

LES CHANGEMENTS D'ÉTATS

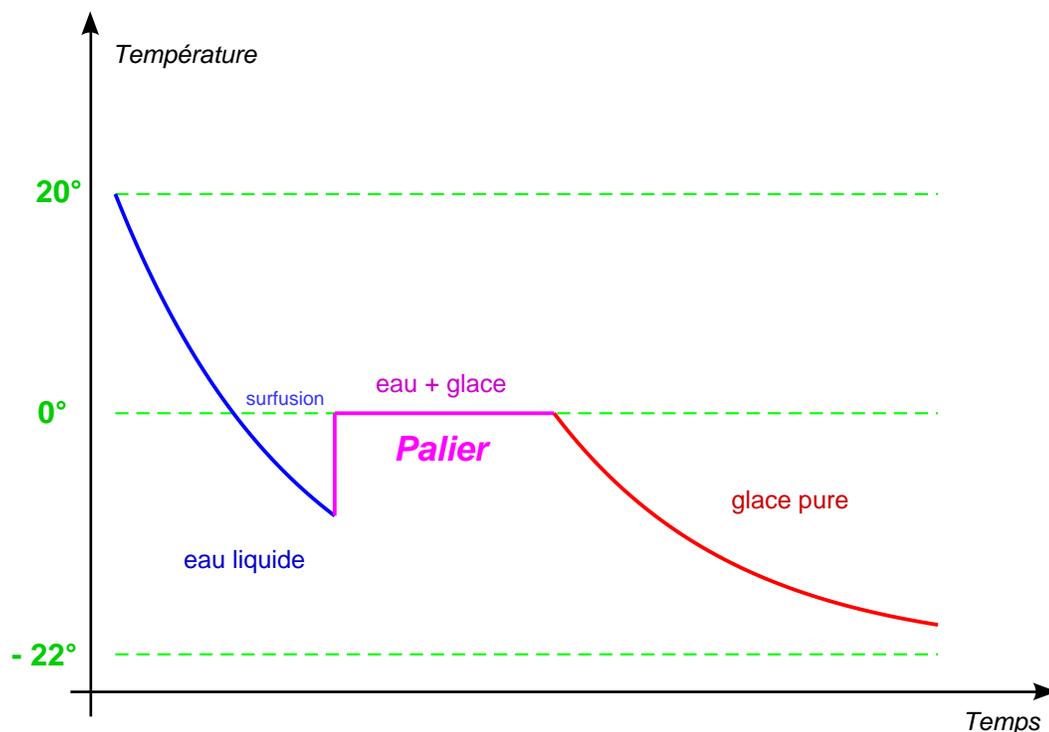
I- CHANGEMENT D'ÉTAT SOLIDE-LIQUIDE

1- Expérience cruciale

Pierre BOUTELOUP

Fabriquons un mélange de glace pilée (ou de neige) et de sel en quantités équivalentes. La glace pilée ou la neige permettent d'avoir un contact intime entre le sel et l'eau gelée avec une très grande surface de contact, et c'est à la surface de contact que les choses se passent. La température descend à -22°C .

On peut alors introduire dans ce mélange réfrigérant un tube à essai propre contenant de l'eau du robinet, et faire un relevé de température. On obtient la courbe suivante :



2- Palier de liquéfaction

Tant qu'il y a un mélange d'eau et de glace, la température reste constante mais supérieure à celle du milieu ambiant. Un radiateur ou notre corps vérifient cette propriété. Dans ces deux cas, c'est parce qu'il arrive de l'énergie, par convection ou réaction chimique. Ici, c'est la solidification de l'eau en glace qui dégage de l'énergie.

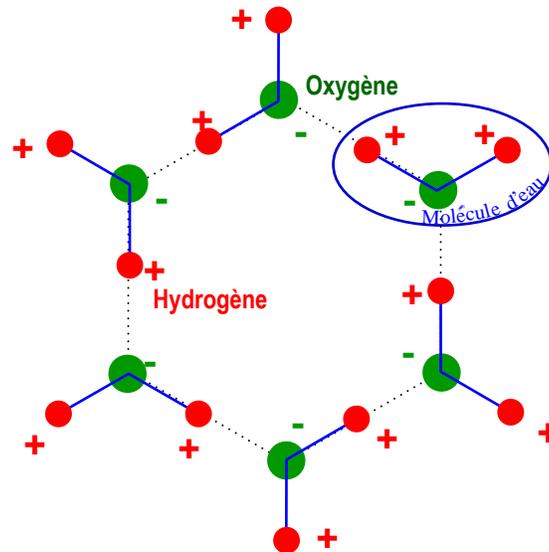
3- Explication microscopique de l'échange d'énergie

Cet échange d'énergie lié à la fusion ou à la solidification vient du fait que le liquide possède de l'énergie par le simple fait qu'il est liquide à la température donnée au lieu d'être solide. On appelle cette énergie **chaleur latente**. Elle vient de l'éloignement des atomes qui s'attirent par la force électrique, comme l'éloignement de la Terre d'un objet attiré par elle donne de l'énergie à cet objet (lacs en montagne utilisés par EDF). La chaleur latente correspond donc, pour les molécules, à un gain d'énergie potentielle électrique quand on passe du solide au liquide, ou quand on passe du liquide au gaz. Un objet qui tombe voit sa vitesse augmenter. De la même manière quand les atomes « tombent » les

uns sur les autres, quand le liquide cristallise à la fin de la surfusion, ils augmentent de vitesse, et cette agitation croissante correspond à une augmentation brutale et très rapide de température.

4- Structure de la glace

La glace a une structure en hexagone (cela est approché, car la structure n'est pas plane).



Les + et les - qui s'attirent sont près les uns des autres, ce qui assure la cohérence de la glace, et correspond à une faible énergie potentielle. D'autre part, au centre des hexagones, il y a beaucoup de vide (à ne pas confondre avec les bulles d'air dans la glace, beaucoup plus grosses), ce qui donne une faible densité à la glace qui flotte donc sur l'eau.

Quand on chauffe de la glace, la température, donc l'agitation thermique, augmentent. Au point de fusion l'agitation thermique devient suffisante pour briser ces liaisons électriques (liaisons hydrogènes) entre molécules voisines.

Quand on passe de la glace à l'eau liquide, et encore plus à la vapeur, la distance entre les charges opposées augmente, ce qui nécessite beaucoup d'énergie pour augmenter l'énergie potentielle, d'où la chaleur latente de fusion de 330 kJ/kg et celle de vaporisation de 2256 kJ/kg. Quand on passe à l'eau liquide, cette structure en voûte s'effondre et l'eau liquide est plus dense. Par contre, quand on passe à la vapeur, les molécules se séparent et le volume est multiplié par 1000.

Les canalisations cassent donc quand l'eau gel. Il faut donc mettre de l'antigel. La glace d'autre part, flotte sur l'eau (Iceberg). Une bouteille en plastique pleine d'eau et mise au congélateur en ressort cassée.

À noter que la glace glisse. Des expériences récentes (diffraction de rayons X ; résonance magnétique nucléaire ; diffusion de protons ; simulation sur ordinateur) confirment la géniale conviction de Michael Faraday en 1850 : les molécules de la surface d'un glaçon même pour $t \ll 0^\circ\text{C}$ sont mal attachées et glissent les unes par rapport aux autres (ceci se comprend, elles ont moins de voisines à qui s'attacher) ; elles sont pratiquement à l'état « liquide ». C'est pourquoi la glace glisse, même à des températures très négatives.

5- Le mélange réfrigérant

Le sel fait « fondre » (dissout) la glace rapidement. Cette fusion consomme de l'énergie qui ne peut être prise qu'en abaissant la température, puisque lorsqu'un corps se refroidit, il cède de l'énergie. On voit du givre se déposer sur les parois du récipient. On peut alors, comme on l'a vu ci-dessus, faire geler de l'eau placée dans un petit tube à essai enfoncé dans ce mélange.

En effet, dans un liquide, les molécules sont en contact. On peut les considérer comme de petites sphères dures impénétrables. Les ions du sel (Na^+ et Cl^-) ont chacun un volume à peu près égal à celui des molécules d'eau. En se glissant entre les molécules d'eau, ces ions les séparent et les écartent les unes des autres. Étant plus espacées, les

molécules d'eau frappent la glace moins souvent, et ainsi, il y en a moins qui viennent se fixer sur la glace; l'équilibre est rompu par le fait qu'il y a toujours autant de molécules qui quittent la glace (en effet, la glace ne contient pas de sel, et pour elle, rien n'est changé), et moins qui viennent se fixer dessus. C'est un phénomène tout à fait analogue à celui qui fait que l'eau s'évapore plus si la quantité de vapeur d'eau dans l'air diminue. Le sel fait baisser la « pression » de l'eau liquide.

L'eau salée gèle donc à une température inférieure à 0°C (-2°C pour l'eau de mer), et cette température n'est pas constante, il n'y a pas de palier (on n'a pas affaire à un corps pur, mais à un mélange homogène). En effet, la glace qui se forme ne contient pas de sel (elle ne peut pas contenir non plus de gaz dissous, c'est pourquoi les glaçons sont blancs car pleins de petites bulles d'air dues au dégazage de l'eau qui gèle), ce qui fait que l'eau qui reste devient de plus en plus salée, et gèle à une température de plus en plus basse, jusqu'à atteindre -21,6°C quand l'eau est saturée de sel.

6- Lien entre l'existence du palier et l'énergie de changement d'état

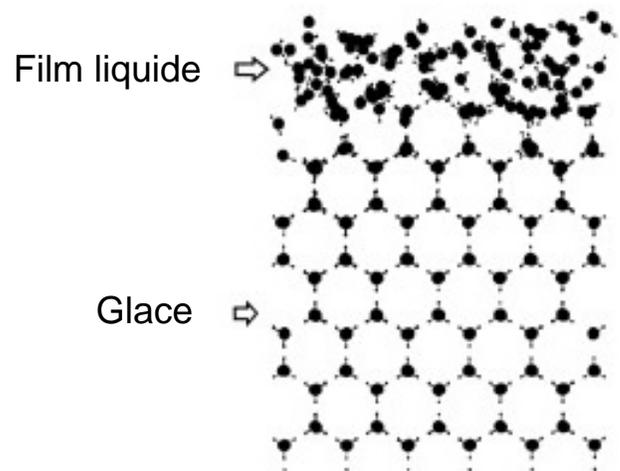
Comme les molécules sont aussi bien en contact dans le liquide et le solide, lorsque des molécules passent du solide au liquide, le volume du liquide augmente d'autant. Il n'y a donc pas plus de molécules d'eau liquide au contact de la glace, qui peuvent revenir s'y fixer. Donc, si la température est très légèrement supérieure à la température de fusion, le déséquilibre des débits (entre les molécules qui rentrent et celles qui sortent de la glace) est permanent et toutes les molécules devraient toutes extrêmement rapidement se retrouver à l'état liquide. Le changement d'état est en effet extrêmement sensible à la température car le débit des molécules qui quittent la glace dépend exponentiellement de la température. C'est l'échange d'énergie, ici l'absorption d'énergie qui fait baisser la température, qui rend le passage à l'état liquide lent et qui rend l'existence d'un palier visible possible, grâce à cette rétroaction négative.

7- La surfusion

On voit sur le graphique que dans un premier temps, la température descend en dessous de 0°C sans marquer d'arrêt. L'eau est encore liquide, c'est la **surfusion**. La surfusion est due au fait que des morceaux de glace extrêmement petits fondent à une température inférieure à zéro (il y a plus de molécules à la surface, moins bien attachées, en proportion). Il est donc impossible de faire geler l'eau. Il faut commencer par fabriquer de petits glaçons qui ne peuvent pas exister ! Prenons l'exemple d'un petit glaçon sphérique : les molécules à la surface sont moins bien attachées que celles plus en profondeur, comme on l'a vu ci-dessus. Or la surface est proportionnelle à R^2 et le volume à R^3 , R étant le rayon du glaçon. Quand $R \rightarrow 0$, surface/volume $\rightarrow \infty$, et on peut dire que toutes les molécules sont mal attachées, d'où la plus grande difficulté pour un petit glaçon d'exister que pour un gros.

Pour qu'un petit glaçon puisse exister sans fondre, il doit être constitué d'au moins 45 000 molécules à -5°C (7,0 nm), 650 molécules à -20°C (1,8 nm) et 70 molécules à -40°C (0,8 nm).

Même lorsqu'il gèle très fort, la surface de la glace est recouverte d'un film, de quelques dizaines de molécules d'épaisseur, de molécules d'eau à l'état liquide (Faraday, discours à la Royal Institution, 7 juin 1850 : deux morceaux de glace joints se collent). C'est pour cela que la glace glisse. L'épaisseur de ce film liquide augmente avec la température.



C'est ces molécules qui entament la fusion, en particulier celle des tout petits morceaux de glace. En effet, une série d'évidences expérimentales tendent à conforter l'hypothèse selon laquelle la surface du solide jouerait un rôle essentiel dans la fusion. Ainsi, de petites particules d'argent enrobées d'une couche d'or ont pu être surchauffées jusqu'à une température de 24°C au-dessus de leur point de fusion. Si on gratte l'or, elles fondent et la température descend de 24 °C. Cela est analogue au refroidissement d'un mélange réfrigérant.

Un choc permet de rassembler suffisamment de molécules à l'état solide en un endroit donné, pour qu'un glaçon se forme et commence à croître et à tout envahir. Malaparte raconte la mort dramatique d'un millier de chevaux russes dans les glaces du lac Ladoga, pendant l'hiver 1942. Pour échapper à un feu de forêt provoqué par des bombardements aériens, les chevaux se précipitent dans le lac. Malgré la vague de froid récemment arrivée, l'eau est encore liquide. Pendant que les chevaux, la tête tendue hors de l'eau, nagent vers l'autre rive, il se fait un grand bruit. L'eau gèle subitement, enfermant les bêtes dans une gangue de glace.

De même, prenons un sachet GIB-HOT contenant de l'acétate de sodium trihydraté et cliquons le métal. Le liquide cristallise rapidement et la température monte à 55°C. Le liquide était en surfusion. Le choc fait cesser la surfusion et la cristallisation dégage de l'énergie. La température remonte jusqu'à temps que la cristallisation cesse à la température du palier (ici, 55°C). Il n'est pas rare avec de l'eau très pure que la glace ne commence à se former qu'à -20°C. Dans les nuages, l'eau reste liquide en surfusion jusqu'à -40°C. Seuls les Cirrus sont constitués uniquement de cristaux de glace. Un cristal de glace lancé dans l'eau fait cesser la surfusion; un choc également.

L'eau présente aussi un retard à l'ébullition et un retard à la liquéfaction. Il est dangereux de faire chauffer de l'eau au four à micro-ondes. Chauffée dans la masse, il n'y a pas de mouvements de convection. Elle peut dépasser 100°C sans bouillir et vous exploser à la figure quand vous la prenez. Du fait de cette fameuse **pellicule liquide** toujours présente à la surface de tout glaçon même à des températures très négatives et qui fait que la glace et la neige glissent, la glace ne présente jamais de retard à la fusion (Faraday 1859).

8- Conservation de la masse

Équilibrons une balance avec de la glace dans un récipient clos. Quand la glace a fondu, la balance est toujours équilibrée (il faut essuyer le récipient pour enlever la buée qui se forme). La masse, correspondant à la quantité de matière, est restée la même, ce qui est normal puisque le nombre de molécules est resté le même.

II- CHANGEMENT D'ÉTAT LIQUIDE-GAZ

1- Évaporation

Mise en évidence : équilibrons une balance avec de l'eau dans un des plateaux. En 1/4 d'heure, la balance se déséquilibre mettant en évidence la disparition de l'eau par évaporation. On peut mesurer le volume d'eau évaporé en une heure par exemple en rétablissant l'équilibre en versant de l'eau avec une seringue graduée. **La vitesse d'évaporation est proportionnelle à la surface.** En tenant compte du rapport des surfaces et des temps, on peut avoir ainsi un ordre de grandeur de l'évaporation annuelle des océans.

Les molécules ne vont pas toutes à la même vitesse. La vitesse moyenne correspond à la température. Il y a toujours des molécules voisines de la surface et qui vont plus vite que les autres. Celles-ci se décollent des autres et partent libres vers le haut. Elles constituent la vapeur.

Étant donné que ce sont les plus rapides qui partent, l'eau a tendance à s'enrichir en molécules lentes. L'évaporation refroidit donc l'eau. Application, la sueur. Réciproquement, quand la vapeur d'eau se liquéfie en eau liquide, cela dégage de l'énergie. **L'évaporation augmente avec la température** puisque les molécules, plus rapides, se détachent alors plus facilement.

S'il y a des molécules d'eau présentes dans l'air, on dit que l'air est humide. Certaines d'entre-elles, par le fait du hasard se dirigeront vers le liquide pour y pénétrer. Leur nombre ne dépend que de la quantité de vapeur d'eau dans l'air. Par contre nous avons vu que le nombre de molécules qui partent dépend de la température. Il y a un équilibre quand autant de molécules partent et arrivent. Ceci implique que l'air chaud peut contenir beaucoup plus de vapeur d'eau que l'air froid. Quand on refroidit de l'air humide, cette humidité peut donc se liquéfier en brouillard ou nuages composés de petites gouttelettes d'eau.

Quand ceci se produit, on dit que l'air est saturé, soit 100 % d'humidité. Quand il n'y a pas de vapeur d'eau dans l'air, on dit que l'on a 0 % d'humidité. Pour mesurer l'humidité de l'air, on utilise un hygromètre. À quantité de vapeur d'eau dans l'air constante, l'humidité de l'air (degré hygrométrique) diminue donc quand la température augmente, c'est pourquoi l'air est sec dans les habitations chauffées l'hiver.

Quand l'air est sec, peu de molécules retombent dans le liquide qui s'évapore donc vite, l'évaporation n'étant pas contrariée. **L'eau s'évapore donc d'autant plus vite que l'air au-dessus, est plus sec.**

Psychromètre : C'est un exemple d'hygromètre. On a un thermomètre sec et un dont le réservoir est recouvert d'un coton humide. L'eau s'évaporant, ce dernier indique une température plus basse, et d'autant plus basse que l'évaporation est rapide, donc que l'air est plus sec. La différence des deux températures : $TS = \text{thermomètre sec et } TM = \text{thermomètre mouillé}$, donne l'humidité de l'air (méthode utilisée dans les stations météo).

Notons que même la glace peut s'évaporer. On appelle cela, **la sublimation**.

On peut montrer la sublimation en chauffant légèrement des cristaux d'iode dans un ballon. Un gaz violet apparaît qui se condense en cristaux sur les parois froides.

L'évaporation est également favorisée par le vent qui enlève les molécules d'eau de la vapeur qui stagnent au-dessus et risquent de retomber.

L'eau des océans qui s'évapore refroidit la surface de la Terre dont la température est ainsi abaissée de 50 degrés, rendant la vie possible. La vapeur d'eau monte ensuite par convection et se liquéfie en nuages en altitude (voir le cycle de l'eau). Cette liquéfaction dégage alors toute l'énergie absorbée en bas par évaporation. De l'énergie a ainsi été transportée de la surface de la Terre en haut de l'atmosphère par chaleur latente (principe du réfrigérateur).

Remarquons que l'évaporation de l'eau dans l'air est tout à fait analogue à la fusion de la glace dans l'eau salée.

Notons enfin que la vitesse d'évaporation augmente quand la pression atmosphérique diminue, car les molécules d'air forment un couvercle qui renvoie après chocs les molécules d'eau qui s'évaporent vers le liquide ; c'est pourquoi on se déshydrate vite en montagne.

2- Ébullition

Quand la température s'élève suffisamment, il peut se produire des bulles de vapeur à l'intérieur du liquide. C'est l'ébullition, phénomène violent. Quand on chauffe de l'eau, il commence par se produire des petites bulles qui sont dues aux gaz dissous qui s'échappent. L'eau chaude dissout en effet moins d'oxygène, et d'azote que l'eau froide. Ensuite, viennent les grosses bulles contenant de la vapeur d'eau, violentes, qui constituent l'ébullition. L'ébullition nécessite une forte agitation thermique, donc une forte température, car il faut beaucoup de molécules qui se détachent d'un seul coup pour constituer une bulle, la pression ayant tendance à refermer les bulles et à les faire disparaître. Les bulles d'ébullition n'arrivent donc à se former qu'à partir d'une certaine température appelée température d'ébullition et qui dépend de la pression : 100°C pour l'eau à la pression ordinaire. La température reste

alors constante, toute l'énergie apportée est consommée par le changement d'état liquide-gaz, on a le palier d'ébullition.

Une autre manière de dire cela, est de dire que pour qu'une bulle se forme, elle doit prendre de la place, du fait que le volume est multiplié par 1000 quand on passe du liquide au gaz. Cela force la surface libre du liquide à monter, donc à lutter contre la pression. Si la pression augmente, il faut donc une température plus élevée pour que les bulles arrivent tout de même à se former. En effet, la pression contrecarre cette montée de la surface libre du liquide, donc contrecarre la formation des bulles. Cela n'est pas nécessaire dans le cas de l'évaporation, les molécules d'eau se faufilent. La température d'ébullition de l'eau augmente donc avec la pression. Dans une cloche à vide, on peut faire bouillir de l'eau en dessous de 100°C. Réciproquement, dans une cocotte-minute, les aliments cuisent trois fois plus vite, car l'eau à la pression de 2000 hPa bout à 120°C.



Quand la pression s'élève, les molécules dans les bulles, se rapprochent. Mais la température d'ébullition de l'eau augmentant, l'eau liquide se dilate et les molécules du liquide s'éloignent les unes des autres. Il vient un moment où les molécules sont à la même distance moyenne les unes des autres dans le liquide et dans le gaz. Il n'y a plus de distinction possible entre le liquide et le gaz. On a atteint le **point critique**.

Comme la pression diminue avec l'altitude, la température d'ébullition de l'eau également, régulièrement de 1°C tous les 300 m. L'eau bout donc à 99°C en haut de la tour Eiffel et à 84°C en haut du Mont Blanc.

3- Le bouillant de Franklin



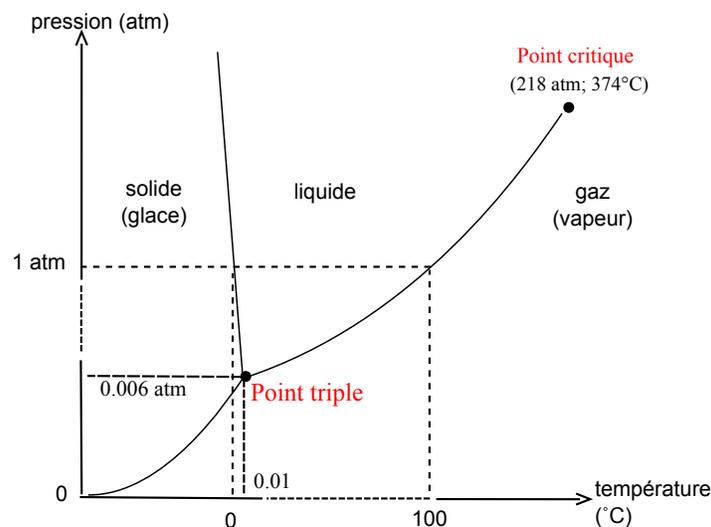
L'éponge mouillée refroidit le ballon. La vapeur d'eau se liquéfie sur les parois en gouttelettes liquides, faisant baisser la pression. L'eau se remet alors à bouillir à une température inférieure à 100°C, ce qui la refroidit très rapidement ; c'est le principe des réfrigérateurs. Si on baisse suffisamment la pression, l'eau peut même bouillir à 0°C, pression du **point triple de l'eau**.

Quand l'eau bout ainsi à basse température, la pression de vapeur est tellement faible qu'on peut faire claquer l'eau. Si on agite de haut en bas le récipient il se forme une bulle de vapeur au niveau du goulot, et cela claque quand elle disparaît.

En dessous de la pression du point triple l'eau liquide ne peut plus exister car elle se met à bouillir dès qu'elle se forme. Seuls les états solides et gazeux peuvent exister. Ainsi, l'existence de l'état liquide nécessite une pression suffisante pour exister. Pour cette raison, l'eau liquide n'existe pas sur la Lune. Sur Mars la pression au sol de l'atmosphère, qui est constituée de CO₂, est celle du point triple de l'eau ; en effet, le CO₂ se dissout dans l'eau liquide et transforme les silicates en carbonates, ce qui le fait disparaître ; le lent dégazage du sol fait remonter sa concentration s'il n'y a pas d'eau liquide. L'ébullition de l'eau, passage de l'état liquide à l'état vapeur correspond à un éloignement des molécules qui s'attirent et nécessite donc de l'énergie (les molécules qui s'attirent pendant qu'elles s'éloignent ralentissent).

Une canette dans laquelle on a fait bouillir de l'eau s'écrase quand on la plonge par l'ouverture dans l'eau liquide : la vapeur se liquéfie, ce qui provoque du vide (le volume est divisé par 1000), et la pression atmosphérique écrase alors la canette.

L'existence de l'état liquide est limitée entre le point triple et le point critique :



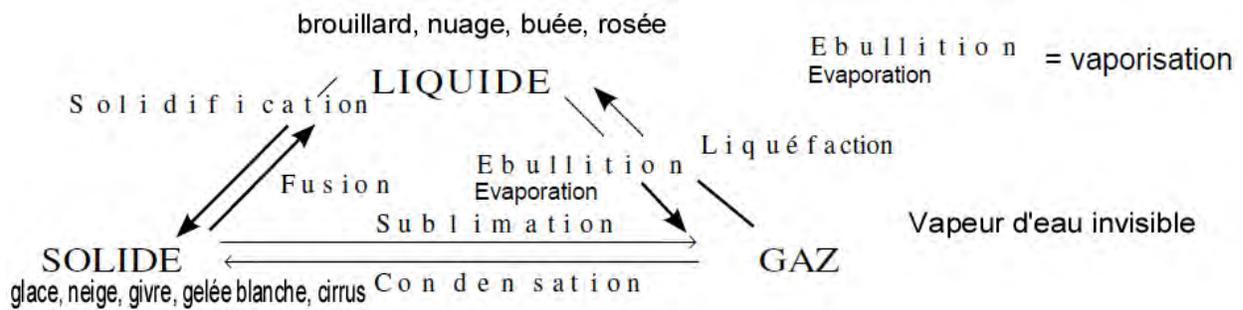
III- COMPLÉMENTS

1- Mélanges homogènes et hétérogènes

Contrairement aux mélanges hétérogènes, dans les mélanges homogènes, le mélange est intime jusqu'au niveau des molécules. On sépare les constituants d'un mélange hétérogène par décantation (et donc centrifugation) ou par filtration. Pour séparer les constituants d'un mélange homogène, il faut avoir recours aux changements d'états. Citons : nuage (hétérogène) air humide (homogène) boue (hétérogène) solution salée (homogène) eau gazeuse pétillante (hétérogène).

2- Rosée, buée, givre, brouillard, nuage

Rappelons le bilan de tous les changements d'états possibles :



La rosée comme la buée sont dues à la liquéfaction de la vapeur d'eau en gouttelettes d'eau liquide sur une paroi froide. Pour la rosée, il s'agit du sol refroidi par rayonnement infrarouge. Pour faire de la buée, il suffit de verser de l'eau très froide dans un verre.

Le givre est la condensation de vapeur d'eau en glace. Il suffit de sortir un objet du congélateur. Il se couvre de givre. On obtient également du givre sur les parois du récipient lors de l'expérience du mélange réfrigérant sel-glace pilée.

Le brouillard, comme le nuage, est constitué non de vapeur d'eau, mais de gouttelettes d'eau liquide de 1 à 10 microns. Seuls les cirrus sont constitués de cristaux de glace ($t < -40^{\circ}\text{C}$). Pour montrer le phénomène, il suffit d'observer le brouillard au-dessus d'une casserole d'eau bouillante dans l'obscurité, dans le faisceau d'un projecteur; les gouttelettes scintillent. Il ne s'agit pas de fumée, car la fumée est constituée de petites particules solides. Dans le cas où il n'y a pas de brouillard au-dessus de la casserole, une petite coupelle placée au-dessus recueille toujours des gouttelettes d'eau. Cette liquéfaction, montre la conservation de l'eau lors de la vaporisation (l'eau ne disparaît pas). Un peu d'eau tiède au fond d'un béccher profond aux parois également tièdes vient se liquéfier sur une plaque de verre posée sur l'ouverture alors que l'on n'a rien vu passer, ce qui prouve que **la vapeur d'eau est invisible**.

3- Différence fusion dissolution

Un solide comme le sucre disparaît dans l'eau. Une balance permet de vérifier que le corps est encore présent dans l'eau. Il ne s'agit pas de fusion mais de dissolution. C'est l'eau qui dissout le sucre, c'est la chaleur qui fait fondre le glaçon. Un glaçon enfermé dans un sac plastique étanche plongé dans l'eau fond, tandis que dans les mêmes conditions, un sucre reste intact. Réfléchir à ce sujet sur la disparition d'un glaçon dans de l'eau légèrement salée à $-0,0000001^{\circ}\text{C}$. Est-ce de la fusion ou de la dissolution? Idem à $+0,0000001^{\circ}\text{C}$ et sans sel.

Les gaz également se dissolvent dans l'eau. Un corps dissous dans l'eau peut être considéré du point de vue moléculaire à l'état liquide. C'est pourquoi une élévation de température augmente la solubilité des solides et diminue celle des gaz.

On peut aussi envisager la « dissolution » d'un liquide dans un autre liquide. Quand elle se fait en toutes proportions, on dit que les deux liquides sont miscibles. Exemple, eau et alcool, Si il y a saturation, les deux liquides se séparent. Exemple, eau et huile. Ainsi, lorsque de l'huile flotte sur l'eau, il y a un peu de molécules d'huile dissoutes dans l'eau, et cette solution d'huile est saturée. Le reste de l'huile ne se dissout pas, et flotte sur l'eau. Idem en permutant huile et eau.

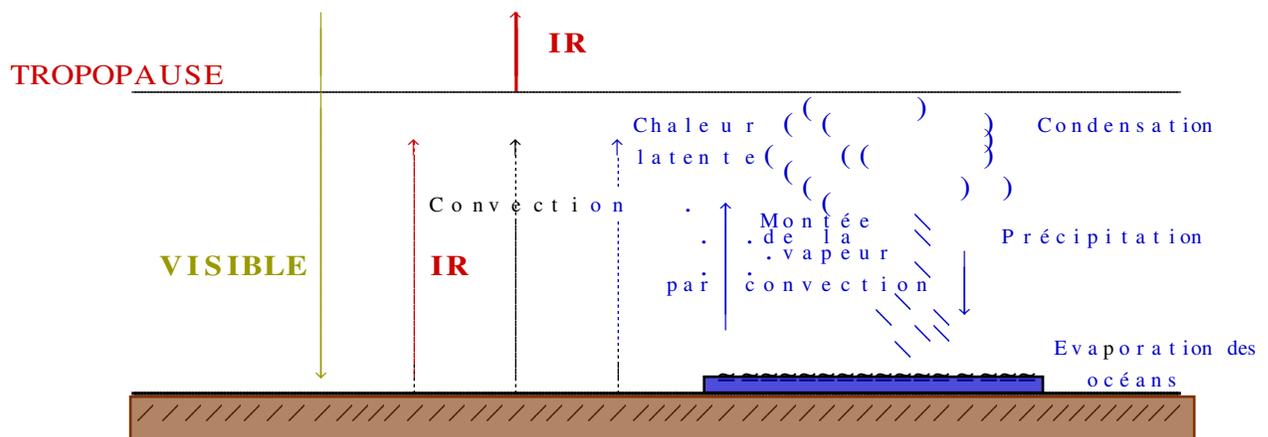
À noter également que la « fusion » de la glace causée par le sel, sans élévation de température, ne peut en fait être une fusion; c'est une dissolution dans le liquide mélange d'eau et de sel (voir question ci-dessus). On voit que du point de vue théorique, la distinction entre fusion et dissolution n'existe pas.

4- Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau fonctionne parce qu'il fait toujours chaud en bas, ceci permettant à l'eau des océans de s'évaporer, et froid en haut, ceci permettant à la vapeur d'eau montée par convection de se liquéfier en eau liquide qui précipite. La Terre est donc en déséquilibre thermodynamique permanent. Ce sont le Soleil et les propriétés de

transparence de l'atmosphère, aux différents rayonnements, qui créent ce phénomène. Le Soleil émet de la lumière visible : température 5780 K, $\lambda = 0,5$ microns. Un calcul montre que la Terre qui reçoit cette énergie devrait, pour maintenir sa température constante émettre vers l'espace de l'infrarouge : $\lambda = 11,33$ micron. Cela correspond avec la loi de Wien à une température de : $T = 5780 \times 0,5/11,33 = 255$ K soit -18°C , température de 33°C plus basse que la température moyenne de la surface de la Terre qui est de 15°C . D'où vient ce réchauffement?

L'atmosphère est transparente à la lumière visible et opaque à l'infrarouge. La lumière solaire atteint donc le sol qu'elle chauffe, tandis que le rayonnement émis par la surface terrestre est piégé. C'est l'effet de serre augmentant la température de la surface terrestre. En conclusion, la lumière du Soleil arrive jusqu'au sol et chauffe ce dernier. Seule la haute atmosphère est capable d'évacuer cette énergie vers l'espace en rayonnant en infrarouge. L'atmosphère est donc chauffée par en bas et refroidie par en haut. L'énergie monte de bas en haut par rayonnement, convection, et chaleur latente.



Indépendamment de son utilité pour donner de l'énergie (barrages EDF) et de l'eau pure sur les continents, le cycle de l'eau est indispensable pour maintenir une température convenable à la surface de la Terre grâce au refroidissement des océans par évaporation. L'effet de serre entraînerait une température moyenne de $50 + 15 = 65^\circ\text{C}$ au sol, sans cet effet de refroidissement. Expérience : Deux thermomètres l'un recouvert d'une feuille noire, l'autre d'une feuille blanche. Le noir symbolise la surface terrestre opaque, le blanc l'atmosphère transparente. Eclairés au Soleil, le thermomètre noir chauffe plus vite parce qu'il absorbe davantage la lumière. Réciproquement, si, ils sont tous les deux chauds, le noir refroidit plus vite, émettant plus d'infrarouge. C'est parce que l'atmosphère est opaque à l'infrarouge, qu'elle est capable d'en émettre.

Expérience de précipitation : On sature de l'eau avec du sel, puis on y verse de l'alcool à 90° . Le sel moins soluble dans le mélange eau alcool précipite. On simule ainsi une précipitation de pluie ou de neige.

La température agréable de la surface terrestre est finalement le résultat d'un équilibre judicieux entre le réchauffement par l'effet de serre, et le refroidissement par l'évaporation.

5- Analogie Bouillant de Franklin et mélange réfrigérant

Lorsque l'eau se met juste à bouillir, il y a autant de molécules qui quittent l'eau liquide vers la vapeur que de molécules qui rentrent depuis la vapeur dans l'eau liquide. Il y a donc équilibre entre l'eau liquide et une bulle de vapeur dans l'eau liquide. Si on diminue la pression, la densité de la vapeur diminue, tandis que la densité du liquide reste la même, car les liquides sont incompressibles les molécules se touchent toujours. On peut encore réaliser l'équilibre, mais comme il y a moins de molécules qui sont dans la vapeur donc qui rentrent dans le liquide, il faut qu'il parte moins de molécules du liquide, On réalise cela en baissant la température. Les molécules s'agitent moins, et il y en a moins qui arrivent à se décrocher pour aller dans la vapeur. Donc, l'équilibre a lieu à plus basse température. Donc la température d'ébullition de l'eau diminue quand la pression diminue, donc aussi diminue avec l'altitude.

Pour l'équilibre eau-glace, la densité de molécules dans l'eau liquide, comme dans l'eau solide, ne dépend pas de la pression, donc la température de fusion ne dépend pas de la pression. Cependant on peut faire diminuer la densité de molécules dans l'eau liquide, donc on peut faire baisser la température de l'équilibre eau glace donc de fusion, en introduisant du sel qui écarte les molécules d'eau. Introduire du sel dans l'eau liquide est équivalent à baisser la pression de la vapeur dans l'équilibre d'ébullition. Dans ces deux cas, on diminue la densité des molécules d'eau : de la vapeur en jouant sur la pression, du liquide en mettant du sel.

Donc la glace (qui ne peut jamais contenir de sel dissous) fond à plus basse température dans l'eau salée.

Quand on fait repartir l'ébullition d'un liquide en faisant chuter la pression, la consommation d'énergie par le changement d'état provoque un brutal refroidissement. C'est le principe de fonctionnement des réfrigérateurs (le liquide bien sûr n'est pas de l'eau). De la même manière, quand on fait repartir la fusion de la glace en la plongeant dans l'eau salée, la température diminue, voilà l'explication du mélange réfrigérant.

6- Gelée blanche, givre, verglas, dans la nature

Il faut différencier ces trois phénomènes typiques de l'hiver. La gelée blanche est un dépôt de glace pulvérulente sur le sol provenant de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant (il s'agit de la rosée quand il y a un dépôt de gouttes d'eau et non de glace) sur le sol refroidi par ciel clair par rayonnement infrarouge.

Le givre est un dépôt de glace provenant de la congélation immédiate (solidification) de gouttelettes de brouillard ou de nuages, en surfusion (liquides alors que leur température est inférieure à 0 °C) dès qu'elles entrent en contact avec des objets dont la surface est à une température inférieure ou légèrement supérieure à 0 °C. On parle de brouillard givrant. Cependant, quand les surfaces sont gelées, un deuxième mécanisme a lieu. Une partie de cette glace provient également de la condensation directe de la vapeur d'eau. En effet, la pression de vapeur en équilibre au-dessus de l'eau liquide est supérieure à celle au-dessus de la glace. Les molécules d'eau sont en effet moins bien attachées dans l'eau liquide que dans la glace. Un brouillard en équilibre est donc sursaturé pour la glace. Les gouttelettes liquides en surfusion s'évaporent donc, et cette vapeur se condense en glace, sous forme de givre, sur les objets froids. C'est ce qu'on appelle l'effet Bergeron qui est aussi à l'origine de la production de neige dans un nuage.

Le verglas est un dépôt de glace, compact et lisse, généralement transparent, provenant de la congélation instantanée de gouttes liquides de pluie ou de bruine surfondues (c'est-à-dire dont la température est inférieure à 0 °C) dès qu'elles entrent en contact avec des objets dont la surface est à une température inférieure ou légèrement supérieure à 0 °C. Les pluies ou bruines verglaçantes génèrent du verglas. On a du verglas lorsqu'il y a le phénomène d'inversion de température. En altitude il pleut car la température est supérieure à 0°C. Au sol, une pellicule d'air froid, donc dense, en dessous de 0°C persiste. Les gouttelettes de pluie entrent en surfusion en traversant cette couche froide.