



Convection thermique (n°1) – Introduction et mise en évidence

Introduction :

Observons cette main : elle transmet de l'énergie thermique vers l'air ambiant par conduction. Puis, l'air chauffé se dilate. Il s'élève et est remplacé par de l'air plus froid, qui s'échauffe et s'élève à son tour ...

Ce transfert de chaleur qui s'accompagne d'un transport de matière, ici, l'air, est appelé convection thermique. C'est à ce phénomène que nous allons maintenant nous intéresser, après avoir présenté, dans les vidéos précédentes de « La physique animée », la conduction thermique.

La convection thermique est un mode de transfert thermique très courant dans la nature et dans la vie de tous les jours : on peut citer notamment les mouvements d'air au-dessus des radiateurs qui permettent de chauffer la pièce d'une maison ou les mouvements d'eau dans une casserole chauffée.

On peut évoquer également les parapentes et les planeurs qui utilisent les courants ascendants et descendants qui se créent dans l'atmosphère terrestre.

Nous allons, dans cette première vidéo de la collection « La physique animée » consacrée à la convection thermique, présenter différentes expériences illustrant ce transfert. Nous définirons également le nombre de Rayleigh qui nous permet de savoir quel est le transfert prépondérant entre la convection et la conduction.

--

La convection thermique est le transport de chaleur par un fluide.

Nous proposons de mettre en évidence, très facilement, le phénomène de convection à l'aide d'un manège à bougie. Lorsque l'air est au repos et uniformément à la même température autour de l'hélice, il n'y a pas de mouvement de fluide, l'hélice reste immobile. Lorsqu'on allume la bougie, la différence de température de l'air, autour de la flamme et dans la pièce, induit des mouvements de l'air qui mettent en rotation l'hélice.

Nous pouvons aussi nous amuser à reproduire l'expérience des frères Montgolfier à l'aide d'un grille-pain et d'un sachet.

L'air chauffé par le grille-pain a une masse volumique plus faible que celle de l'air de la pièce. Du fait de la poussée d'Archimède, cet air chaud se met à monter faisant s'élever le sachet.

Lorsque l'on fait chauffer de l'eau sur le feu, la source de chaleur se trouve au-dessous de la casserole. Lorsque la partie de l'eau la plus basse et donc la plus proche de la source de chaleur, s'échauffe, sa masse volumique diminue et elle s'élève.

C'est pour cette raison que les bulles, constituées de vapeur d'eau, se forment au fond de la casserole et remontent.



De la même manière, plaçons dans un aquarium rempli d'eau à température ambiante, un flacon contenant de l'eau froide colorée en bleu et un flacon contenant de l'eau chaude colorée en rouge.

On observe que l'eau chaude quitte son contenant alors qu'il n'y a pas de mouvements de l'eau froide. L'eau chaude vient se placer au-dessus de l'eau à température ambiante. L'eau teintée en bleu, de température plus basse que l'eau de l'aquarium, reste confinée dans son flacon.

Continuons avec une autre expérience très visuelle, on vient remplir un verre avec de l'eau chaude colorée en jaune et un autre verre avec de l'eau froide colorée en bleu. Nous renversons le verre d'eau froide sur le verre contenant l'eau chaude et tout de suite, on observe la couleur verte, l'eau contenue dans les deux verres s'est mélangée. À l'aide d'une caméra de thermographie, on peut constater que la température finale dans les verres est à peu près homogène.

Maintenant reprenons la même configuration initiale avec de l'eau froide colorée en bleu et de l'eau chaude colorée en jaune, mais cette fois on vient renverser le verre d'eau chaude au-dessus de celui contenant l'eau froide.

Cette fois-ci, pas de mélange ! On observe que l'eau chaude reste au-dessus, elle est plus légère que l'eau froide située au-dessous.

Si l'on regarde le système à la caméra de thermographie, à l'aide de la barre indiquant la valeur de la température sur la droite de l'image, on constate bien que l'eau de température plus élevée, codée en couleur jaune est située au-dessus de l'eau dont la température est plus basse, codée avec la couleur bleu foncé.

Pour tous ces exemples, on parle de convection naturelle, car le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masses volumiques résultant des différences de températures.

On parle de convection forcée lorsque le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température.

Dans cette tasse de thé chaud, lorsqu'on déplace le fluide pour le refroidir, à l'aide d'une petite cuillère du bas vers la surface et les bords de la tasse, c'est bien un exemple de convection forcée.

Le moteur de la convection naturelle est bien la poussée d'Archimède : un volume donné de fluide chauffé à la base devient moins dense du fait de sa dilatation thermique et monte sous l'action de la poussée d'Archimède. Cette petite quantité de fluide se refroidit en échangeant de l'énergie thermique lors de sa montée et finalement redescend.

--

Pour illustrer l'importance de la poussée d'Archimède, prenons maintenant l'exemple d'une montgolfière.

La pression atmosphérique diminue avec l'altitude z . Les forces de pressions sont plus importantes à la base de la montgolfière qu'au-dessus. La poussée d'Archimède, somme



de toutes ces forces est dirigée vers le haut et égale au poids du volume d'air extérieur déplacé.

Soit, en notant V_0 le volume constant de l'enveloppe et en considérant l'air comme un gaz parfait :

$$\vec{F}_{Arch} = -\frac{P_{air} M_{air}}{RT_{air}} V_0 \vec{g}$$

La pression à l'intérieur de l'enveloppe indéformable et ouverte est égale à la pression extérieure. l'air, chauffé dans le ballon a une température, supérieure à la température extérieure.

la montgolfière est soumise à la force totale :

$$\vec{F} = m\vec{g} + \frac{P_{air} M_{air}}{RT_{env}} V_0 \vec{g} - \frac{P_{air} M_{air}}{RT_{air}} V_0 \vec{g} + \vec{f}_{frottements}$$

Soit :

$$\vec{F} = m\vec{g} + \frac{P_{air} M_{air}}{R} V_0 \left(\frac{1}{T_{env}} - \frac{1}{T_{air}} \right) \vec{g} + \vec{f}_{frottements}$$

La force ascensionnelle qui s'exerce sur la montgolfière est donc :

$$\vec{F}_{asc} = \frac{P_{air} M_{air}}{R} V_0 \left(\frac{1}{T_{env}} - \frac{1}{T_{air}} \right) \vec{g} = \frac{P_{air} M_{air}}{R} V_0 \left(\frac{1}{T_{air}} - \frac{1}{T_{env}} \right) \vec{u}_z$$

C'est bien la poussée d'Archimède, plus importante que le poids de l'air qui est devenu moins dense du fait du chauffage dans l'enveloppe, qui explique l'ascension de la montgolfière.

Cette force ascensionnelle est ainsi bien dirigée vers le haut. Elle dépend notamment de la pression atmosphérique et diminue donc avec l'altitude.

--

La convection permet par exemple d'interpréter la formation des courants atmosphériques ascendants et descendants.

Revenons au laboratoire afin de mettre en évidence des courants de circulation créés par la convection.

Prenons deux récipients reliés par deux tuyaux. On remplit simultanément les deux récipients avec, de l'eau chaude colorée en jaune, et de l'eau froide colorée en bleu. On observe un déplacement des masses d'eau dû à leur masse volumique. Rapidement, le tuyau du haut laisse apparaître la circulation de l'eau chaude teintée en jaune alors que l'eau froide, plus dense emprunte le tuyau du bas.

Il n'y a ensuite plus de mouvements lorsque le fluide est stratifié selon sa densité. Ce que l'on retrouve à la caméra de thermographie.

Il est aussi intéressant de comparer l'efficacité des échanges thermiques par conduction et par convection. On a placé deux sondes de température S1 et S2, à deux altitudes différentes dans un récipient rempli d'eau à température ambiante.

On branche un thermoplongeur, c'est-à-dire une grosse résistance qui va venir chauffer le liquide. Le thermoplongeur est dans un premier temps placé proche de la surface de l'eau.



On observe que la température de la sonde placée en haut, proche du thermoplongeur, s'élève, alors que la sonde du bas indique que la température de l'eau à cet endroit de l'aquarium ne change pas.

Le transfert thermique a lieu principalement par conduction. L'eau chaude, plus légère, reste en hauteur. Le chauffage par le thermoplongeur n'a aucun effet pour le liquide situé en bas de l'aquarium.

Maintenant nous plaçons le thermoplongeur dans le bas du récipient.

La température commence à s'élever sur la sonde placée en haut puis au bout d'un certain temps, la température s'élève aussi sur la sonde du bas.

Les courants de convection, favorisent les échanges thermiques et uniformisent la température au sein de l'aquarium.

Nous noterons justement que c'est pour cette raison que la résistance est placée en bas dans les bouilloires électriques, ou que le chauffage par le sol dans une maison est un dispositif optimal. De la même manière un climatiseur sera beaucoup plus efficace placé en hauteur dans une pièce.

Maintenant, nous proposons ici de visualiser le seuil entre la conduction et la convection.

Pour ce faire, nous avonsensemencé de l'huile de silicone avec de la poudre de mica teintée en bleu dans un cristallisoir que l'on vient placer sur une plaque chauffante.

La poudre de mica est utilisée ici comme marqueur des mouvements de fluide. Le phénomène observé serait le même mais plus difficilement discernable si elle n'était pas ajoutée.

Par conduction la plaque chauffante transfère de l'énergie thermique au cristallisoir puis au fluide. Au-delà d'un certain seuil, la poussée d'Archimède devient suffisamment importante pour enclencher des mouvements ascendants et descendants de convection.

On voit apparaître des motifs, appelées cellules de Rayleigh-Bénard. Chacune de ces cellules correspond aux mouvements de fluide qui ne se mélange pas avec la cellule d'à côté. Sur ce détail d'image, on observe que le fluide « sort » de la cellule par son centre pour redescendre sur les côtés. Cette poussière noire nous aide à bien suivre le mouvement.

--

Ces deux dernières expériences montrent bien que l'énergie thermique peut être transférée selon deux modes. D'une part, la conduction dans le fluide au repos et d'autre part, la convection due aux mouvements du fluide. Une viscosité importante limite les mouvements du fluide et privilégie ainsi la conduction. À l'inverse, un fluide peu visqueux fait apparaître des courants de convection. La frontière entre ces deux régimes dépend également de la différence de température, de l'épaisseur de la couche de fluide, de son coefficient de dilatation et de sa diffusivité thermique.

Le nombre de Rayleigh permet de comparer ces deux régimes. Lord Rayleigh, de son vrai nom John William Strutt, physicien britannique, (né en 1842 et mort en 1919), a reçu le prix Nobel de physique en 1904.



Le nombre de Rayleigh s'exprime sous la forme :

$$R_a = \frac{\alpha \Delta T g L^3}{\nu D_{th}}$$

- α est le coefficient de dilatation thermique, qui traduit l'augmentation relative de volume avec la température
- ΔT est l'écart de température au sein du fluide, sur une longueur caractéristique L , ici l'épaisseur du fluide
- g est l'accélération de la pesanteur
- ν est la viscosité cinématique
- D est la diffusivité thermique

Ainsi, pour un grand nombre de Rayleigh, les transferts thermiques dans le milieu considéré seront convectifs, alors que pour un plus faible nombre de Rayleigh, c'est la conduction thermique qui sera prépondérante. La limite entre les deux régimes se trouve pour un nombre de Rayleigh de l'ordre de 2 000.

Avec une couche d'huile de silicone, de quelques millimètres d'épaisseur et une différence de température d'environ 70°C, le nombre de Rayleigh est de l'ordre de 4 000. On peut dire que la convection l'emporte sur la conduction.

Et savez-vous qu'il y a de la convection dans les roches terrestres, à l'état solide ?

En effet, les conditions de pression, de température et de viscosité varient fortement en fonction de la profondeur. Dans la lithosphère le transfert thermique s'effectue par conduction alors qu'en-dessous, le manteau est convectif.

Les géophysiciens ont pu calculer le nombre de Rayleigh dans ce manteau convectif, il est de l'ordre de 10^6 à 10^8 . La vitesse des mouvements de convection est de l'ordre de grandeur du centimètre jusqu'au décimètre par an.