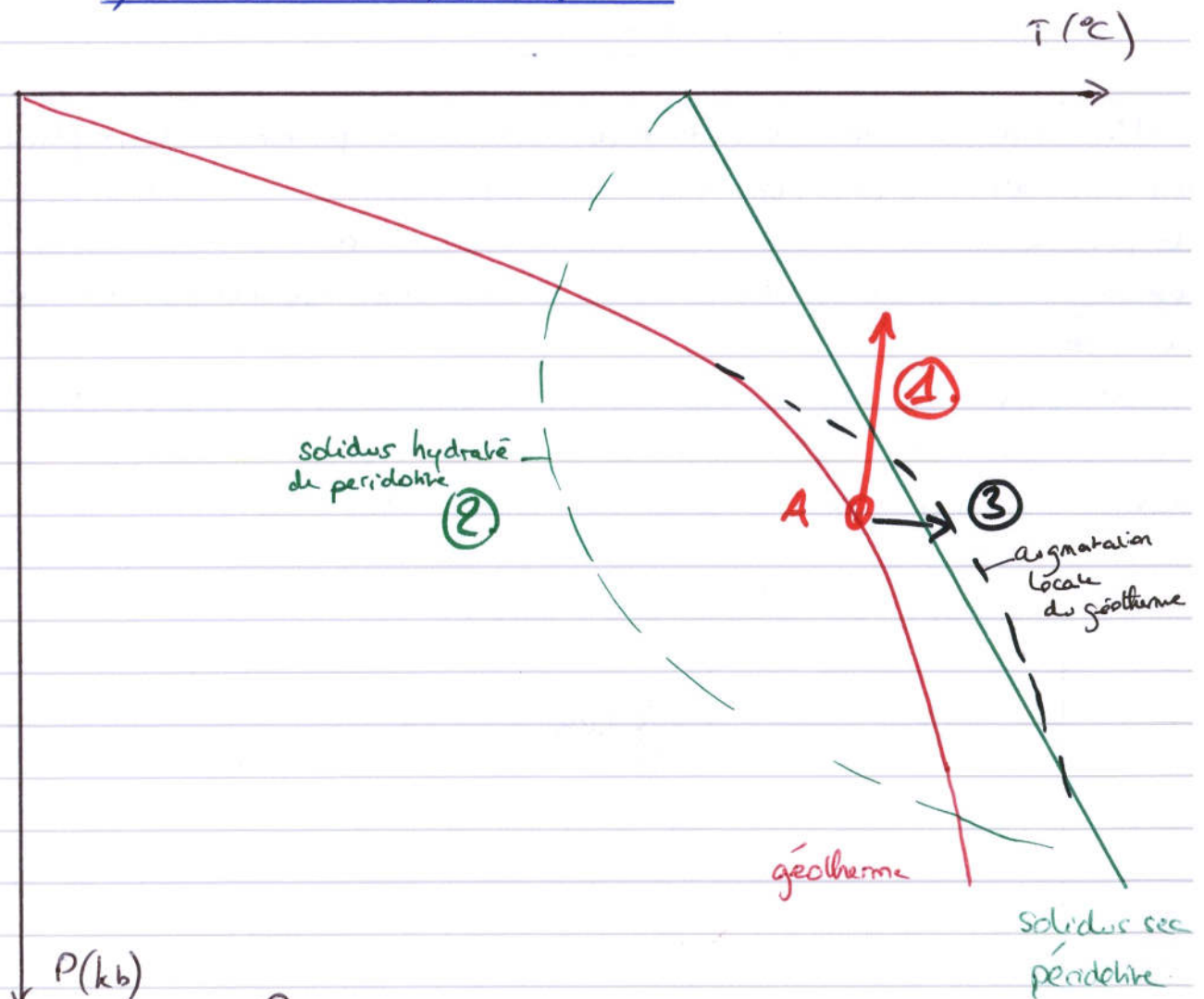
Lorsque l'on ajoute les données de l'univers des solides sec de la péridolite, on distingue un rapprochement entre le solide et le géotherme.

Interprétation: La péridolite se trouve dans des conditions P/T proche de la fusion partielle. Cet état de la matière est compatible avec les données sismiques: le matériau est plus ductile entre 100 et 200 km de profondeur que ce qui était attendu.

Le géotherme explique le comportement des matériaux et permet d'établir des données permettant de comprendre la structuration interne de la Terre.

Remarquons que dans ce II.1) il n'est pas question de magmatisme.

2) Géotherme et fusion partielle



Graphique 5: graphique de la pression en fonction de la température associés à 3 contextes

Epreuve - Matière : 103 3762 Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

Nous serons brefs sur les mécanismes de fusion partielle inhérents aux processus magmatiques.

Nous considérons ici 3 phénomènes aboutissant à une fusion partielle

- ① Une roche de type péridotite, placée en A qui subit une décompression adiabatique entrant en fusion partielle (dorsale repère par exemple).

- ② une modification par métasomatose de cette péridotite (perhydration) modifie le solidus, sans changer de péridotite P/T en A. Ce solidus hydraté croise le géotherme et la fusion partielle s'observe (exemple : métasomatose du coin du manteau lors d'une subduction, corroborée par l'étude des éléments trace notamment Nb/Ta dont l'anomalie impliquerait des fluides issus des métamorphismes de la plaque plongeante (slabs).)

- ③ une surchauffe locale par remontée de matériaux profonds modifie le géotherme qui perce le solidus sec, engendrant une fusion partielle. Exemple : diapir mantellique au niveau de rifts jeunes associés à un magmatisme intraplateau alcalin dense en premier temps.

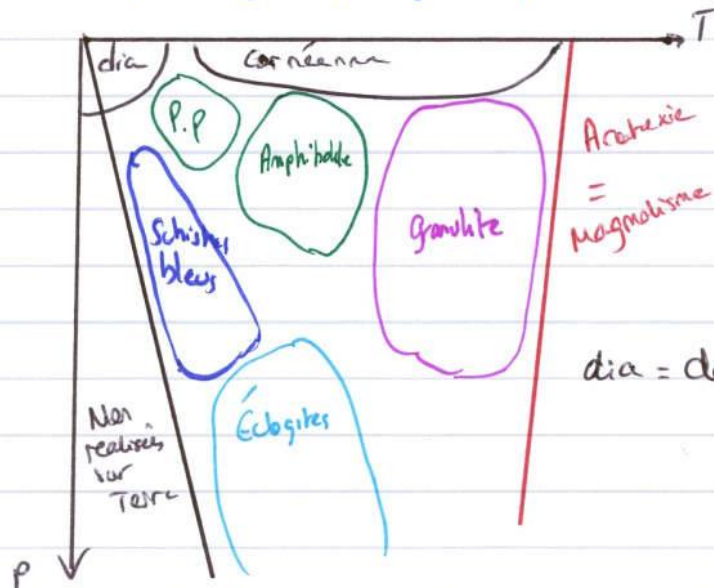
Les conditions régnant dans les profondeurs de la Terre sont en équilibre fragile autour des valeurs du géotherme dans des contextes standard.
 La modification de ces conditions provoque parfois des processus magmatiques.

Nous sommes conscients de la difficulté liée à la démonstration intégrale des données proposées dans ce II.2.

Nous citerons les résultats des études effectuées à l'aide de l'écloine de diamant, permettant de reconstituer les contextes et d'établir, par exemple les droites, courbes de solidus en conditions expérimentales.

III) La reconstitution du géotherme : un édifice précieux de contextualisation exemples des Alpes occidentales a) métamorphisme et gneiss pélogénétique

Les minéraux sont métastables en dehors de leurs conditions P/T de formation.
 La transformation de ces minéraux dans des conditions solide est appelée métamorphisme.
 Grâce aux données expérimentales de l'écloine de diamant (écloine de diamant) et pétrologiques
 de terrain, une gneiss pélogénétique a été établie pour des roches ultrahauts.



Graphique 6. gneiss pélogénétique

Remarquons que par obtenir les données du graphique 6, des domaines de stabilité de minéraux index ont été reportés dans des surfaces nommées faciès métamorphique.

Attention : le terme faciès est générique et a été établi à partir de roche ultrabasique. Un granite placé dans le faciès schiste bleu ne sera pas pétrologiquement un schiste bleu.

Les paragénèses des faciès métamorphiques sont dépendantes de la minéralogie des protolites.

À l'aide de cette grille pétrogénétique et en appliquant l'analyse des paragénèses d'échantillon avec les précautions appropriées, il est possible de placer un échantillon (métabasalt) dans un faciès métamorphique.

2) Application dans les Alpes : Queyras et Haut Vioz

L'étude de la carte au $1/10^6$ de la France est suffisante pour mettre en évidence un gradient métamorphique croissant d'axe et de direction Ouest-Est en se plaçant globalement au niveau du massif du Pelvaux.

(Le but ici n'est pas de lister l'ensemble des indices géomorphologiques, pétrologiques, rhéologiques, sismiques, métamorphiques associés à l'histoire des Alpes. Mais de donner un exemple de reconstitution d'un géotherme au sein de la chaîne).

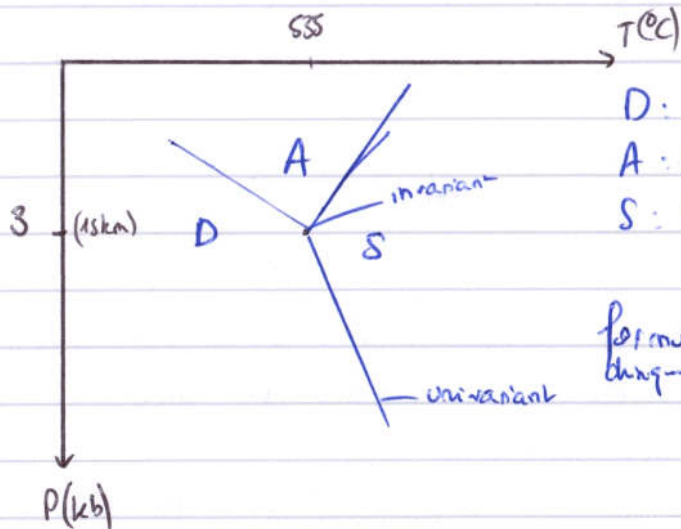
En observant le degré de métamorphismes des roches du Briançonnais, on aboutit au faciès schiste bleu, et de déplacement vers le massif cristallin interne du Dora Maira en passant par le Haut Vioz, on trouve des faciès ~~de~~ Éclogitiques (cer de la coenite au DM).

En reportant les paragénèses rigoureusement, on peut tracer un géotherme moyen de ces zones d'environ $6-8^{\circ}\text{C}/\text{km}$, ce qui correspond à un métamorphisme Bas tempéré - Haute pression.

En comparant ce géotherme au géotherme standard, on le catégorise comme froid. Le gradient métamorphique croissant O-E correspond

à un marqueur supplémentaire de zone de subduction. L'analyse géochimique précisera par l'analyse isotopique radiochronologique la chronologie de cette étape.

3. Gradient métamorphique Nord-Sud.



Graphique 7 : domaines de stabilité aluminosilicates

Nous ne précisons pas ici les modalités de paragenèses liées aux géothermètres et géothermomètre car le sujet ne s'y prête pas étirement. Ceux-ci contribuent néanmoins de précieux marqueurs pour le géotherme reconstitué.

À l'ouest du granite de Navarre se trouve une zone dont le gradient métamorphique s'établit Nord → Sud.

Certains aluminosilicates sont de précieux indicateurs lorsque l'on cherche à reconstituer un gradient métamorphique afin de déterminer un géotherme.

Il est certain et clair qu'on s'en soit ne suffit pas, c'est l'analyse rigoureuse des paragenèses qui sera primordiale.

À l'aide (entre autres) de ces analyses, le géotherme de cette zone a été établi aux alentours de $40^{\circ}C/km$ à $60^{\circ}C/km$. Ce qui correspond à un gradient géotherme moyen et un métamorphisme moyenne Pression / moyenne température.

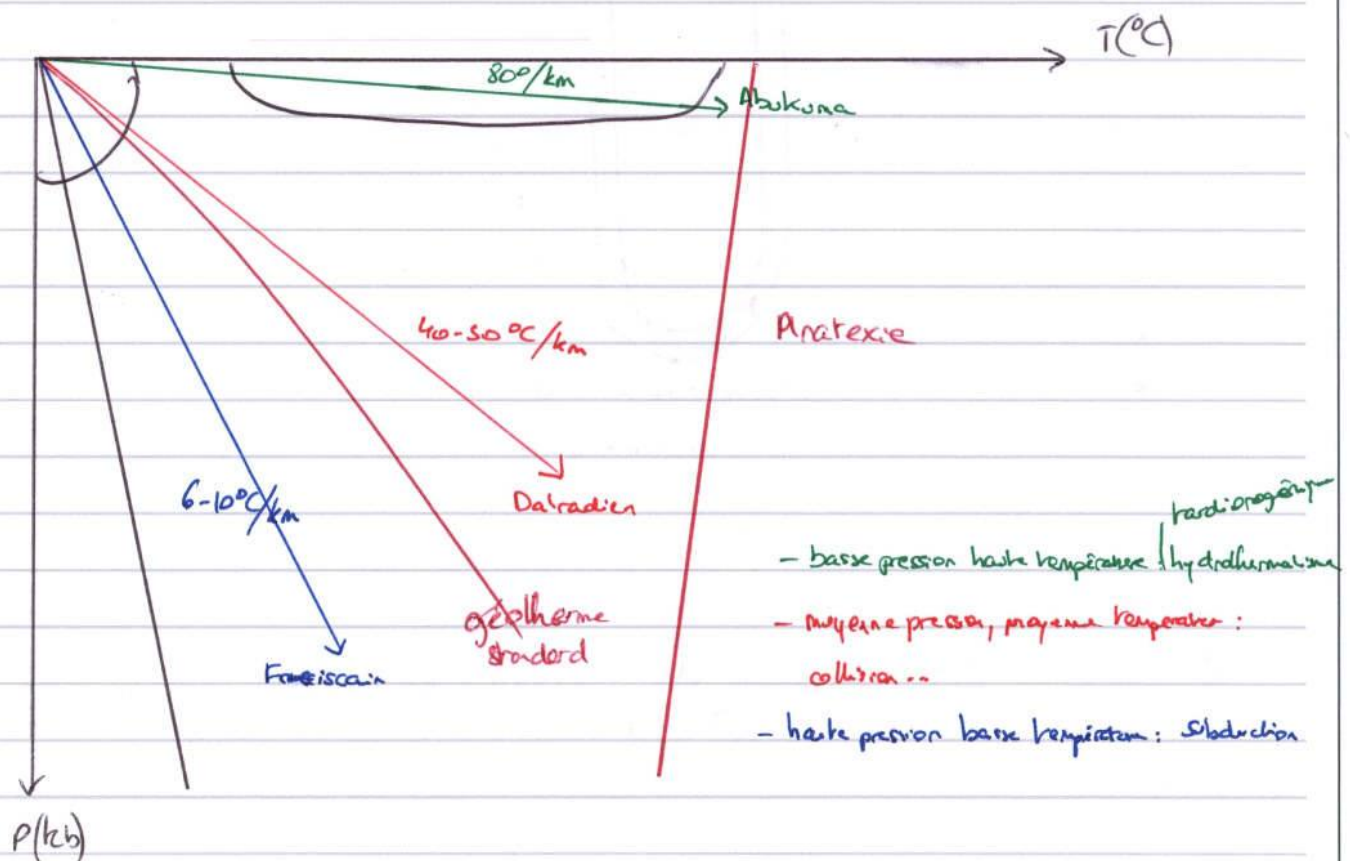
Associées aux données relatives et absolues, ce géotherme coïncide à un contexte de collision. Qui sera chronologiquement replacé dans l'histoire des Alpes.

La reconstitution du géotherme permet une contextualisation, elle passe par l'étude des roches métamorphiques de façon rigoureuse.

Epreuve - Matière : 103 3762 Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.



IV Intérêts économiques et ^{écologiques} planologiques du géotherme
1) géothermie et transition écologique

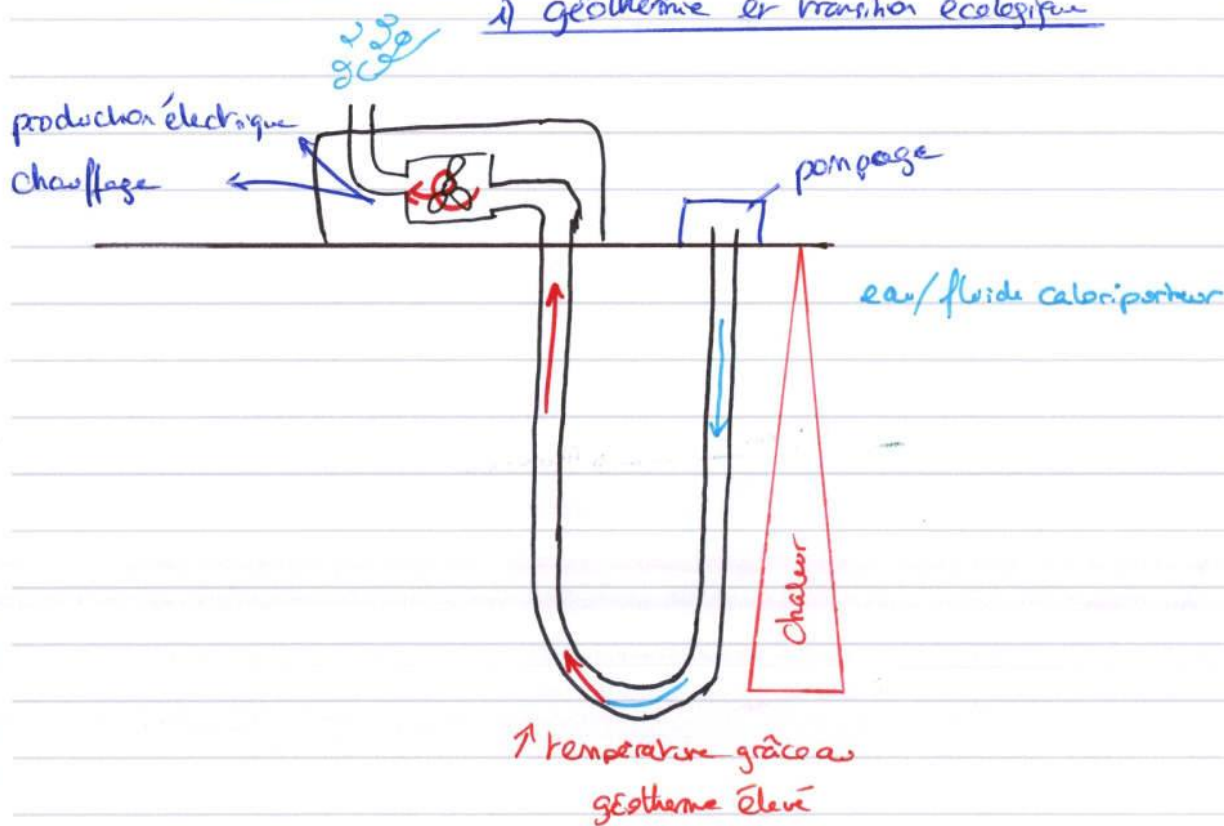


Schéma 2: illustration du principe de la géothermie

Le schéma 2 illustre le principe de la géothermie : se servir du géotherme pour réchauffer un fluide. Ce fluide réchauffé peut se vaporiser et permettre la production électrique, ou réchauffer simplement un bâtiment.

L'Irlande présente un avantage majeur, situé sur la dorsale médio-atlantique et un point chaud, la géothermie y est très élevée. L'électricité produite par les nombreuses centrales géothermiques est gratuite pour les habitants, des bananes et tomates y sont produites sous serre toute l'année.

Dans une phase de transition écologique et de mix énergétique, la géothermie semble très intéressante. Mais voici quelques limites à souligner

* le géotherme n'est pas aussi élevé partout, le forage est très coûteux voire techniquement impossible au-delà d'une certaine profondeur

* la perte en ligne rend illusoire de produire dans les zones reculées et de l'acheminer vers les zones de consommation

* la nature ^{à fluidité} et la puissance du pompage nécessite une vigilance particulière afin de ne pas polluer ni fracturer hydrauliquement les sous-sols.

* le coût de développement ~~est~~ et la technicité de la réalisation n'est pas facilement envisageable dans des pays en cours de développement et où le charbon est bon marché.

L'amélioration des techniques de forage et l'immence des objectifs de la transition écologique préviennent de grandes avancées dans ce domaine.

2. Planétologie

L'un des deux objectifs de la mission Insight de la Nasa n'a pas été atteint, le thermomètre associé à un dispositif de forage n'a pas réussi à perforer la roche martienne (Heureusement, Seis et Wi, fournissent des données sismiques cruciales).

Mars est deux fois plus petite que la Terre et donc $2 \times 2 \times 2 = 8 \times$ moins volumineuse ($\frac{4}{3}\pi r^3_{\text{rayon}}$)

Comprendre le géotherme martien, ou lunaire, c'est entrevoir les mécanismes de refroidissement planétaires. Il est évident que l'activité de la Terre : sa tectonique des plaques est liée au géotherme.

Les données de la mission Exomars, qui forera à 2m de profondeur sur Mars fourniront de précieux résultats. Cela permettra de mieux comprendre l'histoire de Mars, et de la Terre.

Nous l'avons vu au cours de cet exposé, le géotherme est central en géologie. Il est intrinsèquement lié à l'histoire de la Planète Terre, il n'est pas perceptible équitablenent sur Terre.

De ses manifestations venues à ses origines, des conséquences locales sur les roches aux grands courants convectifs de D"or au sein de l'asthénosphère, le géotherme est intimement lié au magmatisme.

Le géotherme est variable en fonction du contexte et sa reconstitution à l'aide des données métamorphiques est un précieux outil.

L'exploitation de cette énergie sera peut-être un élément-clé de la décarbonation et de la transition écologique.

L'étude des manifestations de la géothermie est encore actuelle et ne cesse de faire avancer les connaissances (Rassemblement de la Science 2025 - champs hydrothermaux Archéologie)

L'étude de la géothermie se place dans l'histoire des Sciences et est fortement liée à l'avancée des techniques (comme les sondes en sciences). Espérons que de nouvelles vocations techniques, technologiques, scientifiques naîtront chez les prochaines générations pour développer la géothermie.