

Convection



Collection de l'Atelier d'exploration

Conception

P. Bastide, A. Billet, J. Deléglise,

C. Lhénoret, E. Dhelin, M. Bouziane

Conseillers scientifiques

J. L. Dufresne, J. Y. Grandpeix, A. Lahellec,

Équipe Ramses, LMD, CNRS

M. Perrier,

Centre national de recherche météorologique,

GMEI, Toulouse

. Contenu scientifique

Processus de convection

Les cellules convectives

Phénomènes de brise de terre et de brise de mer

2. Description de la manipulation

3. Exploitation pédagogique

Convection et stabilité de l'environnement

Formation des nuages convectifs d'orages et d'averses
les cumulonimbus

Inversion de température des basses couches
de l'atmosphère et pollution

Convection et courants dans les mers et les océans

Circulation atmosphérique planétaire

Utilisation de la convection dans la vie courante

Introduction

La convection est un mode de transfert d'énergie familier et méconnu. On la décrit comme la « chaleur qui monte », ce qui est inexact car ce n'est pas la chaleur qui monte mais le fluide chauffé par le bas et refroidi par le haut. Notons que « la chaleur peut descendre » dans le cas du rayonnement, ou de la conduction. La chaleur n'est pas une substance comme on l'a cru pendant longtemps, mais une forme d'énergie, parmi d'autres, au sein des substances. Si le transfert de chaleur peut être défini comme une transmission d'énergie d'une zone à une autre par différence de température entre ces zones, la convection, par rapport aux autres modes de transmission de chaleur (conduction, rayonnement), dépend aussi du mécanisme de transfert de masse. C'est un phénomène complexe dont l'élaboration de la notion par Hadley et Lomonossov remonte au XVIII^e siècle pour expliquer les grands mouvements atmosphériques.

Des trois modes de transfert thermique (conduction, rayonnement, convection) l'étude scientifique de la convection est la plus récente. Les travaux scientifiques systématiques ont commencé au début du siècle avec les expériences de Henri Bénard (1905) et les analyses théoriques de Lord Rayleigh (1916). Et aujourd'hui, ils étudient surtout les mécanismes d'instabilité (chaos, turbulences) dans les phénomènes convectifs. Dans le bilan thermique global et moyen du système surface de la terre-atmosphère, la convection a une influence assez faible, de l'ordre de 10 %, soit en moyenne 15 W/m², alors que la terre réchauffe l'atmosphère par rayonnement infrarouge avec un flux moyen de 60 W/m² et par évaporation-condensation avec un flux moyen de 85 W/m². En revanche, elle est le principal moteur de la circulation des masses d'air, et de ce fait elle intervient dans la répartition des énergies, des vents et des climats. Dans l'atmosphère terrestre, on observe des phénomènes convectifs à différentes échelles. Les différences de températures entre les tropiques (source chaude) et les pôles (source froide) produisent une circulation générale qui véhicule la chaleur des zones bénéficiaires en énergie solaire vers celles qui sont déficitaires. Le transfert de chaleur est assuré à long terme par les courants marins mais surtout plus rapidement par les déplacements de masses d'air que l'on décompose en trois grandes cellules convectives méridiennes dans chaque hémisphère :

- aux basses latitudes (cellule de Hadley), le transfert de chaleur est dû principalement à la circulation méridienne de la cellule tropicale.

- aux latitudes moyennes et élevées, on pense que c'est la perturbation du front polaire qui joue un rôle essentiel dans le transfert de chaleur. La combinaison de ces éléments de circulation méridienne a pour effet de réduire les différences de température Nord Sud qui en sont la source. La déformation de cet ensemble de cellules, provoquée par la rotation de la terre, donne naissance dans les basses couches de l'atmosphère aux vents alizés des tropiques (vent d'est) et aux vents d'ouest dominants dans les zones tempérées. Le réchauffement local de l'atmosphère engendre des écoulements convectifs de moindre échelle comme les nuages convectifs, les courants ascendants, ainsi que les phénomènes liés au cycle circadien : les brises de terre, les brises de mer, brises solaires, vents des monts. À grande échelle, ces déplacements s'accompagnent de phénomènes thermodynamiques liés à la compressibilité de l'air. Lorsqu'il passe dans une zone de pression plus élevée, l'air se réchauffe par compression. Inversement, il se refroidit lorsqu'il se détend. La viscosité, la condensation et l'évaporation de l'eau, ainsi que d'autres facteurs comme la rugosité du sol ou le relief compliquent les circulations des masses d'air. En résumé, l'atmosphère est le siège de phénomènes convectifs, radiatifs, thermodynamiques et convectifs couplés, et cela à toutes les échelles. On s'attache ici à la mise en évidence du principe de base à une échelle locale observable par un promeneur côtier.

La manipulation « Convection » utilise une cuve d'eau où l'on crée une boucle convective qui simule un phénomène local comme la brise de mer. À cause de l'inertie thermique, il n'est pas possible d'alterner le cycle brise de terre et brise de mer. Pour la même raison, l'interactivité est limitée. Le visiteur est invité à regarder les déplacements de l'eau, les tourbillons qui se forment (turbulences) et à se rendre compte des transferts de chaleur en comparant les températures données par des thermomètres placés aux quatre coins. Cette manipulation possède un potentiel de communication que nous n'avons pas eu le temps d'explorer, tant sur le plan esthétique que dans le domaine de la communication scientifique et technique.

1. Contenu scientifique

Le problème scientifique est celui de la stabilité de la stratification, potentiellement instable, de couches de fluide possédant des densités variables dans le champ de gravité. L'instabilité apparaît dès qu'une couche froide (donc plus lourde) recouvre une couche plus chaude (donc plus légère). Les mouvements de convection ne se développent que si les particules fluides sont suffisamment accélérées pour vaincre les phénomènes qui s'opposent à leur déplacement.

Processus de convection

Stratification des fluides (fig. 1 a)

On sait que des fluides non miscibles versés ensemble dans une cuve se stratifient, les plus denses au fond et les plus légers au-dessus. Lorsque aucun mouvement n'apparaît plus, l'ensemble fluide est dit convectivement stable.

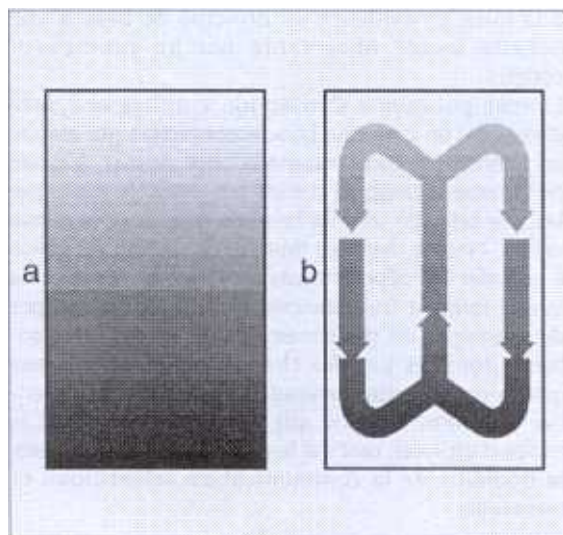
On parle également de stratification d'un seul fluide (dilatable ou compressible) lorsque sa température n'est pas homogène. Ainsi, l'air qui se dilate en chauffant est plus léger chaud que froid. Une cuve

d'eau - à température ambiante - chauffée uniformément par le dessus tend à se stratifier et à devenir convectivement stable. Pour expliquer physiquement cette stabilité, on isole par la pensée une « particule fluide ». Imaginons qu'une action perturbatrice quelconque déplace rapidement vers le haut cette particule de telle sorte qu'elle n'ait pas le temps de se réchauffer par conduction. Comme elle est plus froide que ses voisines, donc plus lourde, elle tend à rejoindre sa place.

Instabilité convective (fig.1 b)

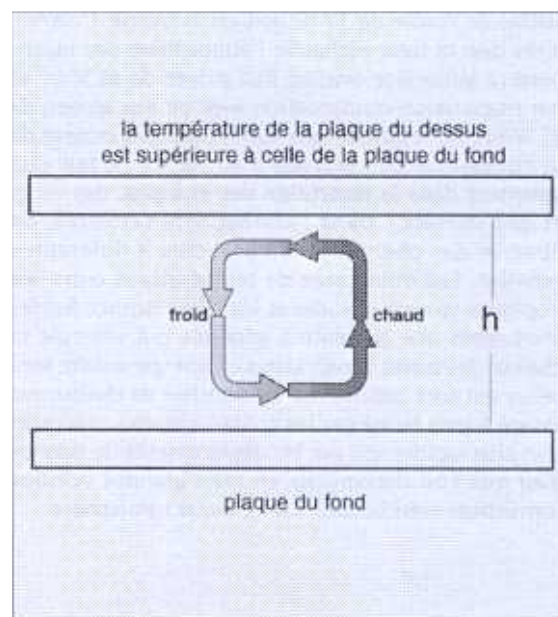
Il en est tout autrement si nous chauffons par le bas une cuve contenant de l'eau, de sorte que la température du fond soit constante et refroidie par la plaque supérieure (fig. 2). La variation de température par unité de hauteur est linéaire et la hauteur h est petite par rapport à la surface de la base pour éviter les effets de bord des plaques verticales (déperditions thermiques et frottement sur ces plaques). Avec cette hypothèse, la chaleur apportée par le chauffage s'échappe essentiellement par la face supérieure. Analysons, au niveau du fond de la cuve, le processus de transfert de chaleur de la surface chaude au fluide plus froid.

Figure 1



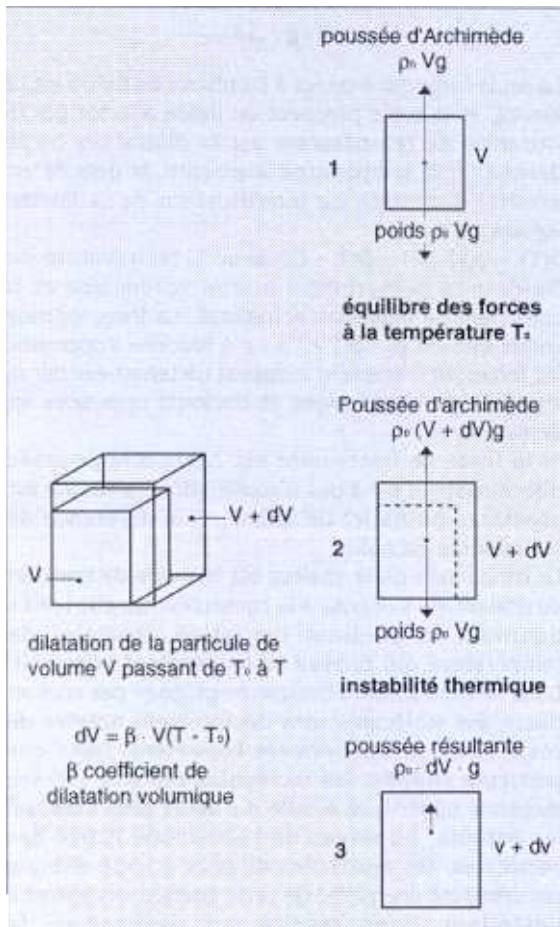
Dans la cuve a, le fluide est dans un état stratifié convectivement stable sans aucun mouvement. Dans la cuve b, le fluide en mouvement est convectivement instable.

Figure 2



Cuve de convection.

Figure 3



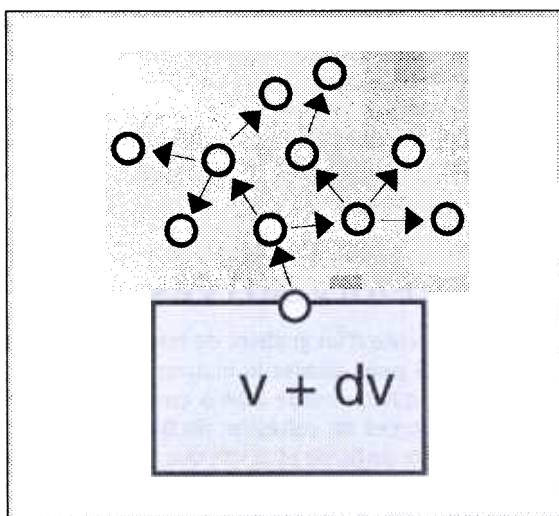
Dilatation d'une particule.

Les particules du fluide se réchauffent par contact au niveau de la surface. Puis, par conduction, elles réchauffent les particules des zones plus froides qui sont à leur contact immédiat. Il en résulte que la température de ces particules augmente. Elles se dilatent et leurs densités diminuent (pour une même masse, le volume est plus grand). Enfin, dans le cas où les particules des zones adjacentes seraient plus froides donc plus denses, elles exercent une poussée d'Archimède dirigée vers le haut qui fait s'élever les particules chaudes. La force ascendante est proportionnelle à la différence de densité et au volume de la particule.

Il en résulte qu'un déplacement initial du fluide dans la zone chaude crée des forces qui amplifient le mouvement ascendant lorsque la particule arrive dans les zones de plus en plus froides et denses. Comme la particule se refroidit pendant son trajet, le mouvement convectif modifie la répartition des températures qui, en retour, modifie la force qui produit ce mouvement. Autrement dit, la force qui produit le mouvement est modifiée par le mouvement lui-même.

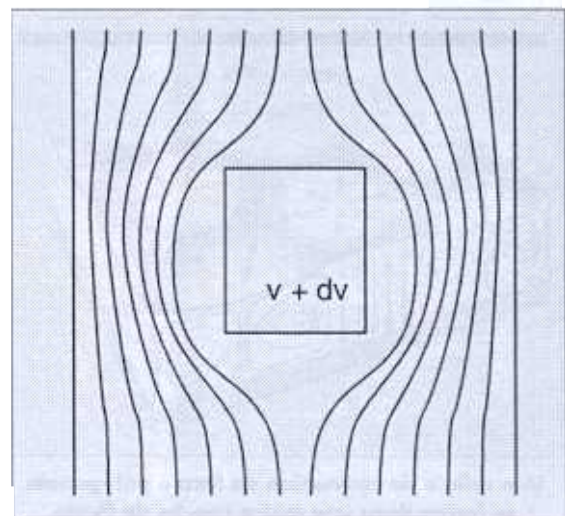
Les particules chaudes s'élèvent, elles sont remplacées par celles qui descendent des zones froides. En se déplaçant vers le bas, les particules froides plus lourdes pénètrent dans des zones de plus faible densité. Elles ont tendance à s'enfoncer, ce qui amplifie les courants ascendants. Ainsi se créent des cellules convectives. Lorsque les mouvements convectifs sont dus uniquement aux différences de densité résultant des gradients de température sans l'aide d'une pompe ou d'un ventilateur, la convection est dite naturelle (par opposition à la convection forcée).

Figure 4



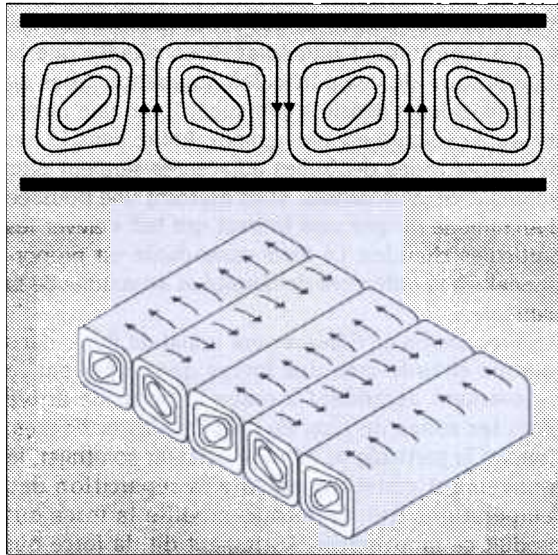
Conduction (ou diffusion) : l'agitation moléculaire se transmet par contact. On peut donc obtenir l'homogénéisation de la température.

Figure 5



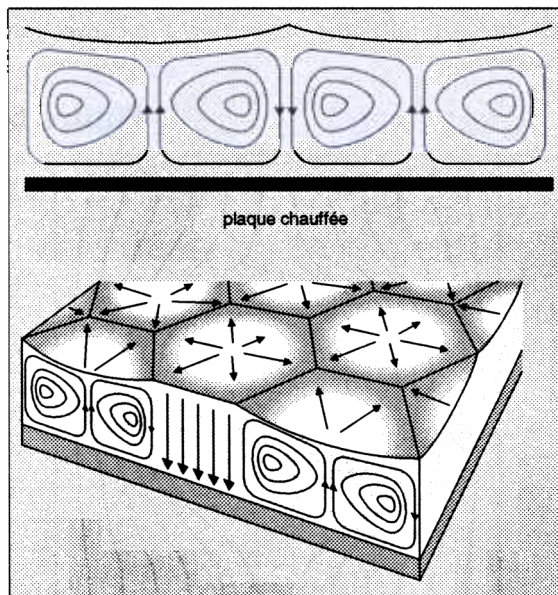
La particule s'élève si la poussée d'Archimède est supérieure aux forces visqueuses et si sa vitesse de déplacement est plus grande que celle de la diffusion de la chaleur.

Figure 6



Lorsque le transfert de chaleur se fait par convection entre deux plaques dont la température de celle du fond est supérieure à celle du dessus, on obtient des cellules en forme de rouleaux. Le module élémentaire est formé de deux rouleaux qui tournent en sens opposé. La largeur de ce module est égale à deux fois la hauteur de la couche fluide.

Figure 7



Une cellule de convection de forme polygonale se forme dans une mince couche de fluide chauffée par le bas. Les cellules prennent d'abord des formes de rouleaux puis elles deviennent polygonales et prennent enfin la forme d'hexagones réguliers.

Comment se produit l'instabilité ?

(fig. 3)

La seule force qui s'exerce à l'intérieur du fluide est la gravité, et la seule propriété du fluide affectée par la variation de température est la dilatation ou la densité (si la température augmente, la densité en général diminue). La modification de la masse volumique est :

$\rho(T) = \rho_0(T_0) (1 - \beta(T - T_0))$ avec T_0 température du fluide non perturbée, ρ masse volumique et β coefficient de dilatation volumique. La force motrice volumique est $\rho_0 \cdot \beta(T - T_0) \cdot g$ à laquelle s'opposent les forces de frottement visqueux (déterminées par la viscosité de cisaillement et toujours opposées au déplacement).

Si la force de frottement est égale à la poussée d'Archimède, il n'y a pas d'accélération, la vitesse est constante ou nulle. De même, si la différence de température est nulle.

La conduction de la chaleur est le mode de transfert de chaleur qui s'oppose à la convection car elle tend à diminuer le gradient (variation spatiale) de température qui produit le mouvement convectif. Dans la conduction, l'énergie se propage par contact direct des molécules sans déplacement notable de ces molécules (mouvement brownien). Dans une particule chaude, les molécules ont une vitesse moyenne supérieure à celle du fluide plus froid qui les entoure. Au niveau de l'enveloppe fictive des particules, les molécules de plus grande énergie transmettent une partie de cette énergie aux autres à l'extérieur. Il en résulte une égalisation de température entre les zones chaudes et froides. L'homogénéisation de la température tend à annuler la poussée d'Archimède. Le temps nécessaire pour qu'une particule se mette en équilibre avec son environnement dépend de la diffusivité thermique du fluide. Si le fluide ne se déplace pas plus vite qu'il ne perd de la chaleur par diffusion, l'écoulement convectif n'est pas entretenu : la chaleur transmise par la plaque du fond est transportée par conduction sans mouvement du fluide.

Les cellules convectives

La seule existence d'un gradient de température n'est pas suffisante pour assurer le mouvement convectif. La poussée d'Archimède due à ce gradient doit rompre des forces de cohésion du fluide au repos, vaincre l'inertie du fluide plus vite que la réduction de ce gradient par la conductivité thermique. Le mouvement convectif démarre à partir d'un seuil critique, puis l'instabilité convective se maintient tant que les conditions restent au-delà du seuil critique. Dans ces conditions, le fluide chaud s'élève du fond de la cuve (chauffée d'une façon homogène) et le

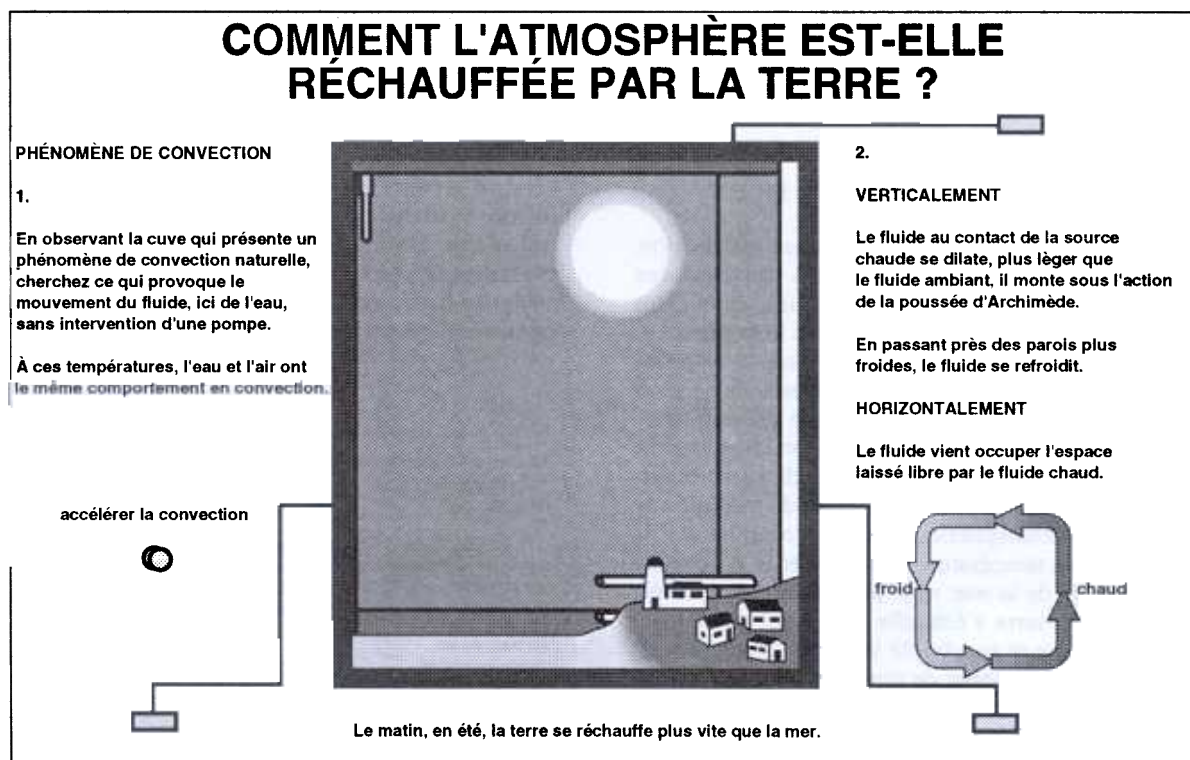
2. Description de la manipulation

La manipulation « Convection » est constituée d'une cuve d'eau dont la face avant est transparente. La cellule convective est produite par le réchauffement de l'eau à l'aide de deux résistances électriques et son refroidissement (par convection forcée) est obtenu par des ventilateurs. Les phénomènes thermiques de convection sont déterminés par la forme et les dimensions de la cuve. On a choisi l'eau car elle possède un comportement semblable à celui de l'air et elle facilite la visualisation. On l'utilise en aérodynamique et en thermique pour simuler les écoulements de l'air ou les transports de chaleur. Nous n'avons pas utilisé l'éclairage laser, difficile à mettre en œuvre dans une exposition pour des raisons de sécurité. Notre nappe lumineuse, dont les bords sont plus ou moins coniques selon l'angle d'éclairage des lampes halogènes, est réalisée à l'aide d'une rampe. L'interactivité, limitée par l'inertie thermique, se réduit à l'éclairage d'une lampe figurant le soleil et à l'alimentation d'une résistance électrique qui accélère la convection en appuyant sur

le bouton-poussoir. La mise en scène d'un bord de mer montre qu'il s'agit d'une brise de mer. La mise au point de la manipulation passe par la résolution des problèmes suivants.

- L'épaisseur de la cuve doit être suffisamment importante pour éviter les effets de freinage par les surfaces verticales avant et arrière.
- Les poudres, permettant la visualisation des écoulements convectifs, doivent avoir une vitesse de sédimentation très faible, c'est-à-dire que leur densité doit être proche de celle de l'eau. Elles doivent scintiller à la lumière, ne pas s'agglomérer et ne pas adhérer aux surfaces. Nous avons placé une pompe pour remettre, d'heure en heure, la poudre en suspension dans l'eau distillée (additionnée d'eau de javel). Comme la poudre sédimente en quatre heures et a tendance à s'agglomérer, la solution la plus intéressante est d'injecter un peu de poudre en appuyant sur un bouton de manière à visualiser le processus, ce qui produit un dépôt dans le fond de la cuve qu'il faut nettoyer régulièrement. Le volume au

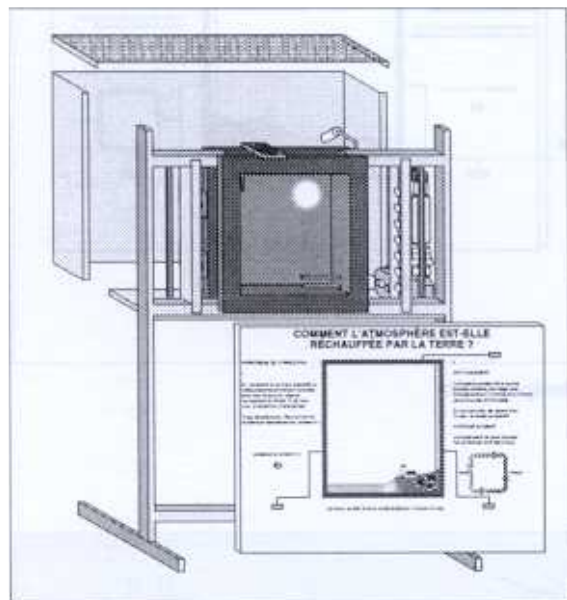
Figure 11



Manipulation « Convection », panneau frontal.

fond de la cuve doit être prévu assez grand pour éviter des nettoyages trop fréquents (effectués à l'aide d'une pompe et d'un bac de décantation). Les pigments utilisés sont constitués de minces plaquettes petites et plates, de diamètre relativement grand et aux surfaces lisses. Dans un milieu transparent bien éclairé, ces particules possèdent un éclat nacré,

Figure 12



Au cœur de la manipulation.

produit par la réflexion de la lumière. Ces pigments parviennent à donner un aspect métallique sans encourir les désagréments occasionnés par les métaux et alliages. utilisé dans cette manip, l'iriodin est constitué de minces plaquettes de mica recouvertes d'oxyde de titane et d'acier. Il n'est pas toxique et ne présente pas de risque pour l'environnement. L'iriodin 111 nous a été fourni par la société E. Merck. Sa densité est de 3,2 g/cm³ et la taille de ses particules est inférieure à 15 nm.

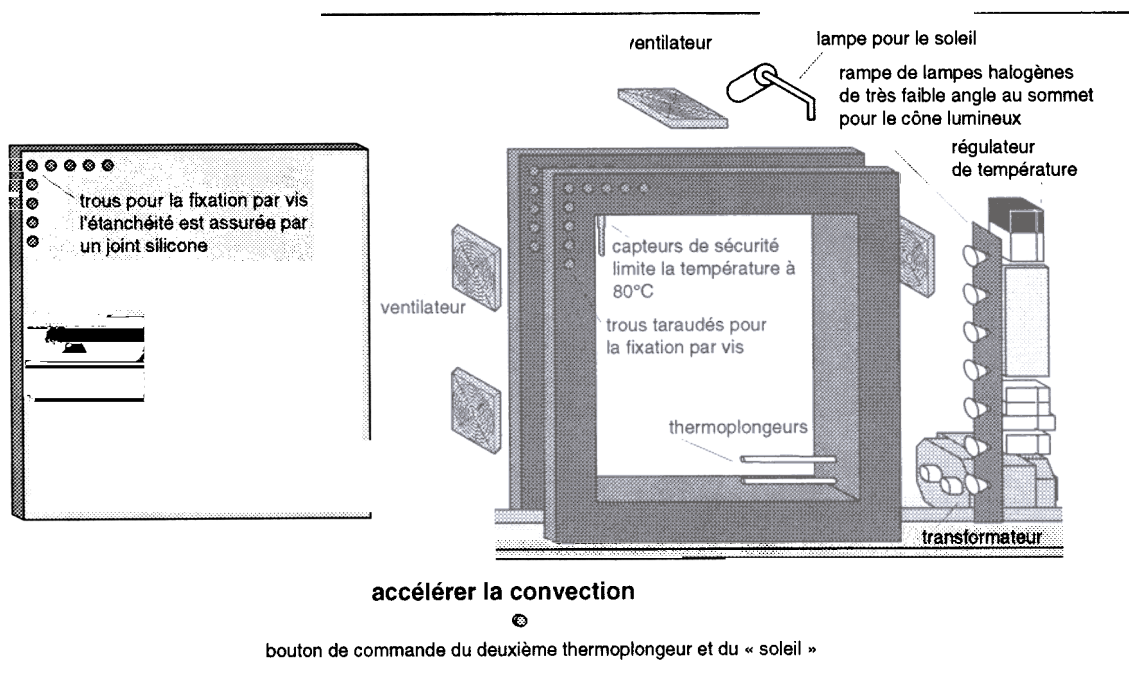
- L'épaisseur de la tranche d'eau est supérieure à 80 mm pour limiter les turbulences dues au frottement de l'eau sur les parois. L'ouverture pour l'éclairage de la tranche centrale de la cuve est réalisée par une rainure dans la partie médiane du profil en alliage léger d'aluminium et on a collé avec du silicone une plaque de verre.

- Le profilé de section en U a 5 mm d'épaisseur, le cadre a été obtenu par soudage et après usinage (perçage des trous taraudés pour les vis de fixation des faces transparentes, pour les capteurs et thermoplongeurs), il a été anodisé en noir.

- La structure est en alliage d'aluminium et les plaques sont en lexan. Un régulateur de température limite la température de l'eau pour qu'elle ne dépasse pas 60 °C dans la zone haute. Sur le côté, on a placé une lumière recouverte d'un verre pour l'éclairage.

- Un autre problème concerne la place disponible pour les éléments informatiques. Il est souhaitable de séparer la partie documentaire de la manipulation proprement dite, afin de ne pas gêner la visualisation de l'écoulement convectif.

Figure 13

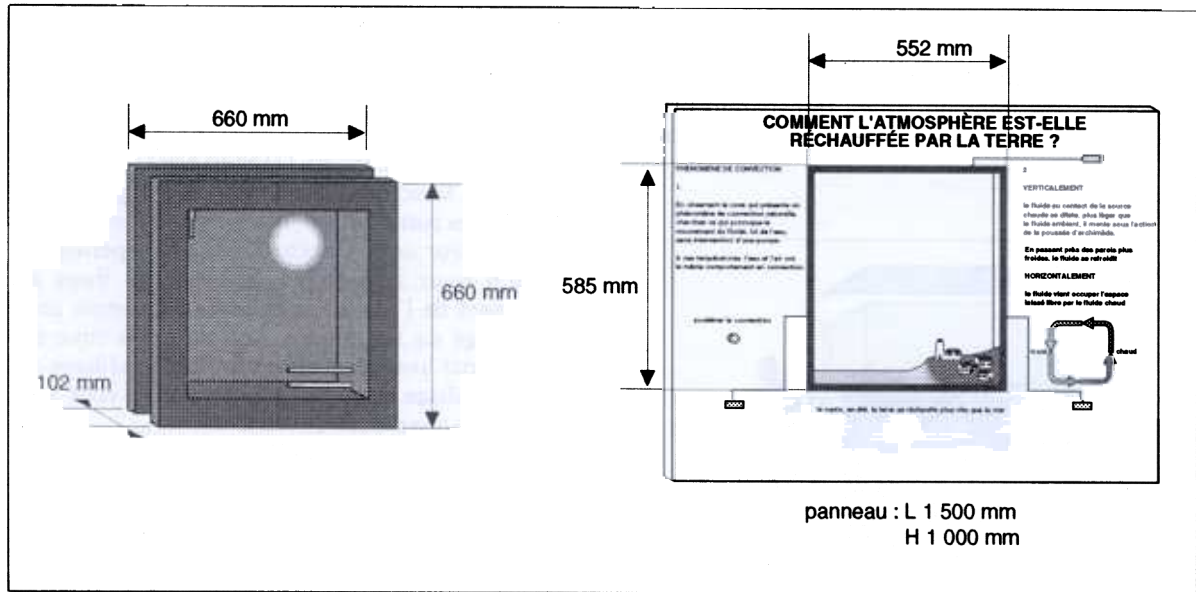


accélérer la convection

bouton de commande du deuxième thermoplongeur et du « soleil »

Principaux constituants de la manipulation.

Figure 14



Dimensions de la manipulation.

Figure 15

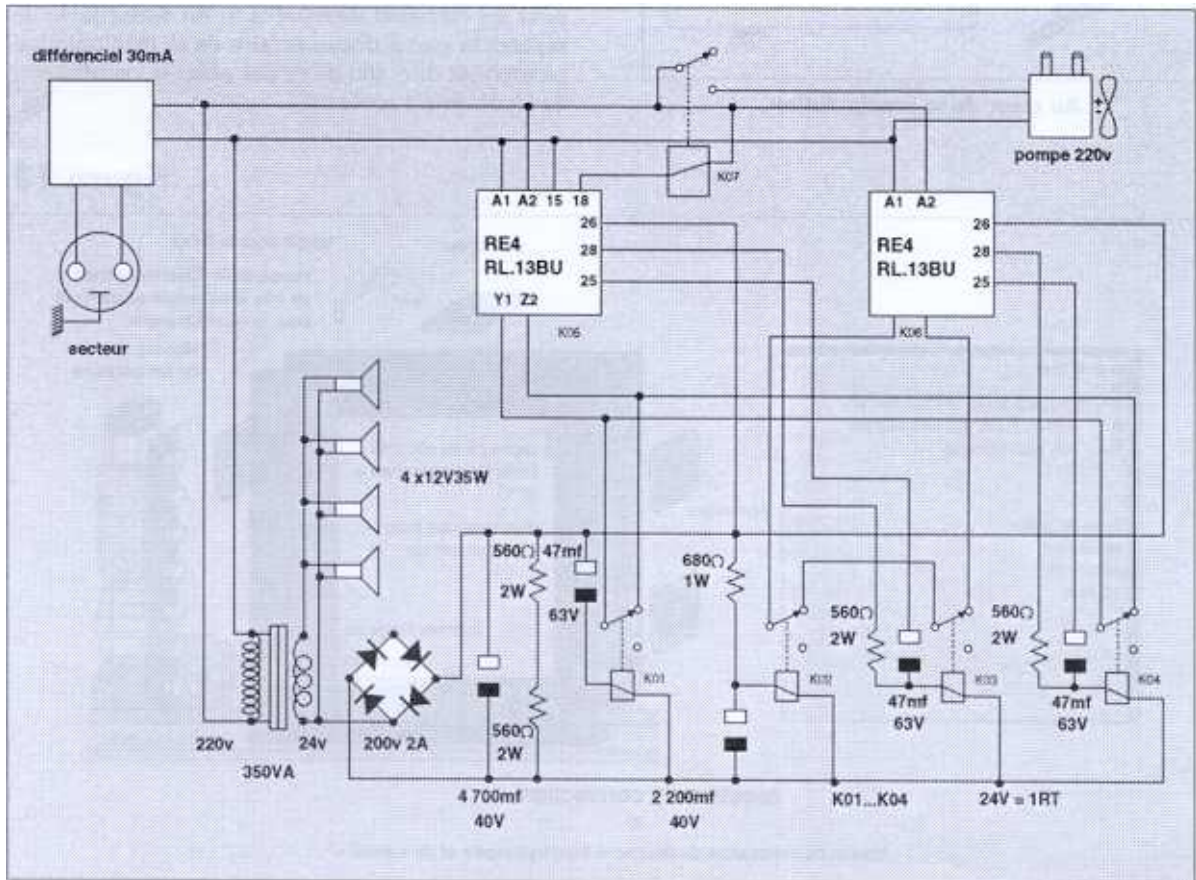


Schéma électrique.

3. Exploitation pédagogique

Convection et stabilité de l'environnement

Une bulle d'air chaud s'élève, mais comme la pression diminue avec l'altitude, la bulle se dilate et, par détente, se refroidit. Considérons un refroidissement suffisamment rapide pour que les échanges de chaleur avec l'air environnant soient négligeables. Pour de grosses bulles, les échanges de chaleur par l'enveloppe sont proportionnels au carré du diamètre, alors que leur volume est proportionnel au cube. La quantité de chaleur échangée est faible par rapport à la quantité de chaleur interne de la bulle. Dans le processus adiabatique de détente, en considérant l'air comme un gaz parfait, la température est en relation avec la pression $T/T_0 = (P/P_0)^{(\gamma - 1)/\gamma}$ avec $\gamma = C_p/C_v$; C_p la capacité thermique à pression constante et C_v la capacité thermique à volume constant. La température diminue de 1 °C chaque fois que la bulle s'élève de 100 m (gradient adiabatique sec). Lorsque la vapeur d'eau devient saturante, toute élévation de la bulle se traduit par une diminution de température et une augmentation de la condensation, mais l'énergie apportée par ce changement de phase diminue la chute de température. En conséquence, le gradient adiabatique saturé est plus faible que le gradient adiabatique sec. Il est de 0,6 °C par 100 m,

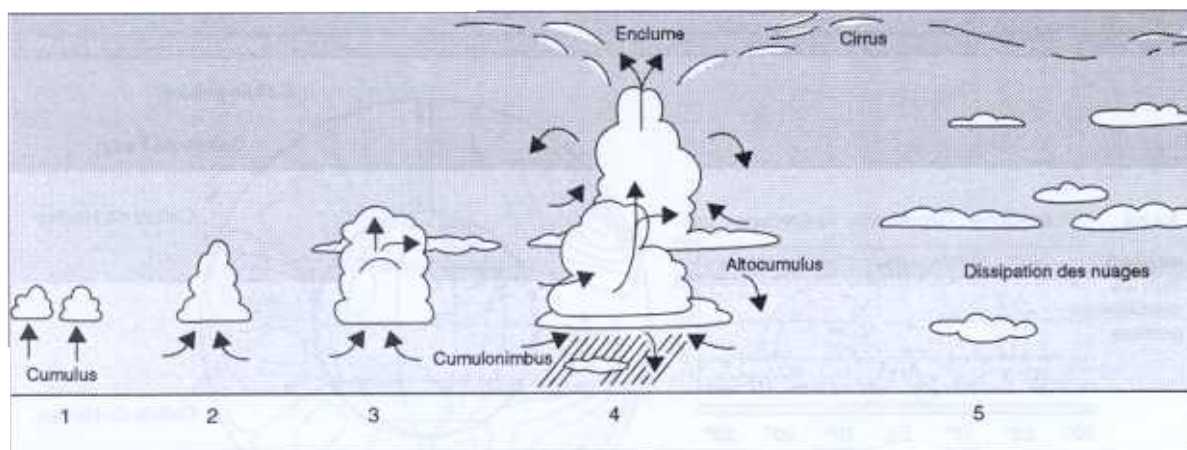
dans la zone comprise entre 1 km et 2 km d'altitude, dont la température moyenne est de l'ordre de 10 °C. La stabilité de l'atmosphère est déterminée par les conditions suivantes.

- Profil instable : si la température de la bulle est supérieure à celle de l'air ambiant, la particule a tendance à continuer son ascension, d'où instabilité.
- Profil stable : si la température de la bulle est inférieure à celle de l'air ambiant, la particule tend à redescendre à son niveau initial, d'où stabilité.
- Profil neutre : si la température de la bulle est égale à celle de l'air ambiant, la particule reste en équilibre, le gradient thermique est celui donné par l'adiabatique sèche ou saturée selon le cas considéré.

Formation des nuages convectifs d'orages et d'averses : les cumulonimbus

Les nuages peuvent prendre naissance dans une masse d'air chaud, instable, humide, surchauffé dans les basses couches par le sol ou par la topographie, ou encore lorsqu'un front chaud, humide et convectivement instable, poussé par la circulation générale des masses d'air, s'élève au-dessus d'un coin de masse d'air froid.

Figure 16

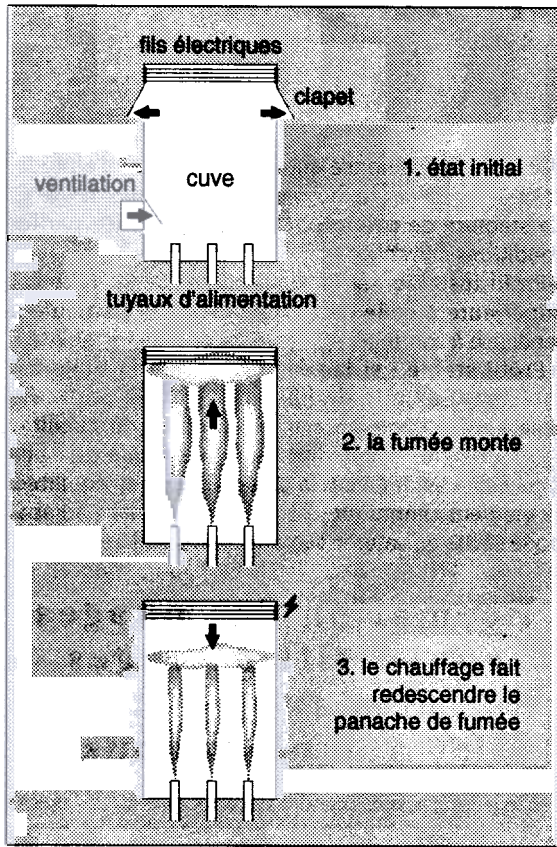


Les différents types de nuages convectifs.

Par beau temps, de petits cumulus se forment dans la matinée et disparaissent ensuite. 1. Des cumulus plus importants apparaissent dans l'après-midi. 2. Ils sont le siège de fortes turbulences internes donnant des averses dès que leur extension verticale atteint une certaine hauteur. 3 et 4. Les cumulonimbus surmontés d'une enclume sont accompagnés de fortes averses de pluie ou de grêle, d'aérosols et de gaz.

Source : d'après *Encyclopédie des sciences industrielles*, Quillet, 1974.

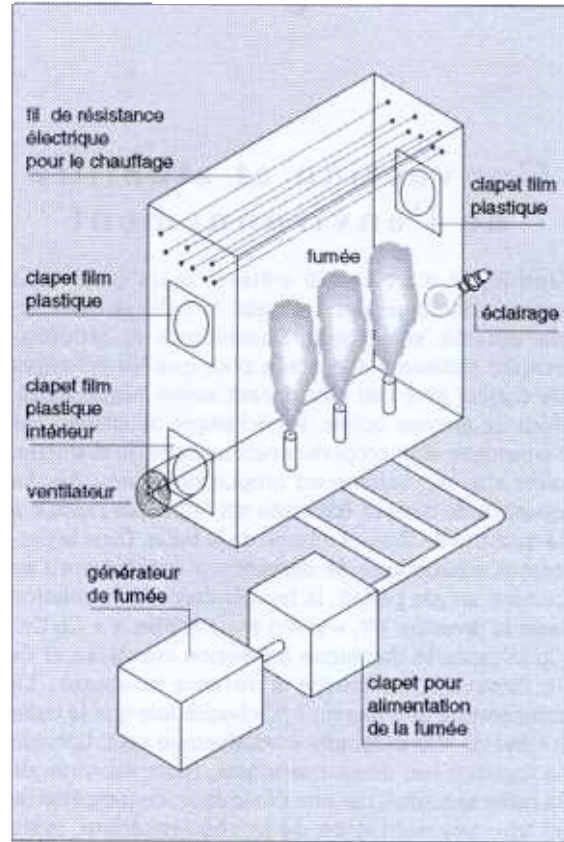
Figure 17



Fonctionnement en trois phases d'un projet de manipulation montrant l'influence de l'inversion de température sur les pollutions.

Source : d'après S. Lefavrais, M. Sicard, doc. interne EPPV 84.

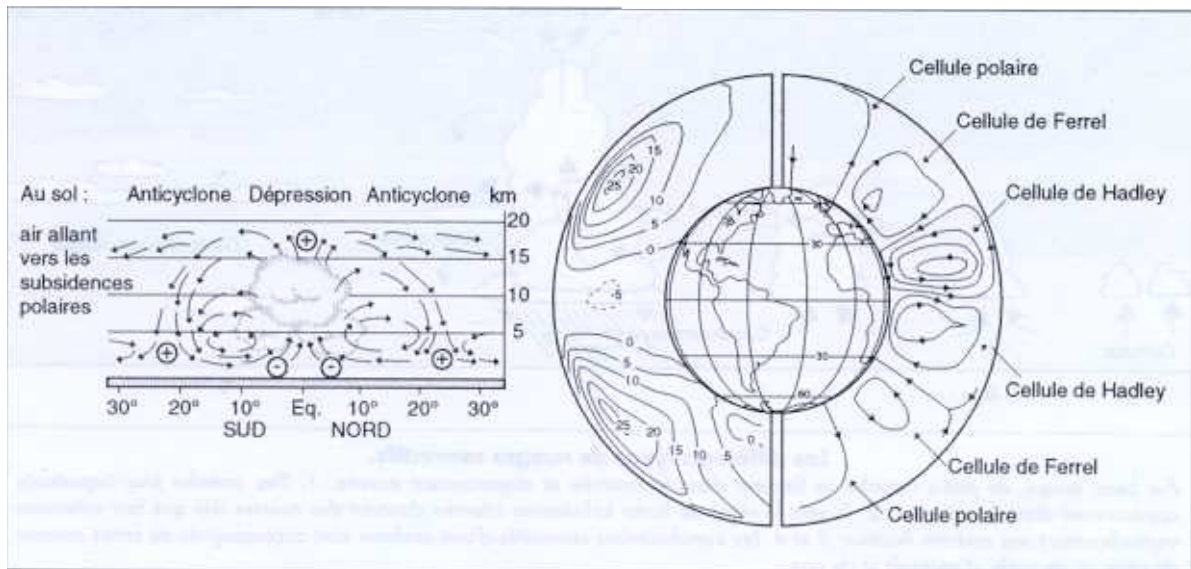
Figure 18



Projet de manipulation montrant l'influence de l'inversion de température sur les pollutions.

Source : d'après S. Lefavrais & M. Sicard, doc. interne EPPV 84.

Figure 19



Simplification de la circulation des masses d'air dans un plan méridien.

Les nuages plus chauds que l'air ambiant montent rapidement. En altitude, au fur et à mesure que la vapeur d'eau se condense et cède de la chaleur latente de condensation à la masse d'air en mouvement, il en résulte une force ascensionnelle supplémentaire. Le nuage atteint des altitudes où la température est très inférieure à 0 °C. Dans sa partie supérieure des courants ascendants de vitesse supérieure à 30 m/s peuvent amener le toit du nuage au-delà de 10 km et parfois davantage (jusque dans la stratosphère, vers 20 km d'altitude) et maintiennent les précipitations solides ou liquides en altitude. Lorsque l'accumulation de l'eau n'est plus soutenue par les courants ascendants, les précipitations tombent. Elles forment des courants descendants par entraînement visqueux de plus faible vitesse que les courants ascendants. Ils sont localisés à l'avant du nuage et en son milieu. Les courants descendants amènent de l'air froid et les précipitations au sol. Pendant cette phase, les nuages peuvent atteindre une altitude de 15 km. En réalité, les nuages sont formés d'amas imbriqués de très nombreuses cellules ascendantes et descendantes. L'air froid d'une cellule descendante peut générer la naissance d'une cellule ascendante. Une autogénération du cycle ascendant-descendant prolonge la durée de vie d'un nuage. Celle d'un cumulonimbus générateur d'averses est d'une vingtaine de minutes et celle d'un générateur d'orages est de deux heures.

Remarque. Une goutte d'eau de 5 mm à 4 mm a une vitesse limite de 9 m/s, 4 m/s pour 1 mm, 1 m/s pour 0,4 mm. Au-delà de 4 mm à 5 mm, la vitesse augmente peu.

Inversion de la température des basses couches de l'atmosphère et pollution

Dans de nombreuses villes, la pollution prend naissance au voisinage du sol avec les émissions de fumées. Celles-ci peuvent se diffuser dans des zones lointaines en montant et, sous l'effet du vent, se stabiliser et s'accumuler au-dessus de la ville dans le cas d'inversion de température. Ce phénomène peut durer quelques heures dans le cas où le sol s'est suffisamment refroidi pendant la nuit, ou plusieurs jours dans des circonstances climatiques particulières. Les couches chaudes recouvrent les basses couches froides, la stratification est stable. Les fumées s'étalent en nappes horizontales et la pollution (gaz carbonique et autres) dépasse la norme admissible, ce qui conduit certaines municipalités à limiter la circulation automobile ou le fonctionnement d'usines.

Convection et courants dans les mers et les océans

Les marées sont provoquées par le soleil et la lune en fonction de la force de gravitation, les courants marins sont dus essentiellement aux vents, à la rotation de la terre et aux échanges d'énergie et de matière entre l'océan et l'atmosphère. L'énergie solaire reçue par la planète est en grande partie absorbée par les couches superficielles de l'océan. Les circulations des masses d'eau d'est en ouest dans les régions tropicales et d'ouest en est aux latitudes moyennes assurent la diffusion en surface des zones bénéficiaires en énergie, dans l'est du Pacifique et l'Atlantique tropical, vers les zones des hautes latitudes déficitaires. À ces courants horizontaux se superposent des mouvements verticaux qui assurent le mélange de l'eau des couches superficielles et profondes. La variation de la salinité des eaux contribue à ces phénomènes. Dans les zones tropicales, les eaux sont plus salées à cause de l'évaporation. Elles se refroidissent et plongent dans les profondeurs des mers des hautes latitudes polaires. L'eau revient vers les zones pacifiques par des courants situés entre 2 000 m et 4 000 m de profondeur où la température avoisine 2 °C à 4 °C et ce sur une durée de mille ans.

Circulation atmosphérique planétaire

La circulation méridienne de l'équateur au pôle Nord ou de l'équateur au pôle Sud se structure en cellules. À l'équateur, l'air chaud et humide monte (dépression) et se refroidit en altitude. La condensation de la vapeur d'eau alimente les pluies des zones tropicales. L'air froid et asséché retombe sur les régions anticycloniques (zones tropicales). Dans ces zones apparaissent les mouvements provoqués par la force de Coriolis (circulation zonale s'effectuant suivant un parallèle). Entre les tropiques (30 ° N et S de l'équateur), les mouvements d'air réguliers sont essentiellement thermiques.

Utilisation de la convection dans la vie courante

Comment se refroidit une tasse remplie de lait (convection naturelle) ? Comment accélérer ce refroidissement (convection forcée) ? Comment refroidit-on un moteur d'automobile (illustration de la convection forcée) ? Comment réchauffe-t-on une pièce avec un radiateur statique (illustration de la convection naturelle) ? Comment réduire les pertes d'énergie avec un double vitrage (confinement de l'air pour réduire la convection) ?