

Modélisation analogique de la convection

Problème :

« Le transfert de chaleur de la profondeur vers la surface se produit selon deux mécanismes : la convection et la conduction. Le transfert par convection est beaucoup plus efficace » (projet du nouveau programme de terminale scientifique 2011).

Comment expliquer l'existence des mouvements de matière dans le manteau ?

Consigne :

A partir du matériel proposé, réaliser un protocole expérimental modélisant la convection thermique dans le manteau. Réaliser ensuite le modèle analogique de la convection mantellique.

Productions attendues :

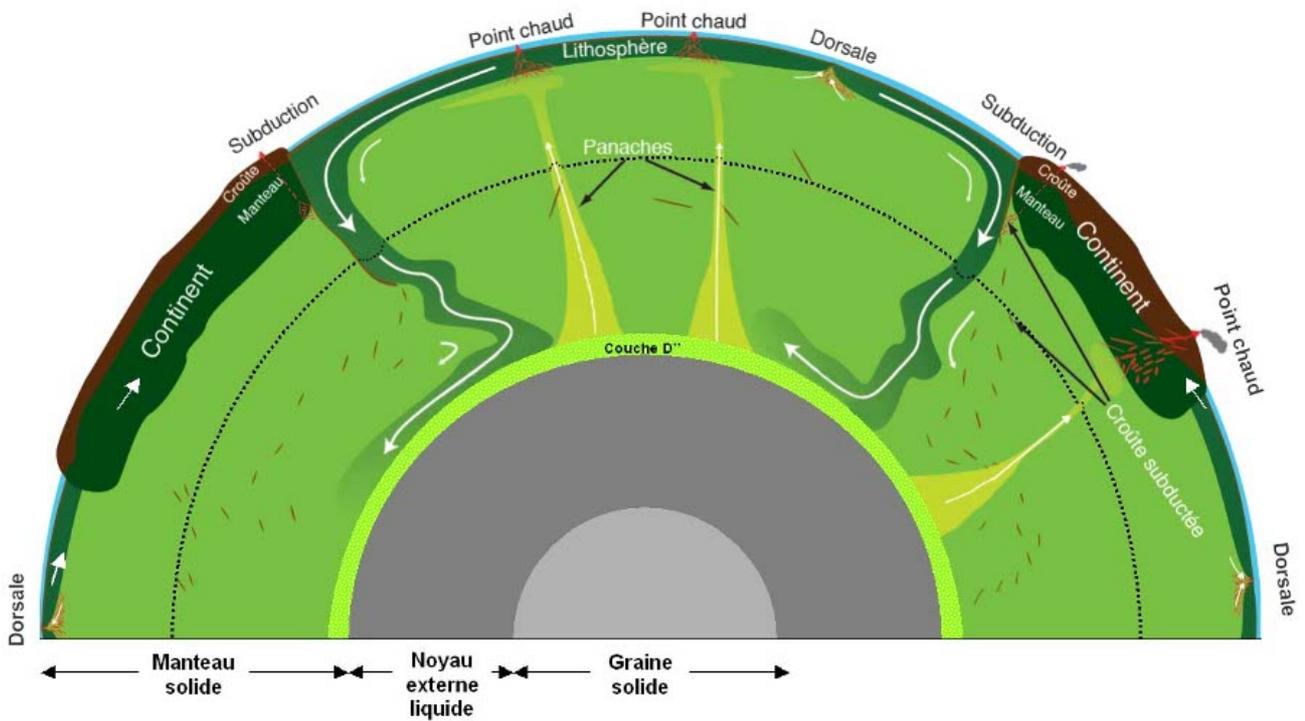
- Rédaction d'un protocole expérimental
- Réaliser une série de photographies du phénomène observé lors de la modélisation, accompagnée d'un schéma bilan légendé.
- Réaliser un diaporama intégrant tous les éléments de la production.

Supports à disposition	Capacités et attitudes mises en œuvre « J'apprends à : »	Critères de réussite « j'aurais réussi si : »	Autoévaluation	
			oui	non
<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>Matériel pour la réalisation du marbré :</u> - Un four - Un thermomètre digital portatif (attention vérifier la température maximale tolérée) - Deux pâtes prêtes à cuire du commerce - Cacao en poudre ou colorant alimentaire - Moule à cake - Matière grasse pour graisser le moule 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pratiquer une démarche scientifique (raisonner avec rigueur et modéliser) ➤ Manipuler et expérimenter ➤ Réaliser des coupes sériées du marbré ➤ Savoir utiliser un appareil photographique et un logiciel d'acquisition d'images ➤ Exprimer et exploiter des résultats à l'écrit en utilisant les technologies de l'information et de la communication. ➤ Réaliser un schéma bilan 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Je sais concevoir un protocole expérimental à partir du matériel mis à la disposition ➤ Je réalise la recette du marbré en respectant le protocole ➤ Je choisis la tranche la plus représentative du phénomène étudié. ➤ Je sais utiliser des fonctionnalités de l'appareil numérique et du logiciel 		

<ul style="list-style-type: none"> - Fiche : recette du marbré - Couteau et plaque à découper ➤ Document : schéma d'une coupe du globe terrestre montrant la convection mantellique ➤ Appareil photographique numérique ➤ Logiciel de dessin (Paint, Photoshop, Illustrator ...) ➤ Logiciel d'acquisition d'images 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Communiquer dans un langage scientifiquement approprié (graphique et numérique) ➤ Manifester un sens de l'observation, curiosité et esprit critique. ➤ Respecter les règles de sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Je choisis un type de représentation des structures fidèle au phénomène observé ➤ le schéma est lisible et clair. 		
---	---	--	--	--

Schéma d'une coupe du globe terrestre montrant la convection mantellique

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre>



Correction : Tranches sériées du marbré montrant les courants de convection

L'utilisation d'un four permet de chauffer le bas (sole du four), la partie supérieure du gâteau étant plus froide. En laissant la porte du four ouverte, les résultats sont plus spectaculaires. Des coupes sériées dans le cake montrent les figures de convection des deux pâtes, figées par la cuisson.

- Série 1 : La pâte blanche monte la pâte chocolatée plus froide descend sur les côtés.



Série 2 : Pâte blanche et pâte colorée (colorant alimentaire). La pâte verte plus froide plonge dans la pâte blanche.



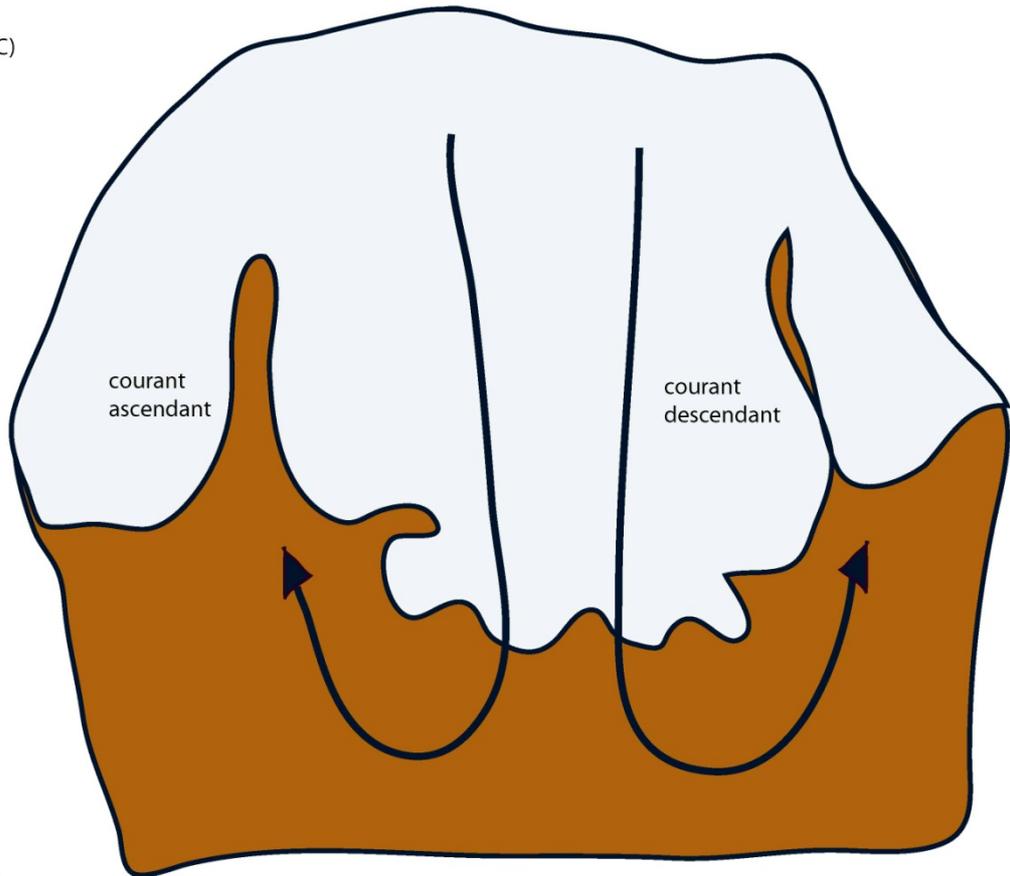
Série 3 : Pâte vanillée et pâte colorée au chocolat (densité équivalente).



Les deux pâtes montrent des courants de convection complexes.

- Schéma : modèle analogique de la convection mantellique

température moins élevée (environ 100°C)



température élevée (200°C)



Fiche : Recette du marbré

Ingrédients

6 œufs,
200 g de sucre,
200 g de farine,
1 sachet de levure chimique,
2 g de sel,
180 g de beurre,
20 g de cacao amer.

Préparation:

Fouetter les œufs et le sucre, y ajouter le beurre fondu

Mélanger le tout avec la farine, la levure et la pincée de sel

Prélever un tiers de pâte et la mélanger au cacao dans un second saladier

Dans un moule beurré, y placer en alternance la pâte sans cacao et la pâte avec cacao,

Mettre au four à 180°C et 200°C pendant 40 minutes.

Coupes transversales :

Laisser refroidir quelques minutes, puis démouler et couper des tranches transversales avec un couteau propre et bien aiguisé.

Aide à la démarche de résolution

➤ Densité et température :

Sous l'action de la chaleur, le matériau se dilate, la quantité de matière reste constante dans un volume plus grand, donc la masse volumique et la densité diminuent.

➤ Densité et Masse Volumique

Masse volumique

La masse volumique (ou masse spécifique) représente la masse par unité de volume :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Unités : } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Densité

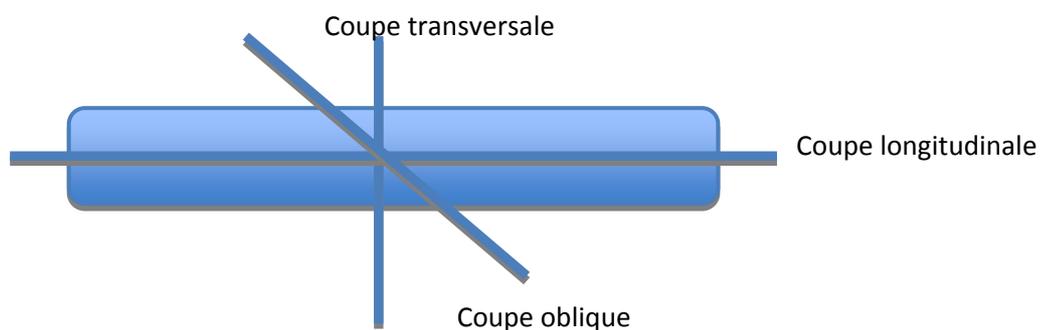
La densité est le rapport entre la masse d'un corps et la masse du même volume d'eau pure à 4°C. La densité est aussi égale au rapport entre la masse volumique du corps et la masse volumique de l'eau.

$$\text{densité}_{\text{élément}} = \frac{\rho_{\text{élément}}}{\rho_{\text{eau}}} \quad \text{Grandeur sans unités}$$

Remarque: La densité n'a pas d'unité

Réaliser une coupe transversale, oblique ou longitudinale :

Une coupe transversale est une coupe perpendiculaire au grand axe d'un objet, alors qu'une coupe longitudinale contient le grand axe. Une coupe oblique est l'intermédiaire entre ces deux coupes. Pour simplifier, par des coupes transversales d'une baguette de pain on obtient des tartines, une coupe longitudinale donne des sandwiches.



Photographie d'une tranche de marbré représentative du phénomène étudié (pâte chocolatée disposée en haut)



Tranche de marbré (pâte cacaotée en bas)



Fiche laboratoire et compléments scientifiques :

L'EVACUATION DE LA CHALEUR ET LE MOUVEMENT DES PLAQUES

L'énergie nécessaire à la tectonique des plaques provient de ce que la chaleur, produite essentiellement par la radioactivité des roches de l'intérieur de la terre, est plus importante que celle que peut évacuer la conductivité thermique. Il s'en suit un déplacement des roches chaudes vers la surface ce qui permet une évacuation plus rapide et plus efficace de la chaleur.

Ces mouvements entraînent une distribution inégale des températures qui se traduisent en différences de densité à l'origine des forces mécaniques. Il n'y a donc pas un « moteur » qui serait localisé dans les zones de subduction

Xavier Le Pichon

Laboratoire de Géologie, ENS Paris

Henri-Claude Nataf

Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique, Grenoble

LA CONVECTION, UN MODE DE TRANSPORT DE LA CHALEUR

Lorsque la température d'un milieu n'est pas homogène, la chaleur peut être transportée des milieux « chauds » vers les milieux « froids » par différents processus :

- La *conduction thermique*, qui permet la diffusion de la chaleur à travers un milieu statique par la propagation des vibrations du réseau atomique.
- Le *rayonnement électromagnétique* dans le cas d'un milieu transparent.
- La *convection*, qui permet un transport de la chaleur par la matière elle-même en mouvement.

La découverte de la convection comme processus de transfert de la chaleur est due à **Rumford** en 1797, mais les véritables investigations expérimentales et théoriques ne datent que du début du XX^{ème} siècle. Les expériences décisives sont réalisées en 1900 par **Bénard** qui étudie l'organisation de la convection dans des couches de fluides visqueux chauffés par la base (la viscosité d'un fluide traduit sa résistance à l'écoulement – le miel est par exemple plus visqueux que l'eau). Bénard montre que lorsque le chauffage dépasse une certaine valeur critique, la conduction n'est plus assez efficace pour évacuer toute la chaleur et la convection prend le relais : la matière du fond, plus chaude et plus légère, s'élève, se refroidit en surface, devient plus dense et retombe. Le transfert de la chaleur se fait par une circulation organisée de la matière avec des courants ascendants chauds et des courants descendants froids.

Vincent Deparis

Lycée Jean Monnet - Annemasse

LA PHYSIQUE DE LA CONVECTION

Dans un **corps** opaque **supposé non déformable**, la chaleur se transmet par conduction. Les atomes des zones chaudes vibrent plus que les atomes des zones froides. Ces vibrations se transmettent de proche en proche des parties chaudes vers les froides ; il n'y a pas de mouvement macroscopique de matière. C'est ce qui se passe quand on pose une brique froide sur une plaque chauffante. Mais que se passe-t-il dans un corps déformable, l'eau d'une casserole par exemple ? Un corps se dilate quand sa température augmente et sa masse volumique devient plus faible. Si un corps est refroidi par le bas et chauffé par le haut (casserole d'eau chaude posée sur un tapis de glace), les zones denses seront en bas, les régions peu denses en haut. C'est une situation stable, qui n'engendrera aucun mouvement. Si par contre un corps est chauffé par le bas et refroidi par le haut (casserole d'eau froide posée sur une plaque chauffante), les zones denses seront en haut, et les légères en bas. Alors la matière froide du haut aura tendance à descendre et la matière chaude et un peu moins dense du bas aura tendance à monter. C'est la convection thermique.

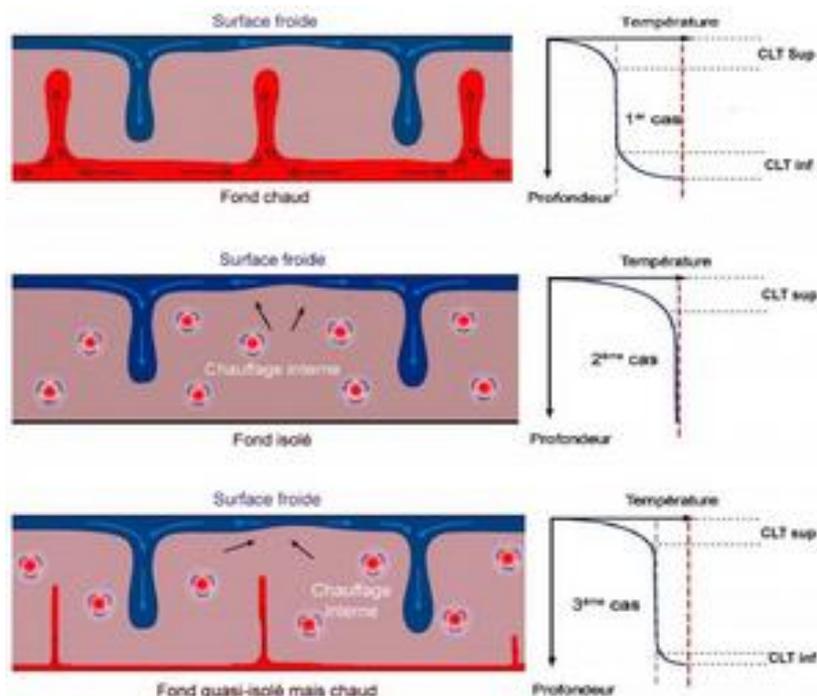
Dans un système refroidi par le haut et chauffé par le bas, il peut donc y avoir convection (la casserole d'eau froide posée sur une plaque chauffante), ou simplement conduction (la brique froide posée sur le feu). Quels paramètres commandent un mode de transfert de la chaleur plutôt qu'un autre ? Ce problème a été formalisé par Lord Rayleigh en 1916. Le moteur de la convection thermique est la poussée d'Archimède, due à la différence de masse volumique $\Delta\rho$ entre deux zones d'un même système. Le $\Delta\rho$ d'un système dépend de l'écart de température ΔT et du coefficient de dilatation thermique α . La poussée d'Archimède dépend de l'accélération de la pesanteur g et de $\Delta\rho$; elle dépend en fait du produit $\Delta T \cdot \alpha \cdot g$. Deux paramètres physiques vont s'opposer à la convection thermique : la viscosité cinématique ν qui s'oppose aux mouvements, et la diffusivité thermique κ qui limite les écarts de température. Plus un corps est visqueux, moins il se déformera. Et plus un corps a une diffusivité thermique élevée, moins il pourra s'établir de gradients de température et de masse volumique importants car la diffusion de chaleur par conduction limitera les écarts de température. On peut aussi montrer que la hauteur h d'un système favorise la convection : plus un système est mince, mieux la chaleur s'évacue par conduction ; plus il est épais, plus les mouvements de convection « ont de la place » pour s'établir. Rayleigh a montré que

la « convectabilité » d'un système dépend de ces 6 facteurs : α , ΔT , g , h , κ et ν . Il a montré qu'elle dépendait du rapport $Ra = \alpha \Delta T g h^3 / \kappa \nu$. Ce rapport est appelé depuis **nombre de Rayleigh** (Ra). Si ce nombre de Rayleigh est inférieur à une valeur critique voisine de 10^3 , il n'y a pas de convection thermique mais seulement de la conduction ; si ce nombre est supérieur à cette valeur critique, il y a convection.

Que se passe-t-il dans un système convectif avec une source de froid en haut, une source de chaleur en bas et un $Ra > 10^3$? Imaginons un réservoir rempli d'eau, avec une plaque métallique refroidie en haut et une plaque métallique chauffante en bas. L'eau au contact de la plaque froide supérieure se refroidit par simple conduction, et il s'établit une mince couche d'eau froide en haut, contre la plaque froide. Plus cette couche d'eau refroidit, plus elle devient épaisse et dense. Au bout d'un certain temps, elle devient suffisamment dense, et elle plonge vers le bas. Alors, elle perd contact avec la source de froid et reste à température constante tout au long de sa plongée. La situation est exactement symétrique au voisinage de la plaque chaude du bas, avec de l'eau qui se réchauffe par conduction au contact de la plaque chaude, devient moins dense, et se met à monter en restant alors à température constante. Si on mesure la température en fonction de la profondeur, on constate qu'elle varie très rapidement dans les minces couches qui se refroidissent ou se réchauffent (par conduction) au contact des plaques métalliques supérieure et inférieure. Dans ces minces couches d'eau froide ou chaude, il y a un fort gradient thermique, dit **conductif**. Ces deux couches minces qui échangent de la chaleur par conduction avec l'extérieur et qui se mettent en mouvement à cause des différences de masse volumique sont dites **couches limites thermiques (CLT)**. Elles font bien sûr partie des cellules de convection, elles en sont le « moteur ». Dans le cœur de la cellule, entre les deux CLT, la matière se déplace « passivement », entraînée par les mouvements des CLT, sans recevoir ou perdre de chaleur. C'est pourquoi la température est quasiment constante entre les deux CLT. Elle n'est pas tout à fait constante cependant, car la matière qui descend se comprime, donc sa température augmente légèrement ; et la matière qui monte se décomprime, et sa température diminue légèrement. Cette légère variation de température interne (hors des CLT) due à ces phénomènes de variations de pression entraîne un très faible gradient thermique de bas en haut, dit **gradient adiabatique** ou plus exactement *isentropique*.

Il existe un deuxième cas possible de convection thermique, avec un refroidissement par le haut, mais avec une production et/ou libération de chaleur diffuse et homogène dans toute la masse du système, et non pas un apport par le bas. Dans ce cas, la couche supérieure se refroidit par conduction, devient plus dense, et va plonger activement sous forme de panaches descendants. Par contre il n'y a pas, ni en bas ni au centre de la cellule de gradients de température et de masse volumique. Il n'y a donc pas de CLT inférieure, pas de mouvements ascendants actifs, mais seulement passifs, qui remontent pour remplacer la matière froide qui descend. Toutes les possibilités intermédiaires peuvent exister, entre chauffage exclusivement par le bas ou exclusivement dans la masse. Si par exemple, avec une surface supérieure froide, la majorité de l'énergie est libérée dans la masse et qu'une minorité seulement provient du fond chaud, l'essentiel des mouvements ascendants seront passifs, et compenseront les mouvements descendants actifs. Mais simultanément, quelques panaches ascendants actifs pourront provenir de la surface inférieure chaude.

Figure 2. Représentation très schématique de 3 types de convection thermique



Dans le 1^{er} cas, le milieu est refroidi par le haut et chauffé par le bas. Le haut plus dense car refroidi plonge activement ; le bas, moins dense car réchauffé monte activement. Les couches supérieure froide et inférieure chaude sont appelées couches limites thermiques (CLT) supérieure et inférieure. Entre ces 2 CLT, il n'y a que très peu de mouvements et une température quasi constante.

Dans le 2^{ème} cas, il n'y a pas de source de chaleur inférieure, mais production de chaleur dans la masse (figurée par ces petits « soleils »). Le haut plus dense car refroidi plonge activement ; le bas n'a aucune raison de remonter, si ce n'est passivement, pour compenser les mouvements descendants. Il y a alors une CLT supérieure, mais pas de CLT inférieure.

Le 3^{ème} cas est intermédiaire. .../...c'est celui qui se rapproche le plus de la Terre.

Pierre Thomas

Laboratoire de Sciences de la Terre, ENS de Lyon

Autres sources :

MODELE ANALOGIQUE : CONVECTION THERMIQUE DANS UN FLUIDE PAR OMBROSCOPIE ([HTTP://PLANET-TERRE.ENS-LYON.FR/PLANETTERRE/XML/DB/PLANETTERRE/METADATA/LOM-MODELISATION-PAR-OMBROSCOPIE.XML](http://planetterre.ens-lyon.fr/planetterre/xml/db/planetterre/metadata/LOM-modelisation-par-ombroscopie.xml))