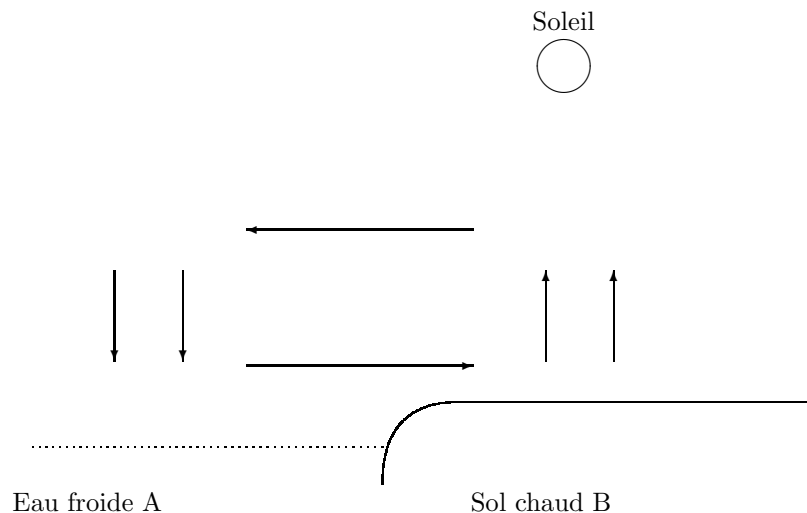


CONCEPTS FONDAMENTAUX DE METEOROLOGIE

1- ORIGINE DES VENTS



¹L'air ² chaud est plus "léger" (moins dense) que l'air froid et a tendance à s'élever. On explique ainsi la brise de mer l'après-midi par exemple :

En complétant la circulation de l'air, on voit que le vent vient de la mer près du sol. Les différences de températures créées par le Soleil sont donc à l'origine des vents.

Mais on peut interpréter ce vent en terme de pression. La pression au sol est due au poids de l'air au dessus. L'air chaud étant plus léger que l'air froid, le poids de l'air au dessus de *B* est plus faible qu'au dessus de *A* (en supposant la hauteur d'air égale au dessus de *A* et au dessus de *B*). $P_A > P_B$ On a une dépression thermique en *B*, et le vent souffle des fortes pressions vers les basses pressions, comme dans un pneu qui se dégonfle.

En conclusion : Différence de température $\Rightarrow$ différence de pression $\Rightarrow$ vent .

On peut placer ici les deux expériences suivantes : 1) On peut peser un ballon de foot gonflé; ensuite, on le dégonfle, on sent alors le jet d'air montrant que l'air s'écoule des hautes vers les basses pressions. On vérifie ensuite que la balance de Roberval est déséquilibrée parce qu'il est plus léger.

2) On a un aquarium séparé en deux en son milieu par une cloison étanche dans laquelle il y a deux grands trous circulaires en haut et en bas fermés par une trappe. Dans un récipient on met de l'eau chaude colorée en jaune par du colorant alimentaire, dans l'autre on met de l'eau froide colorée en bleu par du bleu de méthylène qu'on achète en pharmacie. On enlève alors la trappe et on voit l'écoulement de l'eau au moyen de petites bandelettes d'aluminium. On peut faire la même chose avec de l'eau douce et de l'eau salée. Des lampes électriques peuvent s'allumer et s'éteindre à l'arrivée et au départ de l'eau salée. On met ainsi en évidence la circulation thermohaline.

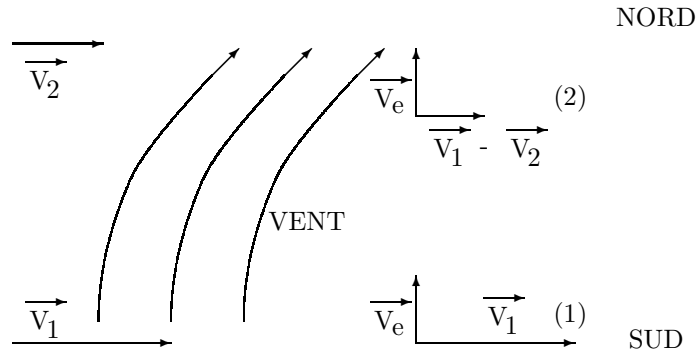
¹rologi

²BOUTELOUP IUFM CERGY

2- VENTS ET ROTATION DE LA TERRE

La force de Coriolis dévie les vents vers la droite dans l'hémisphère nord.

Un courant d'air remontant vers le nord (vent de sud) rencontre un sol dont la vitesse vers l'est diminue. Emporté par son élan vers l'est qu'il a acquis par frottement sur un sol qui allait vite vers l'est, il se met à se diriger vers l'est.



$\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$ sont les vitesses du sol en (1) et (2). La vitesse absolue de l'air en (1) est $\vec{V}_e + \vec{V}_1$, tandis que la vitesse du vent, c'est à dire la vitesse de l'air par rapport au sol est $\vec{V}_e$. En (2), la vitesse du vent est $\vec{V}_e + (\vec{V}_1 - \vec{V}_2)$, d'où une déviation vers la droite. On ferait un raisonnement analogue pour un vent de nord.

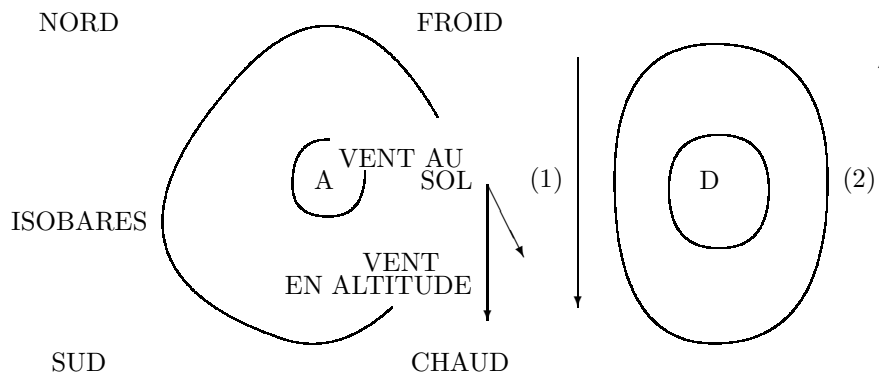
Pour un vent d'ouest, la force centrifuge due à la rotation de la Terre est augmentée, d'où une augmentation de la distance à l'axe de rotation et une déviation vers le sud, donc vers la droite.

Les anticyclones sont les régions de hautes pressions. Les dépressions sont les régions de basses pressions. La force de Coriolis est tellement importante que le vent souffle pratiquement parallèlement aux isobares (lignes d'égales pressions) en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre autour d'un anticyclone et dans le sens inverse autour d'une dépression. Près du sol, où la force de frottement sur le sol devient prépondérante sur la force de Coriolis, une légère composante va de l'anticyclone vers la dépression, d'où une rotation des vents vers la droite quand on s'élève (spirale d'Ekman). Les anticyclones se dégonflent donc lentement par le bas. Cela entraîne la subsidence dans les anticyclones et l'ascendance dans les dépressions.

Au nord il fait froid, au sud il fait chaud. On voit donc qu'en (1), le vent du nord apporte de l'air froid, tandis qu'en (2), le vent du sud apporte de l'air chaud. Il est donc intéressant avec des élèves de mesurer sur plusieurs jours la direction du vent et la température et de faire le lien entre les deux.

On peut ici faire l'expérience suivante : on dispose dans une petite étagère à tiroirs ouverts des deux côtés des glaçons. On souffle du vent vers cette étagère avec un ventilateur; on observe alors qu'un thermomètre sous le vent indique une température plus basse qu'un thermomètre au vent. Cette expérience montre entre autre que le vent est un déplacement d'air.

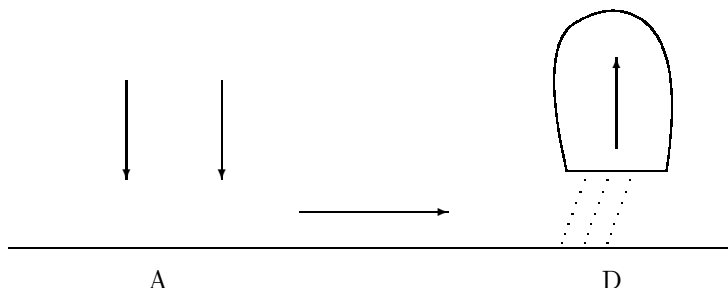
A noter que les élèves pensent que le vent fait du froid. Il est intéressant de montrer avec un ventilateur par exemple que le vent ne fait pas baisser la température de l'air. Le vent ne fait qu'amener de l'air qui a sa propre température.



C'est donc la variation de pression entre les anticyclones et les dépressions qui crée le vent. Si les isobares sont plus resserrés, le vent est donc plus fort. Le vent est proportionnel au resserrement des isobares.

La force centrifuge due à la rotation autour du centre actif contribue à creuser les dépressions en éjectant l'air, et au contraire à atténuer les anticyclones. Il en résulte que les isobares sont plus resserrés dans les dépressions que dans les anticyclones, d'où le fait que les tempêtes soient associées aux basses pressions mesurées par le baromètre, ce que l'on peut vérifier avec des élèves en mesurant régulièrement le vent et la pression. *On peut mesurer le vent en mesurant l'angle que fait avec la verticale une balle de PING-PONG suspendue à un fil. Une table donne la correspondance.*

3- BEAU TEMPS ET MAUVAIS TEMPS

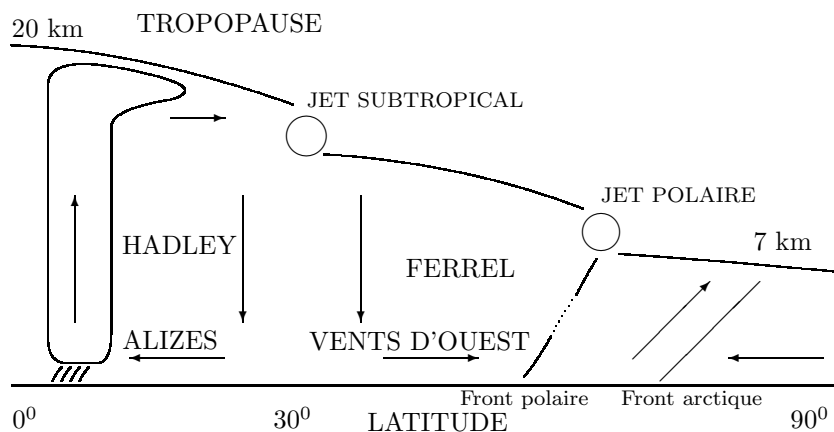


Quand l'air se refroidit, la vapeur d'eau se condense en nuage ou brouillard. Or, dans l'atmosphère, il fait chaud en bas et froid en haut. Au sol, l'air va un peu des anticyclones vers les dépressions. En complétant la circulation, on voit que dans un anticyclone, l'air descend, il y a subsidence. L'air se réchauffe donc, et les nuages s'évaporent et disparaissent. Il fait beau. On voit tout de même que la descente de l'air doit s'arrêter près du sol. Il peut donc rester des nuages bas (stratus ou stratocumulus) au dessus de la mer par exemple, ou l'hiver. L'été, le Soleil assèche l'air et un stratus matinal par exemple disparaît dans la journée. Dans une dépression, l'air monte; il y a ascendance. L'air se refroidit donc et il se forme des nuages. Il pleut.

Il est donc intéressant avec les élèves de mesurer la pression avec un baromètre et de noter le temps qu'il fait en essayant de vérifier que le beau temps est lié aux anticyclones et le mauvais temps aux dépressions.

On peut également ici faire l'expérience montrant la différence de température entre un thermomètre sec et un thermomètre mouillé mesurant l'humidité de l'air.

4- CIRCULATION GENERALE DE L'ATMOSPHERE



Les alizés, au fur et à mesure de leur cheminement sur l'océan deviennent de plus en plus humides, donc l'air y est de plus en plus léger.

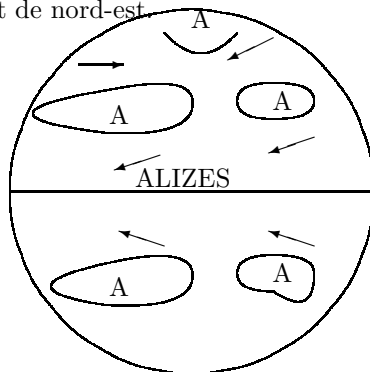
Dans la zone de convergence intertropicale (Z.C.I.T.), là où l'air est le plus léger et s'élève, il pleut et le vent au sol est nul. En altitude, cet air, devenu sec et relativement très chaud, remonte vers le nord dans l'hémisphère nord, et descend vers le sud dans l'hémisphère sud. Cependant, la force de Coriolis dévie cet air vers la droite créant de très forts vents d'ouest en altitude : le *Jet stream subtropical* associé à une discontinuité de la tropopause. L'air chaud et sec se trouve ainsi bloqué dans son cheminement vers les pôles et s'accumule au niveau des anticyclones tropicaux (30° de latitude, anticyclone des Açores par exemple). D'où la ceinture des déserts et des anticyclones tropicaux autour de la Terre. Dans un anticyclone semi-permanent comme l'anticyclone des Açores, on a de l'air chaud et sec. La pression est élevée au sol, car il y a très épais d'air, donc un poids d'air important, de plus l'air sec est naturellement lourd.

La circulation de Hadley est marquée par la brusque élévation de température de l'air au dessus de $1500m - 2000m$, et le changement de sens du vent visualisé par la marche en sens inverse des nuages bas et élevés, très spectaculaire.

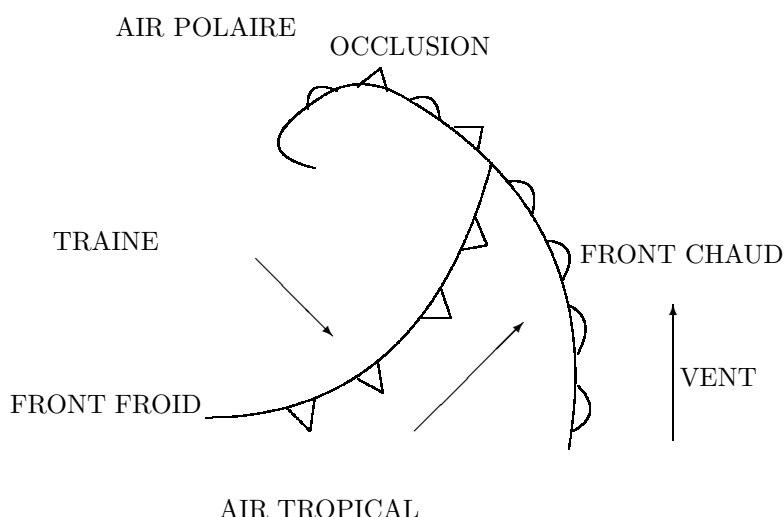
La tropopause (sommet de l'atmosphère météo) est très haute (18-20 km).

L'atmosphère est suffisamment épaisse (tropopause très haute) dans les régions tropicales ou équatoriales pour avoir une circulation vers le nord en haut et vers le sud en bas. C'est la circulation de Hadley. Au delà, l'atmosphère est trop peu épaisse. De plus elle est emportée par la force de Coriolis à très grande vitesse vers l'est (vent d'ouest dans nos régions). La circulation de Ferrel prend le relai. L'ensemble se déplace vers le nord ou vers le sud suivant les saisons, d'où les différentes saisons des pluies dans les pays tropicaux.

Dans les régions nordiques, surtout l'hiver, il peut exister des anticyclones froids, accumulation d'air lourd car très froid et très dense, d'où une forte pression au sol. En hiver dans nos régions, l'anticyclone de sibérie nous apporte un froid sec avec un vent de nord-est.



5- PERTURBATIONS ET CIRCULATION DE FERREL



En gros, on distingue deux jets streams différents : le premier, le jet stream subtropical est persistant et apparaît donc bien sur les valeurs moyennes de vent. Il est situé aux latitudes de 30^0 . C'est celui dont nous avons parlé ci-dessus. Le deuxième est le *jet stream du front polaire*.

Mais en fait, il y a continuité entre les deux. Dans l'hémisphère nord il y a deux tronçons orientés sud-ouest, nord-est; l'un allant du sahara au japon, l'autre du mexique à l'europe de l'ouest. La base équatoriale de ces jets est appelée *jet subtropical*, la partie la plus près du pôle *jet du front polaire*.

Examinons maintenant plus en détail le jet du front polaire qui est plus irrégulier et discontinu, et plus bas que le jet subtropical ($300mb$ au lieu de $200mb$) : Plus au nord que l'anticyclone des açores, l'atmosphère est trop peu épaisse pour avoir une différence globale appréciable de circulation entre le bas et le haut.

L'ensemble est entraîné par les vents d'ouest.

Il n'y a pas d'échange thermique régulier assuré par l'air entre les régions les plus au nord et les régions les plus au sud.

Peu à peu la différence de température entre le nord et le sud augmente. Cette différence de température a tendance à devenir très forte en certains endroits. L'air du nord, plus froid, est plus lourd que l'air du sud. La relation de l'hydrostatique implique alors une beaucoup plus grande pression en altitude, au sud qu'au nord, en supposant que la pression est pratiquement la même au sol. L'air est maintenu dans cet état grâce à la force de Coriolis due au jet stream du front polaire.

On peut montrer que cette différence de température, liée à la force de Coriolis, peut entraîner l'amplification d'une onde préexistante de bonne longueur d'onde (instabilité barocline) : Il se forme une perturbation sous le jet : L'air froid au nord a tendance à couler sous l'air chaud, mais ce faisant il a tendance à s'étaler en une couche de moins en moins épaisse, donc de plus en plus large, comme une patineuse qui écarte les bras en tournant; en effet, la masse d'air tourne, étant liée à la Terre qui tourne.

La conservation du moment cinétique implique alors une variation de la vitesse de rotation, donc une mise en rotation par rapport à la Terre, qui donne tout de suite un aspect ondulatoire au phénomène.

Deux mécanismes dynamiques séparés (1 advection de tourbillon, 2 advection thermique) entraînent alors l'ascendance de l'air chaud donc la pluie. Ces deux mécanismes de pompage sont indépendants et beaucoup plus fort que celui dû au mécanisme de frottement décrit dans le paragraphe 2. Cette ascendance, liée à la non-linéarité entraînant un feedback (ascendance $\Rightarrow$ convergence horizontale $\Rightarrow$ augmentation du gradient de température horizontal $\Rightarrow$ ascendance) crée des discontinuités en un temps fini, les fronts.

L'advection thermique est facile à comprendre. L'arrivée d'air chaud donc léger en altitude fait chuter la pression au sol. Cette basse pression n'est pas stabilisée comme au paragraphe 2 par un vent tournant; l'air au sol se précipite donc vers ces basses pressions, et cette convergence au sol provoque l'ascendance. L'advection de tourbillon, correspond au remplacement en altitude d'air sans rotation par de l'air en rotation qui provoque un mécanisme de pompe centrifuge aspirant l'air vers le haut.

Au départ l'ascendance est globale dans toute la zone entre les deux fronts, mais la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur d'eau en pluie a ensuite tendance à renforcer les ascendances, donc la pluie au niveau des fronts à cause du brusque contraste au niveau du front entre la zone chauffée et la zone non chauffée.

L'ascendance forte là où il pleut injecte beaucoup d'air en altitude qui a tendance à redescendre autour, y bloquant alors l'ascendance. La discontinuité en vent est alors renforcée par ce phénomène, et les pluies se localisent au voisinage des fronts.

Au niveau du front chaud, c'est l'air tropical qui avance. Les ascendances liées entraînent une pluie qui dure plusieurs heures. Au niveau du front froid, c'est l'air polaire qui avance. Cela donne des pluies violentes et souvent orageuses mais assez brèves (environ une heure). Ensuite, après une demi-heure à une heure de beau temps, dans l'air polaire postérieur (subsidence dynamique, mécanisme 1 et 2), vient le ciel de traîne lié à l'arrivée déphasée d'air froid en altitude; traîne plus ou moins active selon les cas. Il s'agit d'éclaircies entrecoupées d'averses. Parfois, on a ensuite de nouveau de la pluie continue avec le retour de l'occlusion. L'occlusion consiste en de l'air chaud isolée et totalement entouré d'air froid, au coeur de la perturbation.

L'ensemble de la perturbation se déplace en général à une vitesse d'environ 40 km/h vers l'est, mais cela est très variable.

Le tourbillon créé par la perturbation fini par mélanger l'air froid et l'air chaud. C'est comme cela que la chaleur est transportée des régions tropicales vers les régions nordiques. Le mélange atténue la différence de température entre le nord et le sud et atténue la perturbation qui fini par disparaître. Les fronts ainsi créés par la perturbation séparent l'air tropical de l'air polaire.

Les perturbations sont associées à des zones de basses pressions (dépressions). Par leur évolution dynamique, elles ont tendance à creuser la dépression. Une perturbation qui se glisse dans un anticyclone voit ses fronts se frontolysier (s'atténuer puis disparaître) à cause de la subsidence. Elle devient de moins en moins active et disparaît.

Les perturbations sont donc associées à des courants-jets d'altitude dont elles suivent la trajectoire. Si un tourbillon du jet entre en phase avec un tourbillon de basse couche (dépression en altitude à l'ouest de la dépression au sol), cela peut créer une très forte tempête très localisée qui apparaît en quelques heures.

Si les irrégularités du jet donnent naissance aux perturbations, ces dernières réagissent en retour sur lui et peuvent engendrer des méandres durables (blocages) visibles sur la carte du géopotential à 500hPa. Au centre d'un méandre convexe vers le nord réside alors un *anticyclone dynamique*; il fait beau temps, d'autant plus que cela implique qu'il y a de l'air chaud en altitude, donc de l'air stable. Ces méandres ont parfois tendance à évoluer par eux-mêmes (ondes de Rossby).

Tout cela peut paraître un peu compliqué. On peut raisonner par analogie. Faisons bouillir de l'eau dans un ballon avec un long col. À l'intérieur cela reste totalement transparent et le brouillard blanc apparaît juste à la sortie du col.

Sur la Terre, l'air froid a tendance à stagner au nord, cela constitue l'air polaire, tandis que l'air chaud et humide tropical règne au sud. Il se produit une zone de fort gradient thermique que l'on appelle le front polaire. La différence de densité fait que l'air froid coule sous l'air chaud. Cependant, une discontinuité dans la vitesse du vent au passage du front, grâce à la force de Coriolis peut stabiliser le système.

Dans cette analogie, l'eau bouillante du ballon correspond aux océans tropicaux; l'air humide et transparent du ballon correspond au beau temps de l'air tropical. L'ouverture du col où se produit le brouillard correspond

au front polaire où il pleut. Plus au nord, l'air polaire étant froid a tendance à faire condenser la vapeur d'eau et il y a toujours plus de nuages que dans l'air tropical.

Au niveau du front polaire, on a deux fluides différents en mouvement l'un par rapport à l'autre. On a une analogie avec de l'eau sous de l'air en mouvement comme quand du vent souffle sur un lac ou la mer. On sait que cela crée des vagues qui finissent par déferler. Dans cette analogie, les vagues sont les perturbations du front polaire, et la formation de l'occlusion correspond au déferlement.

6– LES MASSES D'AIR

Les fronts séparent les masses d'air qui sont de vastes étendues contenant de l'air homogène en température et en humidité.

On distingue les masses d'air chaudes appelées tropicales : tropicales maritimes pour l'air humide venant de l'océan, et tropicales continentales pour l'air qui vient du sahara ou du continent.

De même on a les masses d'air polaires ou même arctiques lorsqu'elles viennent directement du pôle, avec les adjectifs maritimes ou continentales. L'air polaire continental (PC) vient de la sibérie par vent de nord-est.

Il faut donc affiner ce qui a été dit au paragraphe 2 . Le vent peut venir du nord sans qu'il fasse vraiment froid si on se trouve tout de même dans une masse d'air tropicale. Il arrive en effet que des masses d'air chaud liées à l'anticyclone des açores remontent avec celui-ci très au nord dans l'atlantique.

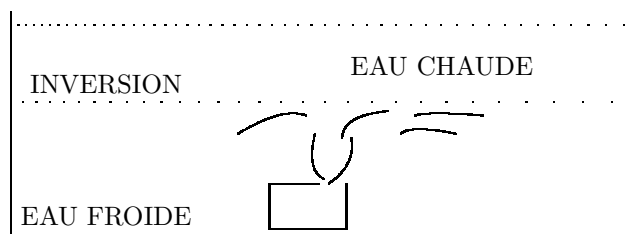
Pour connaître la température, il faut à la fois voir d'où vient le vent et également la position des fronts.

7– STABILITE OU INSTABILITE DES MASSES D'AIR

A cause de la dilatation, l'eau chaude est moins dense que l'eau froide et peut flotter dessus. Au contraire, une masse d'eau chaude sous de l'eau froide montera : c'est la *convection* .

D'où l'expérience suivante montrant la pollution lors d'une inversion de température :

De l'eau chaude colorée dans une boîte s'élève, mais reste bloquée au niveau de la couche d'inversion séparant l'eau chaude de l'eau froide.



De la même manière, si l'on observe attentivement un glaçon flottant sur l'eau, on voit un filet d'eau froide qui s'enfonce en dessous. Ainsi, de l'eau chaude peut se maintenir sur de l'eau froide. On a une situation stable. Par contre, de l'eau froide ne peut pas se maintenir sur de l'eau chaude. On a une situation instable.

En ce qui concerne l'air, il faut un peu modifier la loi, car de l'air peut être stable alors que sa température décroît tout de même avec l'altitude.

Une bulle d'air, lorsqu'elle monte, se détend à cause de la diminution de la pression, et cette détente diminue sa température de 1°C tous les 100 m. Si l'air extérieur a une température qui diminue de moins de 1° tous les 100 m, la bulle d'air ascendante se retrouve plus froide donc plus dense que l'air extérieur et retombe.

Pour que l'air sans nuage soit stable, il suffit que sa température diminue avec l'altitude de moins de 1° tous les 100 m.

Pour l'air humide, la condensation dégage de la chaleur, ce qui accroît l'instabilité. L'air saturé est donc stable si sa température diminue de moins de $0,5^{\circ}$ tous les 100 m.

L'anticyclone des açores qui correspond à une arrivée d'air chaud en altitude donc à de l'air stable, peut bloquer la pollution; on peut avoir aussi un couvercle de nuages bas. Il peut donc y avoir un temps couvert l'hiver, ou le matin l'été avec un temps anticyclonique.

Le ciel de traîne consiste en une arrivée d'air polaire froid au dessus de l'eau ou du sol plus chaud (plus au sud) et est donc instable; d'où la possibilité d'averses ou d'orages (convection violente). Cette instabilité est beaucoup renforcée par l'arrivée d'air encore plus froid en altitude, comme l'étude dynamique de l'écoulement de l'air dans une perturbation le montre. Mais cette arrivée d'air froid en altitude se fait avec un retard d'un quart de longueur d'onde par rapport à l'arrivée de l'air froid au sol. C'est pour cela qu'il y a une période de beau temps après le passage du front froid, avant l'arrivée des averses; d'autant plus que derrière le front froid, dans un premier temps, la dynamique de la perturbation entraîne une subsidence.

Il est intéressant de voir comment le temps, évolue sur une longue période, par séquences de types de temps différents, le temps étant toujours à peu près le même au cours d'une séquence pouvant durer de quelques jours à plus d'un mois, puis changeant brutalement en quelques jours d'une séquence à l'autre.

Pour cela, il suffit de noter chaque jours simplement deux informations : le type de masse d'air (polaire ou tropicale) et si $P > 1013mb$ ou $P < 1013mb$. La valeur exacte de la pression importe peu. $P < 1013mb$ et masse d'air polaire $\Rightarrow$ mauvais temps froid par exemple.

8– EFFET DE FOEHN

Lorsque de l'air humide monte au dessus d'une montagne, la condensation dégage de la chaleur et la température descend de $0,5^{\circ}$ tous les 100 m.

De l'autre côté, l'air qui redescend s'échauffe et est donc sans nuage. Sa température croît alors de 1° tous les 100 m.

Il fait donc beaucoup plus chaud du côté sous le vent que du côté au vent. De plus, il pleut du côté au vent et il fait beau du côté sous le vent.

A cause de l'effet de Föhn, il pleut beaucoup plus en lorraine qu'en alsace, ou sur les monts d'auvergne que dans la plaine de limagne. Pour la même raison, il pleut assez peu dans le bassin parisien.

9– CIRCULATION DE WALKER

Les alizés soufflent régulièrement et fortement de l'est sur les océans tropicaux. Il en résulte un courant de dérive qui amène les eaux chaudes de surface des océans à s'accumuler sur la façade ouest des océans, tandis que des remontées d'eaux froides (upwelling) se produisent sur la façade est.

La zone de convergence intertropicale est ainsi déplacée à l'ouest des océans, tandis que sur la façade est règnent les déserts côtiers.

On a ainsi le désert entre la mauritanie et le maroc, la vallée de la mort aux états unis, le désert du kalahari en afrique du sud, le désert d'atacama au chili. Les îles du cap vert ou des galapagos sont peu arrosées tandis que les caraïbes sont très arrosées. C'est en indonésie qu'il pleut le plus dans le monde, là où s'accumulent les plus grandes surfaces d'eaux chaudes. L'eau est toujours froide à san francisco.

Cette eau chaude accumulée en indonésie peut refouler vers l'est avec les ascendances associées qui cassent les alizés. Le phénomène s'auto-amplifiant. C'est le phénomène d'El Niño apportant des eaux chaudes et des pluies torrentielles sur les côtes du chili. Le désert d'atacama se met alors à fleurir!

Les cyclones eux-mêmes se produisent sur la façade ouest des océans. A noter que dans l'atlantique sud plus froid à cause de l'antarctique, il n'y a jamais de cyclones.