

RAPPORT DE STAGE

de
Romain Faucher

Expériences sur la formation des nuages

Responsable de stage: Jean-Louis Dufresne

Stage réalisé au

Laboratoire de Météorologie Dynamique

en juin 2006

I-Matériel nécessaire :

Pour un montage que vous pourrez garder et réutiliser à volonté plusieurs années de suite, utiliser le matériel suivant, pour ce montage que nous appellerons le **montage A** :
(la mise en place sera plus compliquée)

- bouteille de soda (style coca....) ou bouteille en verre
- valve de chambre à air de vélo de course
- une pompe à vélo
- une source de lumière assez puissante (projecteur diapo par exemple)
- un paquet d'allumette
- un peu d'eau
- de la colle forte multi usages
- une perceuse

Si vous souhaitez réaliser un montage qu'en peu d'occasions utiliser le matériel suivant, pour ce **montage B** :
(la mise en place est rapide et à porté de tout le monde)

- deux bouteilles de soda (style coca....)
- de la colle forte multi usages
- une source de lumière assez puissante (projecteur diapo par exemple)
- un peu d'eau
- une perceuse

II-Protocole :

1-Mise en place du montage :

Montage A : (durée : 20 à 30min)

Percer un trou dans le bouchon

Placer la valve dans ce trou, la fixer à l'aide de la colle en faisant attention à ce que l'ensemble soit bien hermétique.

Ou bien fixer la valve en la vissant et en utilisant du caoutchouc pour que ce soit hermétique;



comme sur les photos.



Mettre un fond d'eau dans la bouteille
Placer la bouteille devant le projecteur
Refermer



Montage B : (durée : 10 min)

Coller les deux bouchons des bouteilles, dos à dos (si l'on peut dire), avec la colle forte.



Percer ensuite un trou au milieu des bouchons.



Mettre un fond d'eau dans l'une des bouteilles.

Enfin à l'aide du « double bouchon » visser la bouteille vide sur celle contenant un peu d'eau.



Pour les deux montages, il faut réaliser l'expérience dans une pièce sombre où seul le projecteur éclaire afin de bien voir les gouttes.

Et éventuellement amincir le faisceau en mettant un carton percé comme diapositive dans le projecteur de diapo.

2-Expérience :

a-Nous allons dans un premier temps montrer l'apparition d'un nuage :

Montage A :

Une fois la bouteille fermée et placée devant le projecteur, pomper afin d'augmenter la pression dans la bouteille (pour une pompe à main, pomper 6 coups environ).



Attendre quelques minutes que l'équilibre thermique soit atteint.

Dégonfler alors légèrement en appuyant sur la valve pendant une à deux secondes.



On voit grâce au projecteur l'apparition d'une multitude de fines gouttelettes.
Si on remet de la pression elles disparaissent.
Et réapparaissent si on décompresse à nouveau.

Montage B :

Une fois le système fermé et placé devant le projecteur, compresser la bouteille du haut afin d'augmenter la pression dans celle du bas.



Maintenir comprimer quelques instants afin que l'équilibre thermique soit atteint.
Lâcher, c'est à dire décompresser.
On voit grâce au projecteur l'apparition d'une multitude de fines gouttelettes.
Si on remet de la pression elles disparaissent.
Et réapparaissent si on décompresse à nouveau.

b-Rendons ce nuage plus lumineux!

Montage A et B :

Ouvrir la bouteille (après avoir bien décompressé pour éviter que le bouchon ne saute !)
Allumer une allumette, puis l'éteindre et laisser la fumée s'échapper dans la bouteille, et refermer rapidement. (même si une grande partie de la fumée n'est pas rentrée ne vous inquiétez pas ça devrait fonctionner)
Maintenant pomper *ou appuyer sur la bouteille* afin d'augmenter la pression.

Attendre quelques instants que l'équilibre thermique se fasse.

Décompresser en appuyant sur la valve *ou en lâchant la bouteille* alors légèrement pendant une à deux secondes.

Et là que voit-on ? (dans la lumière)

Le même petit nuage que précédemment mais plus lumineux. Les gouttes formées semblent plus petites que précédemment car on ne les voit pas individuellement. On voit un brouillard.

Si on comprime à nouveau, le nuage s'en va.

Puis on décompresse et il réapparaît !

En refaisant ceci plusieurs fois, il va y avoir lessivage des aérosols (ici la fumée) toutes les particules vont se déposer dans l'eau et l'on observera plus ce beau nuage lumineux mais on retrouvera les gouttelettes du début, moins nombreuses mais plus grosses.

III-Explications :

1-Dans notre première expérience :

Après avoir gonflé on attend quelques instants afin que le système air/eau/bouteille soit à l'équilibre thermique.

Cet ensemble est alors à la même température ; et de l'eau s'évapore dans la bouteille jusqu'à ce qu'il y ait saturation en humidité.

Lorsque l'on décomprime, la pression à l'intérieur de la bouteille baisse, et donc sa température aussi car les deux sont liées comme nous le verrons plus loin.

De plus la quantité d'eau à la saturation, donc la pression de vapeur saturante baisse avec la température (nous le verrons aussi).

Cette baisse de température a pour effet la condensation de la vapeur d'eau ; on obtient ainsi des gouttelettes que le projecteur fait apparaître.

2-Lorsque l'on crée notre « petit nuage », on ajoute de la fumée.

On ajoute en fait plus d'impuretés, dans l'air de la bouteille.

Ces impuretés vont jouer le rôle de noyaux de condensation (c'est comme cela que l'on dit).

C'est-à-dire que nos gouttelettes vont se former autour de ces noyaux de condensation, et si le nombre de ces noyaux est important, il se forme alors beaucoup plus de fines gouttes que l'on ne voit plus de façon individualisée, mais on voit apparaître notre petit nuage blanc !

IV-Analogies :

1-Exemple de la vie quotidienne de cette condensation :

Tout simplement ce que l'on appelle couramment « de la vapeur d'eau »; que l'on observe au bec d'une bouilloire ou au dessus d'une tasse chaude.

C'est en fait un « mini nuage », ce n'est pas de la vapeur d'eau car celle ci est un gaz et est donc incolore on ne peut donc pas la voir.

C'est donc en fait un petit nuage de gouttelettes.

Mais celui ci est dû à un mélange air chaud/air froid, et non pas à une détente adiabatique comme cela se passe pour la formation des nuages dans l'atmosphère, comme nous allons le voir.

2-D'un point de vue atmosphérique:

Le phénomène observé dans la bouteille est analogue à la formation des nuages dans l'atmosphère.

En effet, l'air est humidifié par évaporation de l'eau contenue dans le sol, les feuilles ou de l'eau de mer.

Lorsque cet air s'élève; par différents phénomènes comme la convection, l'ascendance forcée (par le relief)...etc; sa pression et sa température diminuent.

Arrivé à un refroidissement suffisant pour être au point de saturation, il y a condensation et formation de nuages (grâce aux impuretés d'aérosols contenus dans l'atmosphère).

Les aérosols, qui sont utiles à la formation des nuages, ont un rôle important au niveau climatique. En effet, un accroissement des aérosols (aérosols sulfate notamment) entraîne une modification du nuage, ce qui va induire un refroidissement du système climatique. Cet effet est appelé l'effet indirect des aérosols.

Le phénomène de lessivage dont nous avons succinctement parler précédemment est lui aussi présent dans l'atmosphère.

En effet, lorsqu'il pleut on peut s'apercevoir qu'il y a des résidus sur les voitures. Ce sont les noyaux de condensation, c'est à dire les aérosols, que l'on observe comme résidus.

En fait il se passe comme dans notre système, plus on réalise l'expérience plus les gouttes qui forment le nuage vont tomber et plus les noyaux de condensation vont se déposer soit sur les parois de la bouteille soit au fond de la bouteille dans l'eau. Il y aura donc moins de noyaux pour rendre notre nuage plus lumineux et l'on verra à nouveau réapparaître les gouttes individuellement et non plus un brouillard. Il se passe la même chose dans l'atmosphère

V-Allons un peu plus loin :

1. Montrons que la pression diminue bien avec l'altitude.

-L'équation d'équilibre hydrostatique donne:

$$\vec{\nabla} P = \rho \vec{g} \Leftrightarrow (\partial p / \partial z) = -\rho \vec{g}$$

en considérant l'atmosphère comme un gaz parfait on a: $P = \rho R' T$

qui est l'équation d'état des gaz parfaits tel que $R' = R/M$ où R est la constante des gaz parfait égale à $8,3 JK^{-1} mol^{-1}$ et M la masse molaire de l'air égale à $28,966 g.mol^{-1}$

ainsi $R' = 287 m^2 s^{-2} K^{-1}$

On a ainsi : $\partial P / \partial z = -Pg / R' T$

On peut tout d'abord faire l'approximation que l'atmosphère est isotherme.

En intégrant avec comme condition aux limites : en $z=0$, $P=P_0$ et en prenant T constant (car ici hypothèse isotherme) et égal à $15^\circ C$ c'est à dire 288Kelvin.

on a: $P = P_0 \exp(-(zg)/R' T)$

cette relation montre bien que la pression P diminue avec l'altitude z.

Mais comme on l'a dit précédemment, la température diminue aussi avec l'altitude ; on va donc considérer T comme une fonction décroissante de l'altitude : $T = T_0 - az$

où T_0 est la température à $z=0$ et où a est une constante que l'on peut déterminer à l'aide de situations empiriques.

On a toujours : $\partial P / \partial z = -\rho g$

mais désormais l'équation d'état des gaz parfaits est: $P = \rho R' (T_0 - az)$

d'où:

$$\partial P / \partial z = -(Pg) / R' (T_0 - az) \Leftrightarrow dP / P = -gdz / R' (T_0 - az)$$

$$\Rightarrow \ln P = (g/aR') \ln(T_0 - az) + K$$

à $z=0$ $P=P_0$ d'où

$$K = \ln P_0 - (g/aR') \ln T_0$$

donc:

$$\ln(P/P_0) = (g/aR') \ln((T_0 - az)/T_0) \Leftrightarrow P = P_0 ((T_0 - az)/T_0)^{(g/aR')}$$

$$\Leftrightarrow P = P_0 (1 - az/T_0)^{(g/aR')}$$

On voit que P est toujours une fonction décroissante de z.

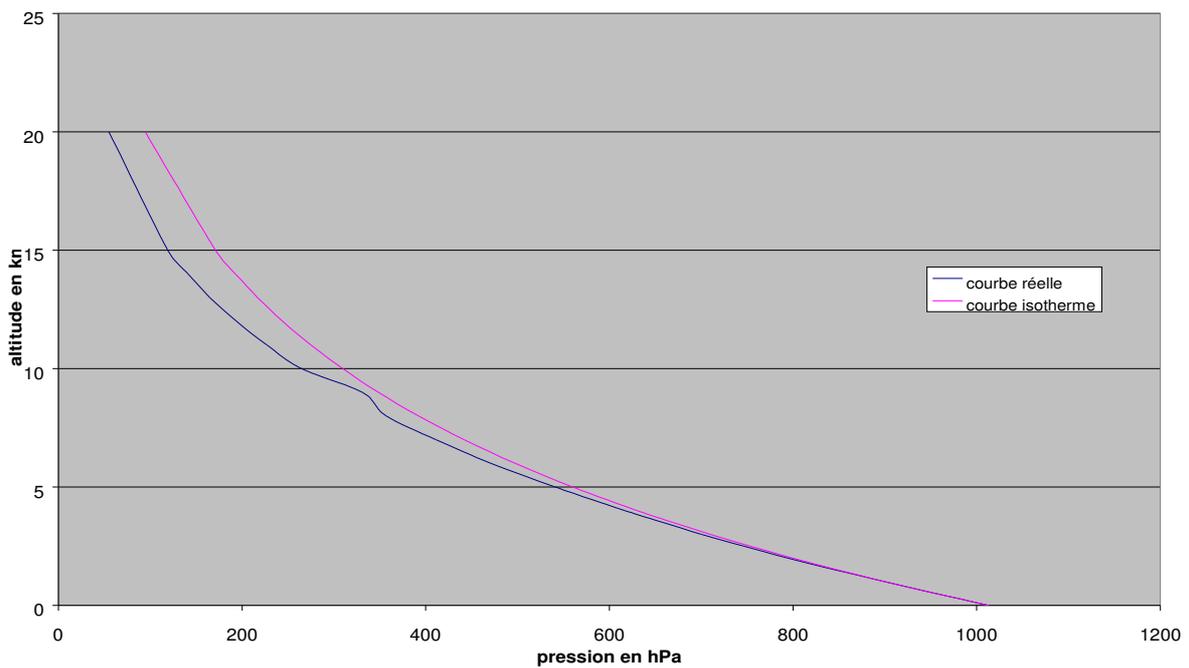
Par un développement limité, on peut vérifier que l'on retombe sur le résultat précédent lorsque $a \rightarrow 0$.

On a donc montré que quand l'altitude z augmente, T et P diminuent.

Voici un tableau de valeurs altitude/pression/température:

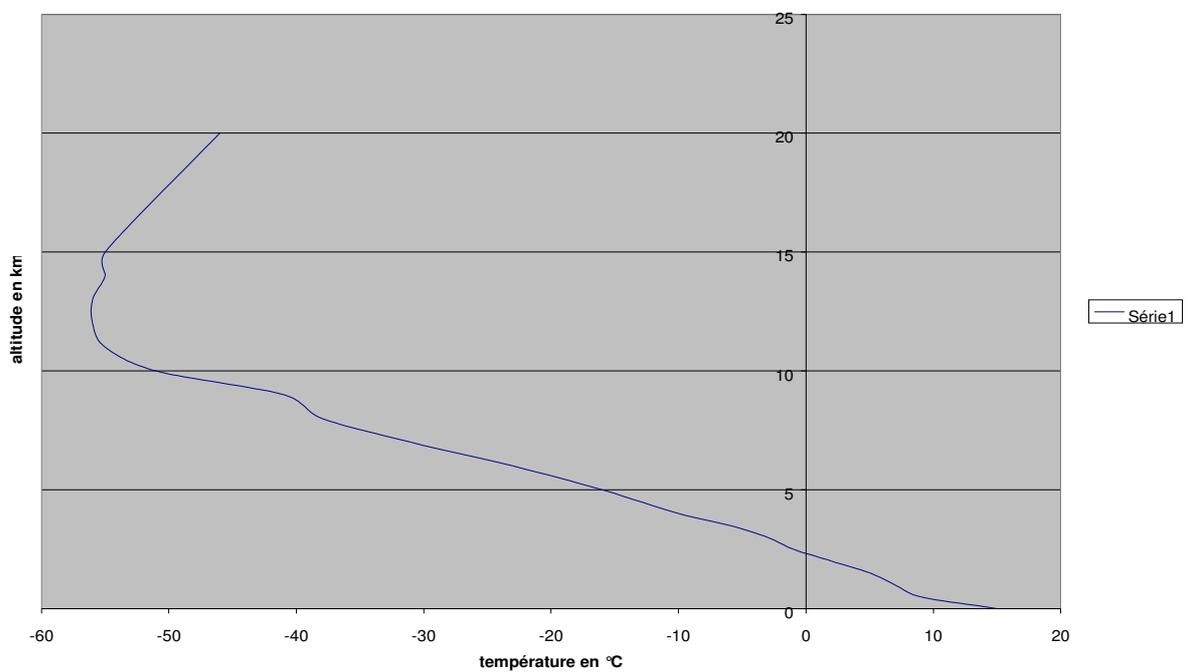
altitude (km)	pression (hPa)	température (°C)
0	1013	15
0,5	955	9
1	900	7
1,5	845	5
2	794	2
2,5	746	-1
3	700	-3
3,5	658	-6
4	617	-10
5	541	-16
6	471	-23
7	411	-31
8	357	-38
9	331	-41
10	265	-51
11	227	-55
12	194	-56
13	165	-56
14	141	-55
15	119	-55
20	55	-46

La courbe ci-dessous donne l'altitude en fonction de la pression :



D'après le tableau et la courbe correspondant ci-dessous, on remarque que l'hypothèse isotherme est une bonne approximation pour $z \in [10\text{km}, 15\text{km}]$.

Et on voit que l'hypothèse $T = T_0 - az$ est une bonne approximation pour $z \leq 10$, zone qui nous intéresse car c'est dans cette partie de l'atmosphère que se forment les nuages.



Nous avons effectué des mesures de températures au sein même de la bouteille et nous trouvons les résultats suivant :

- avant compression 29.1°C
- pendant la compression cela monte jusqu'à 31.2°C
- lorsque l'on relâche on a 28.8°C puis la température revient très rapidement à sa température de départ de 29.1°C.

On voit que la température varie d'une manière plutôt significative même si nous avons des pertes de température lors de la mesure, on s'aperçoit que la pression (liée à la température) va elle aussi varier d'une façon significative.

2. Les différents phénomènes de condensation dans l'atmosphère

a-condensation par détente adiabatique

La détente adiabatique est la principale cause de condensation donc de formation des nuages dans l'atmosphère. De plus c'est typiquement ce qui se passe dans notre bouteille.

On suppose que la détente, qui a lieu dans la bouteille, est une détente adiabatique, c'est à dire sans échange de chaleur avec l'extérieur ; on a ainsi : $\delta Q = 0$

Soit un volume d'air qui au cours d'une transformation adiabatique subit une variation de pression dP et de température dT .

le premier principe de la thermodynamique donne:

$$dU = \delta Q + \delta W \Leftrightarrow dU = \delta W = -PdV$$

or $dU = C_v dT$

à l'aide de la relation de Mayer: $C_p - C_v = nR$ où n est le nombre de moles et R la constante des gaz parfaits.

et en posant: $\gamma = C_p / C_v$ qui est le coefficient de Laplace

on trouve: $C_v = nR / (\gamma - 1)$

donc: $(nR / (\gamma - 1)) dT = -PdV$ (1)

Avec l'hypothèse des gaz parfaits: $PV = nRT \Rightarrow PdV + VdP = nRdT$ (2)

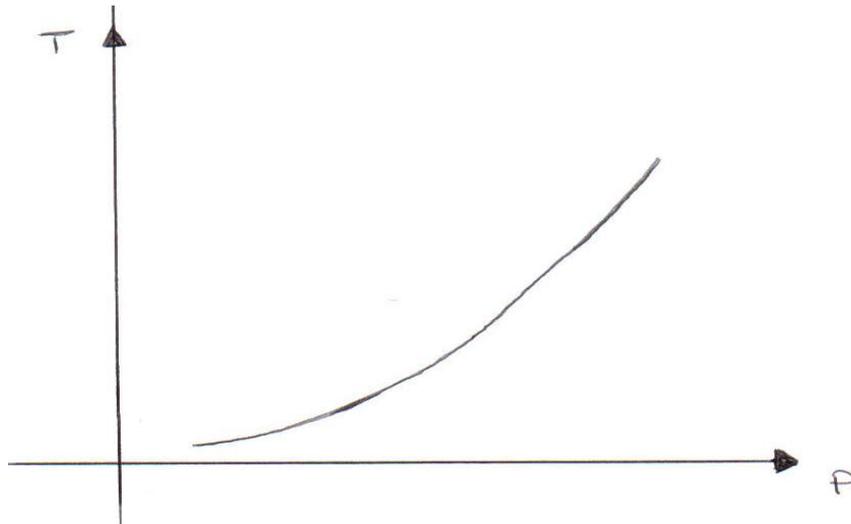
Ainsi (1) devient: $(PdV + VdP)/(\gamma - 1) = -PdV \Leftrightarrow PdV + VdP = (1 - \gamma)PdV$

$$\Leftrightarrow dP/P = -\gamma dV/V$$

$$\Rightarrow \ln(PV^\gamma) = C^{te} \Rightarrow PV^\gamma = C^{te}$$

ce qui revient à écrire avec l'équation d'état des gaz parfaits: $T^\gamma P^{(1-\gamma)} = C^{te}$ (3)

D'où une courbe de la forme:



De là on peut montrer que le gradient thermique verticale adiabatique est constant.

Par définition, le gradient thermique verticale adiabatique est la variation de température de l'air avec l'altitude.

En utilisant :

-la relation (3) précédente $P^{(1-\gamma)} T^\gamma = C^{te}$

d'où $(1-\gamma)(dP/P) + \gamma(dT/T) = 0 \Leftrightarrow dP/P = (\gamma/(\gamma-1))(dT/T)$

-l'hypothèse hydrostatique $\vec{\nabla} P = \rho \vec{g} \Leftrightarrow (\partial p / \partial z) = -\rho g$

-et l'équation d'état des gaz parfaits $P = \rho RT$

On trouve directement :

$$-\rho g dz / \rho RT = (\gamma/(\gamma-1))(dT/T) \quad \Leftrightarrow dT/dz = -g/(\gamma-1)/\gamma R$$

Ce rapport négatif exprime par sa valeur absolue la « rapidité » avec laquelle la température d'une parcelle d'air varie verticalement lors d'une transformation adiabatique.

Numériquement, ce rapport est proche de : $-0.976 \cdot 10^{-2} \text{ K.m}^{-1}$

On peut ainsi considérer qu'il y a une perte de 1°C tous les 100m.

b-Condensation par refroidissement isobare

L'ascendance verticale qui provoque cette détente adiabatique n'est pas le seul phénomène qui permet le refroidissement de l'air et la saturation de la vapeur d'eau. En effet, la formation de la rosée ainsi que la formation du brouillard ne sont pas dues à une détente adiabatique.

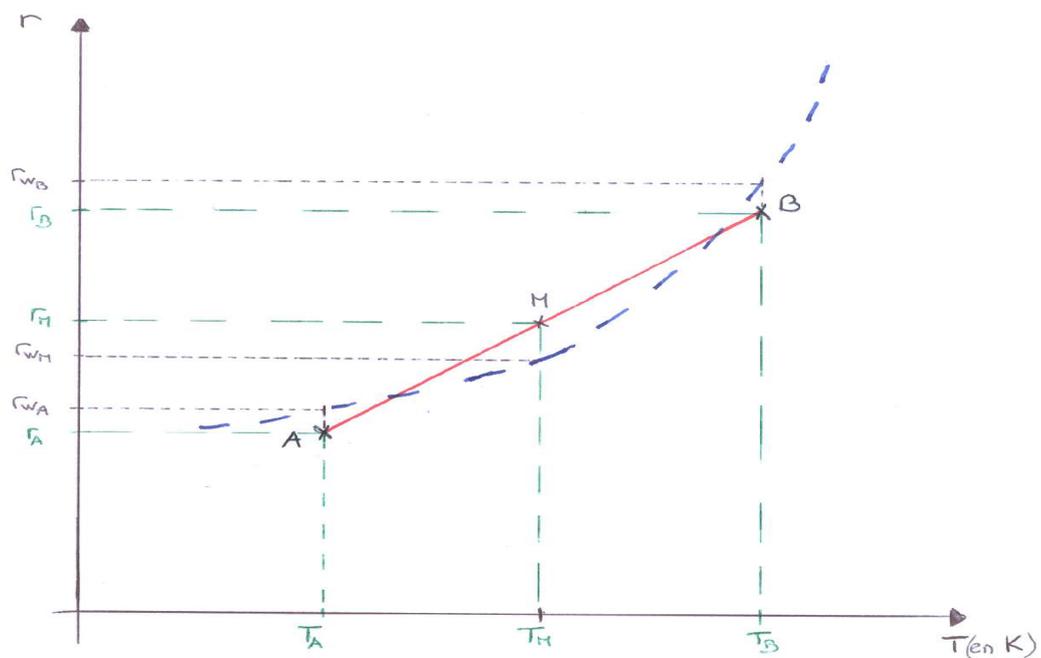
Leur formation se déroule en fait comme suit :

il faut un ciel dégagé quand le soleil se couche, alors la température de l'air et celle de surface vont diminuer. Si durant la nuit l'air proche de la surface diminue suffisamment pour atteindre le point de rosée alors il y aura formation de brouillard ou de rosée.

Le point de rosée est la température à laquelle, tout en gardant une pression constante, l'air devient saturé en vapeur d'eau. Il peut aussi être défini comme la température à laquelle la pression de vapeur serait égale à la pression de vapeur saturante.

c-Condensation par brassage

Certains processus turbulents au voisinage du sol, ou à proximité de zones de vent fort, brassent des particules d'air d'humidités différentes. Sans explications compliquées, on peut comprendre ce phénomène avec l'exemple suivant. Le mécanisme de condensation à pression constante illustré par la figure suivante est à l'origine de certains brouillards (appelés brouillard de mélange) et de certains nuages ; c'est aussi ce phénomène de brassage qui crée le « petit nuage » au dessus d'une bouilloire par exemple.



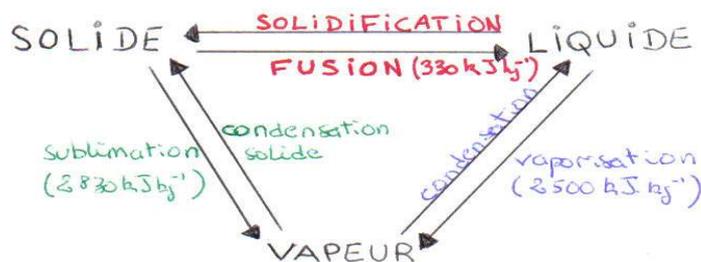
De l'air « froid » non saturé, caractérisé par une température T_A et un rapport de mélange r_A , est mélangé à de l'air plus chaud, également non saturé, caractérisé par une température T_B et un rapport de mélange r_B .

L'état thermodynamique de l'air est représenté sur un diagramme (r,T), la courbe bleue en pointillés étant la courbe des rapports de mélanges saturants en fonction de la température.

Si on suppose que le mélange de l'air A avec l'air B se trouve approximativement dans l'état caractérisé par la température $T_M = (T_A + T_B)/2$ et le rapport de mélange associé $r_M = (r_A + r_B)/2$, le mélange sera saturé car $r_M > r_w(T_M)$.

Il y aura alors condensation.

3. Notions de changements de phases et de vapeur saturante:



Dans l'atmosphère terrestre l'eau est sous 3 phases: vapeur, liquide, solide.

Lorsque l'air est humide la pression atmosphérique totale P est la somme de la pression de l'air sec notée P_a et de la vapeur d'eau notée P_v d'où : $P = P_a + P_v$

A l'aide de l'équation des gaz parfaits, on montre que :

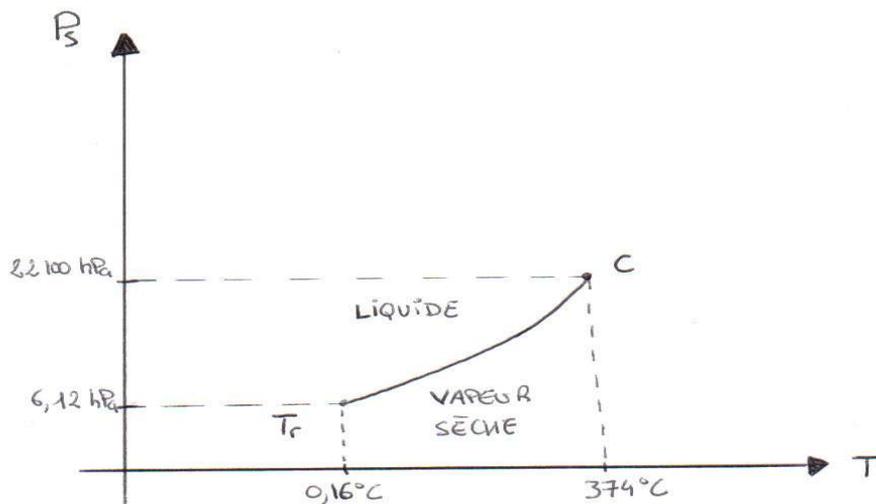
$$RT = P_a / n_a = P_v / n_v = P / (n_a + n_v) = (P_a + P_v) / (n_a + n_v)$$

$$\Rightarrow P_a = n_a P / (n_a + n_v) \quad \text{et} \quad P_v = n_v P / (n_a + n_v)$$

Remarque: le baromètre, ou le capteur de pression, mesurent la pression atmosphérique totale.

On définit la pression de vapeur saturante comme la pression partielle de la vapeur d'eau en équilibre avec une surface plane d'eau. Lorsque l'on se situe à la pression de vapeur saturante, si l'on rajoute de la vapeur d'eau elle se condense sous forme liquide ; si au contraire on retire de la vapeur d'eau, de l'eau liquide va s'évaporer.

Voilà sa courbe:



A la température T si :

$P_v < P_s \Rightarrow$ la vapeur est dite sèche

$P_v = P_s \Rightarrow$ la vapeur est saturante (équilibre vapeur/liquide)

$P_v > P_s \Rightarrow$ l'eau est liquide

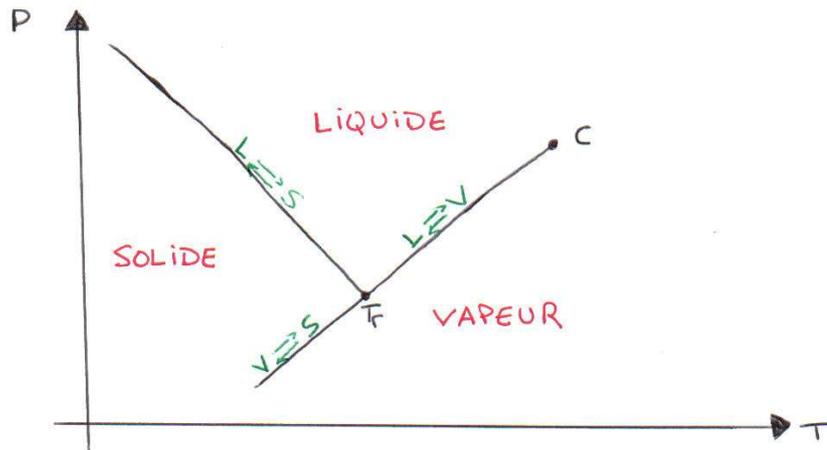
Il existe une relation empirique donnant l'expression littérale de pression de vapeur d'eau saturante en fonction de T ; c'est la relation de Tétens valable dans l'atmosphère:

$$P_s(T) = 6.107 * 10^{(aT/(T+b))}$$

où T est en °C, P_s en hPa

$$a = 7.5 \quad b = 237.3 \text{ °C}$$

On peut donner un graphe P(T) plus général pour l'eau:



où $L \Leftrightarrow V$ correspond à l'équilibre liquide/vapeur

$L \Leftrightarrow S$ correspond à l'équilibre liquide/solide

$S \Leftrightarrow V$ correspond à l'équilibre solide/vapeur

4. Lumière sur notre nuage.

Expliquons pourquoi notre petit nuage de la deuxième manipulation est plus lumineux.

En fait, pris individuellement une « grosse » goutte est plus lumineuse qu'une « petite ». Mais pour une même masse d'eau, en nombre il y a moins de « grosses » gouttes que de « petites ». Et cette multitude de « petites » gouttes va rendre l'ensemble, c'est à dire le nuage, plus lumineux.

Cela est dû à des propriétés optiques et notamment à l'épaisseur optique τ , qui est définie comme suit pour une population de gouttes :

$$\tau = \iint \pi r^2 Q_{ext}(r) n(r) dr dz$$

où Q_{ext} est le facteur d'extinction

et $n(r)$ est la population de goutte de distribution en taille de rayon r

Nous allons approximer Q_{ext} à une constante notée Q .

De plus, on va considérer une masse d'eau condensée fixée et une population de gouttes à rayon lui aussi fixé r , ainsi on peut éliminer l'intégrale en r et $n(r)$ devient :

$$n(r) = m_{eau} / (\rho_{eau} V_{goutte}) \simeq C / r^3$$

où m_{eau} est la masse d'eau condensée totale fixée

ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau

$V_{goutte} = (4/3)\pi r^3$ est le volume d'une goutte de rayon r fixé

$C = 3 M_{eau} / (\rho_{eau} 4 \pi)$ est une constante

L'intégrale de vient : $\tau = \int (\pi r^2 Q C dz) / r^3 = (\pi Q C z) / r$

On voit alors que, pour une masse donnée et pour une population de gouttes de même rayon r , plus les gouttes seront petites, c'est à dire plus r petit, plus τ sera grand.

Et donc plus τ est grand plus la population de gouttes c'est à dire le nuage, est lumineux.

5. Microphysique des nuages

« Poussons le bouchon un peu plus loin! », nous allons maintenant nous intéresser plus proprement dit à la microphysique des nuages (chaud car plus simple).

Tout d'abord pour avoir une idée de ce qu'est la microphysique des nuages donnons quelques ordres de grandeurs:

- $< 1 \mu\text{m}$: aérosols, noyaux de condensation
- quelques μm : gouttelettes
- mm: gouttes
- $> 1\text{cm}$, jusqu'à plusieurs centaines de mètres: turbulence.

Pourquoi allons nous étudier ici les nuages chauds? Et bien parce qu'il s'agit de nuages sans glace. Même si la glace joue un rôle primordiale dans les phénomènes de précipitation (surtout dans les pluies fortes), on va se contenter des nuages chauds c'est à dire où seulement deux phases (et non 3 comme pour les nuages froids) coexistent, ce qui simplifiera les choses ici.

Nous allons dans la suite parler de la formation des gouttelettes au sein d'un nuage en utilisant la thermodynamique.

Soit un système à l'équilibre contenant différents types de particules i présentes en quantité n_i , on définit directement la variation d'enthalpie libre (ou énergie de Gibbs) par :

$$dG = VdP - SdT + \sum \mu_i dn_i$$

car $G = U - TS + PV + \sum \mu N$ où S est l'entropie et μ le potentiel chimique

Dans notre nuage chaud on ne considère que deux phases, une phase liquide notée L, et, une phase gazeuse notée V comme vapeur.

Donc en particulierisant notre système on peut écrire:

$$dG_L = -S_L dT + V_L dP + \mu_L dn_L$$

et

$$dG_V = -S_V dT + V_V dP + \mu_V dn_V$$

De plus, soit σ_{LV} l'énergie de surface liquide-vapeur, alors la variation infinitésimale de l'enthalpie libre à la surface liquide-vapeur est donnée par :

$$dG_{surface} = \sigma_{LV} dA \quad \text{où } A \text{ est l'aire}$$

La variation d'enthalpie libre totale de notre système est donc :

$$\Delta G = dG_L + dG_V + dG_{surface}$$

en considérant que l'on est à température et à pression constante, et que le système est fermé c'est à dire que $dn_L + dn_V = 0$, on obtient directement :

$$\Delta G = \sigma_{LV} dA + (\mu_L - \mu_V) dn_L$$

Nous sommes donc dans un système fermé en équilibre thermodynamique à la température T , et dont la vapeur est à la pression P . On considère que ce système contient une gouttelette liquide de rayon r constituée de X moles. La variation d'enthalpie libre due au passage de l'état de phase seulement gazeux à celui de phase gaz et phase liquide de rayon r est donnée par :

$$\Delta G = (\mu_L - \mu_V) X + 4\pi r^2 \sigma_{LV} \quad \text{car } dn_L = X \text{ et } dA = 4\pi r^2 \text{ (gouttelette=sphère)}$$

on a :

$$(4\pi/3)r^3 = M/(\rho X) \quad (a)$$

où ρ est la masse volumique de la phase liquide,

M est la masse molaire du constituant des phases,
 et N_a est le nombre d'Avogadro.

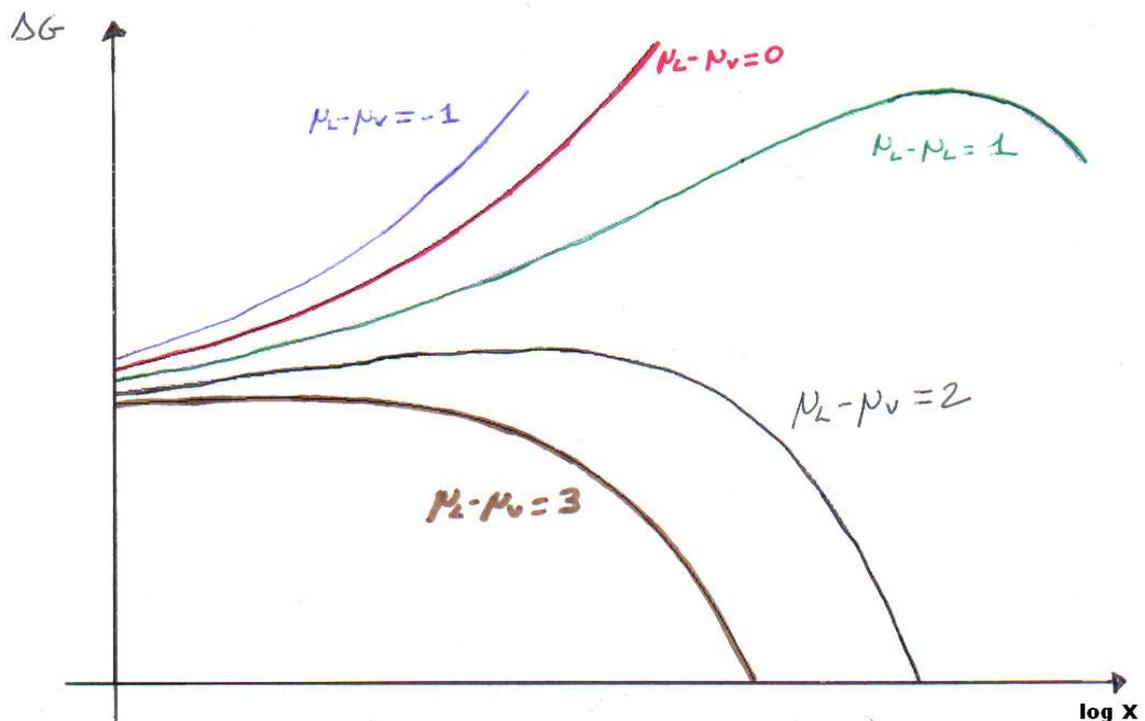
ainsi $r^2 = 1/(4\pi)^{(2/3)} * (3M/\rho)^{(2/3)} * X^{(2/3)}$

donc $4\pi r^2 = (4\pi)^{(1/3)} * (3M/\rho)^{(2/3)} * X^{(2/3)}$

la variation d'enthalpie libre devient alors en posant $\alpha = (4\pi)^{(1/3)} * (3M/\rho)^{(2/3)}$ (b) :

$$\Delta G = (\mu_L - \mu_V)X + \alpha X^{(2/3)} \sigma_{LV}$$

La figure ci-après donne l'allure de ΔG en fonction de $\log X$ pour différentes valeurs de $\mu_L - \mu_V$:



Il faut savoir qu'un système isolé tend à minimiser ΔG .

Il est clair graphiquement que lorsque $\mu_L - \mu_V > 0$, ΔG atteint un maximum d'autant plus petit que $\mu_L - \mu_V$ est grand.

Ce maximum correspond donc à un équilibre instable de la goutte et peut être associé à une taille critique X_c .

Ainsi, une gouttelette qui se formerait et qui dépasserait cette taille critique verrait son enthalpie libre décroître et donc continuerait à grossir indéfiniment.

Par contre une gouttelette qui se forme et dont la taille critique est inférieure à X_c tend à disparaître.

De manière opposée, si l'on se situe dans le cas où $\mu_L - \mu_V \leq 0$, les gouttelettes qui se forment dans la phase gazeuse sont toujours condamnées à disparaître (thermodynamiquement).

Cherchons explicitement le rayon critique r_c , qui correspond au max de ΔG , nous allons donc différencier l'expression de ΔG par rapport à X_c :

$$0 = \mu_L - \mu_V + (2/3)\alpha\sigma_{LV}X_c^{(-1/3)}$$

ainsi, en utilisant les relations (a) et (b) on trouve :

$$0 = \mu_L - \mu_V + (2M/N_a\rho r_c)\sigma_{LV} \quad (1)$$

On voit avec cette équation que si $\mu_L - \mu_V > 0$ alors r_c sera positif et donc le rayon de la gouttelette aura la possibilité de croître.

En revanche si $\mu_L - \mu_V \leq 0$ alors r_c sera négatif et aucune gouttelette ne pourra exister (car un rayon ne peut pas être négatif).

On va maintenant exprimer $\mu_L - \mu_V$ en utilisant l'équation des gaz parfaits afin d'obtenir une relation entre r_c et la pression de vapeur saturante P_s .

On suppose dans un premier temps que μ_L ne dépend pas de P.

On sait de plus que lorsque la pression de la phase vapeur est égale à la pression saturante P_s , on a : $\mu_L = \mu_V(P_s)$.

$$\text{En somme on obtient } \mu_L - \mu_V = \mu_V(P_s) - \mu_V(P) \quad (2)$$

De surcroît, par définition de μ , on a : $\mu_V = (\partial G_V / \partial n_V)_{(T,P)}$

$$\text{Ainsi : } (\partial \mu_V / \partial P)_T = (\partial (\partial G_V / \partial P)_{(P,T)} / \partial n_V)_T \quad (3)$$

$$\text{or } (\partial G_V / \partial P) = V \quad (4)$$

donc (3) devient en utilisant $PV = nRT$ et (4) : $(\partial \mu_v / \partial P)_T = RT/P$

Par intégration on trouve : $\mu_v(T, P) = \mu_v(T, P_s) + RT \ln(P/P_s)$

A une température donnée on peut ainsi écrire (2) sous la forme :

$$\mu_L - \mu_v = -RT \ln(P/P_s) \quad (5)$$

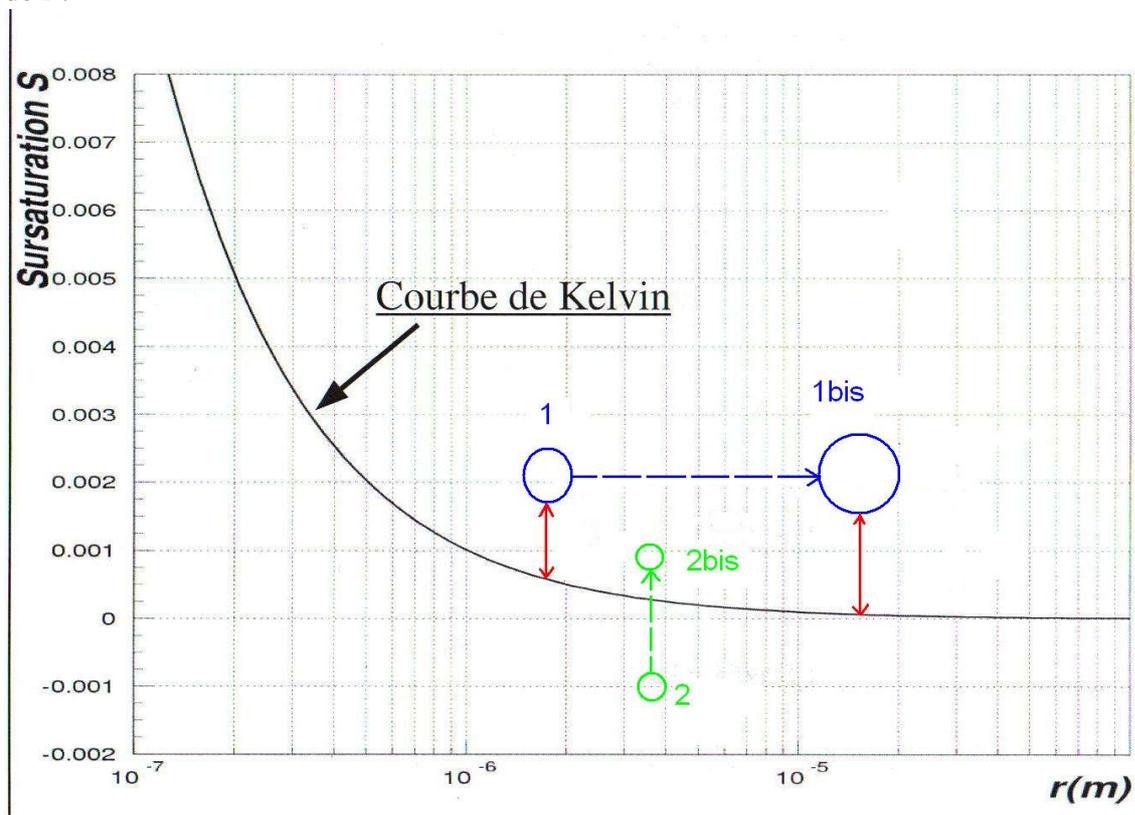
En utilisant cette relation (5), on trouve que l'équation (1) devient :

$$\ln(P/P_s) = 2M\sigma_{LV} / (N_a \rho r_c RT)$$

cette dernière relation s'appelle relation de Kelvin.

On peut définir la sursaturation : $S = P/P_s - 1$

On peut ainsi donnée, ci-après, la courbe de sursaturation d'une goutte d'eau pure en fonction de r :



Plaçons nous à un rayon r donné, si la sursaturation est au dessus de la courbe, la goutte aura tendance à grossir indéfiniment. On a ainsi la même conclusion que lorsque $\mu_L - \mu_V > 0$ et que ΔG atteint un maximum, la goutte qui dépasserait la taille critique associée à ce maximum de ΔG aura tendance à grossir indéfiniment.

Par contre si on se trouve en dessous de la courbe la goutte aura tendance à s'évaporer donc à ne pas exister. On aboutit ici à la même conclusion que lorsque $\mu_L - \mu_V \leq 0$, la goutte va se former en phase gazeuse et va avoir tendance à s'évaporer.

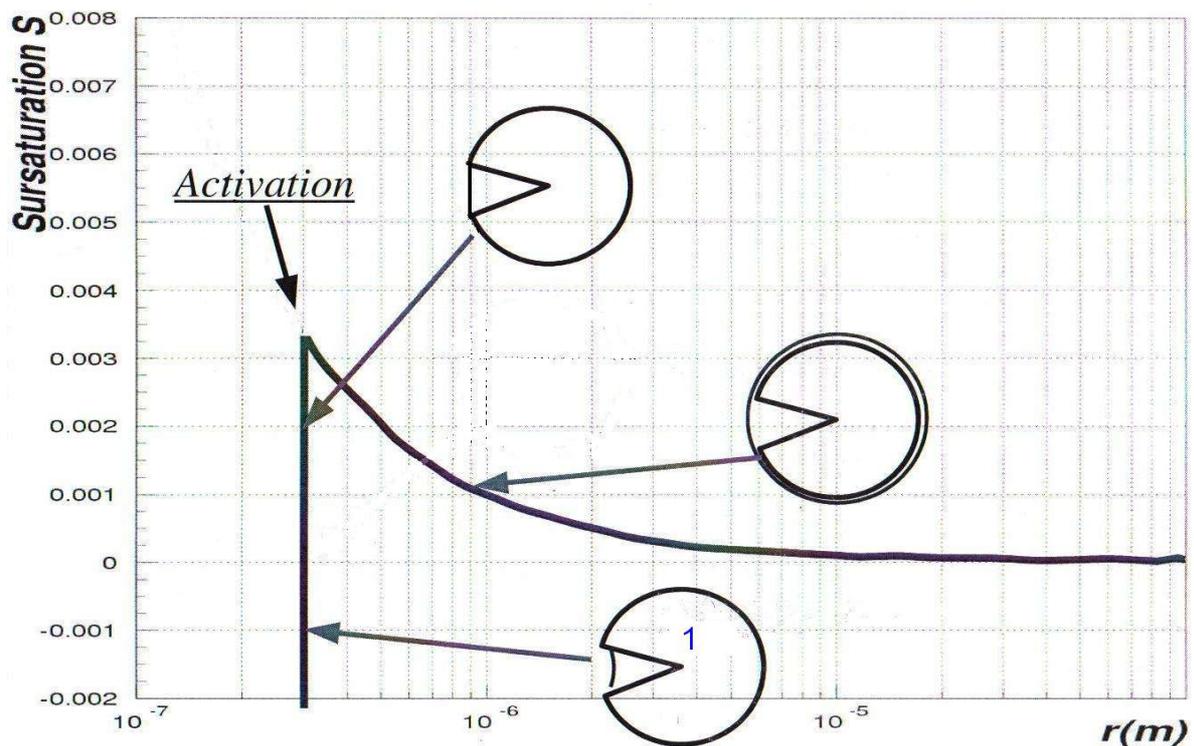
Pour expliquer cela plus précisément prenons par exemple une goutte d'eau 1 de rayon r donné à sursaturation fixée au dessus de la courbe. A sursaturation constante, on s'aperçoit que plus la goutte croît plus l'écart à la courbe augmente. Donc moins la sursaturation nécessaire est élevée. Ainsi plus la goutte grossit facilement.

Par contre si on se place d'une goutte 2 en dessous de la courbe. Pour qu'elle grossisse, il est nécessaire d'augmenter la sursaturation pour qu'elle passe au dessus de la courbe (c'est à dire d'un rayon critique), et puisse ensuite grossir à sursaturation constante.

Regardons maintenant l'effet d'aérosols sur la formation des gouttelettes.

On va regarder sur les graphiques suivants, l'activation des gouttelettes pour deux aérosols, un aérosol minéral tout d'abord puis un aérosol sulfate.

ACTIVATION D'UNE GOUTTELETTES PAR UN AEROSOL MINERAL



Le sommet de la courbe correspond à un seuil d'activation, ce qui signifie qu'une fois passé ce seuil les gouttelettes vont grossir.

Ce seuil correspond à un rayon critique au-dessus duquel la gouttelette est dans un état instable et croît.

On s'aperçoit que la sursaturation nécessaire pour que la goutte continue de grossir diminue.

De plus l'utilité d'aérosols minéraux est qu'il ne suffit que d'un peu d'eau pour qu'un rayon se crée comme montre le noyau de condensation 1 et que par la suite la gouttelette suive l'évolution vu précédemment.

En présence d'un soluté, pour N_s molécules de soluté et N_e molécules d'eau, la pression de vapeur est diminuée d'un facteur $N_e/(N_e + N_s) \approx (1 - N_s/N_e)$ on a ainsi :

$$P/P_s = (1 - N_s/N_e) \exp(2\sigma_{LV}/r_c \rho RT)$$

or $N_s = N_a m_s / M_s$ et $N_e = N_a m / M_e$ de plus $m = (4/3)\pi r_c^3 \rho$

avec N_a le nombre d'Avogadro

m_s la masse de soluté

m la masse d'eau

M_s la masse molaire de soluté

M_e la masse molaire de l'eau

ρ la masse volumique de l'eau

on trouve ainsi $1 - N_s/N_e = 1 - B/r_c^3$ où $B = 3 M_e m_s / (4 \pi \rho M_s) = 3 n_s M_e / (4 \pi \rho)$

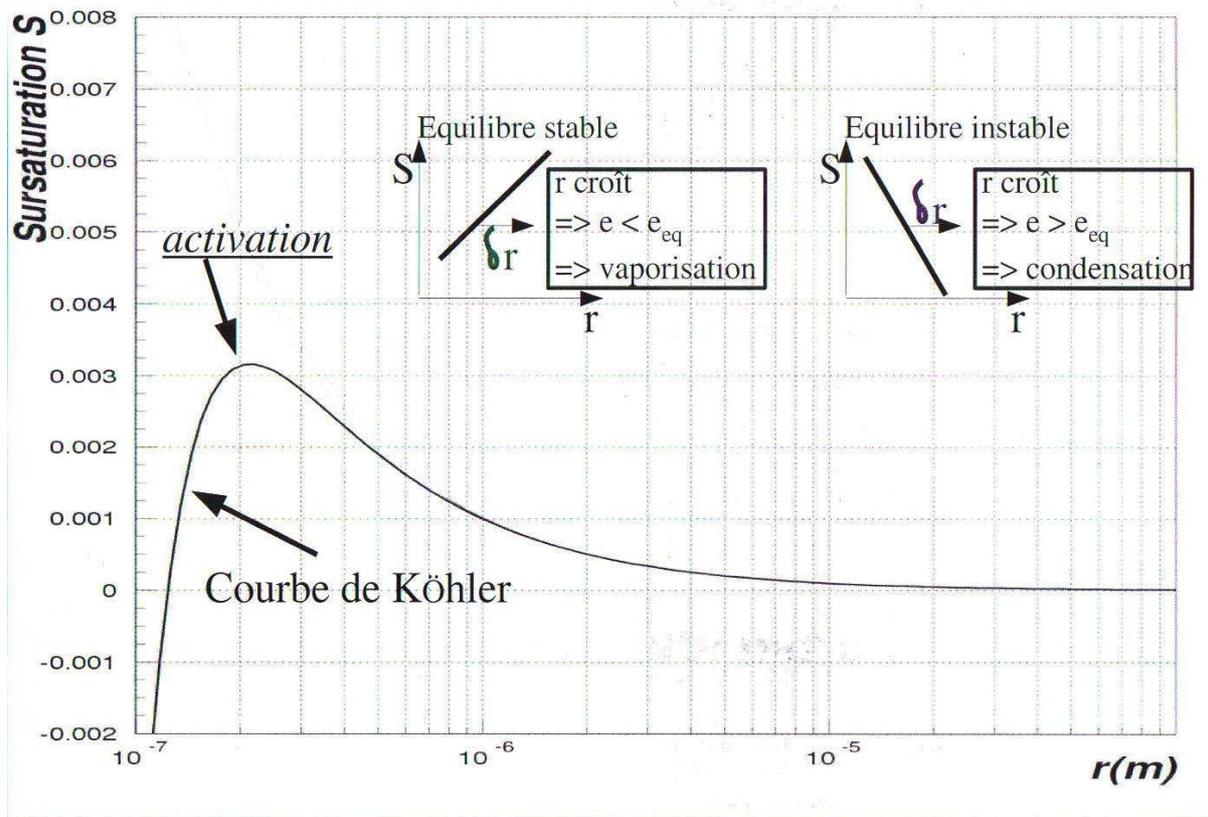
où n_s est le nombre de moles de soluté

en développant $\exp(2 \sigma_{LV} / r_c \rho RT)$ au premier ordre on a : $1 + A/r_c$ où
 $A = 2 \sigma_{LV} / \rho RT$

Ce qui donne directement : $S = A/r_c - B/r_c^3$ loi de Kohler

On observe la même chose avec la courbe suivante :

ACTIVATION D'UNE GOUTTELETTE PAR UN AEROSOL SULFATE



En conclusion ces aérosols jouent le rôle de noyaux de condensation. L'existence de ces noyaux de condensation est permise par la baisse de pression de vapeur d'équilibre induite par la solubilité de l'aérosol (aérosol sulfate), ou bien par les enfractuosités d'un aérosol insoluble (aérosol minéral).

6. Phénomène de pluie.

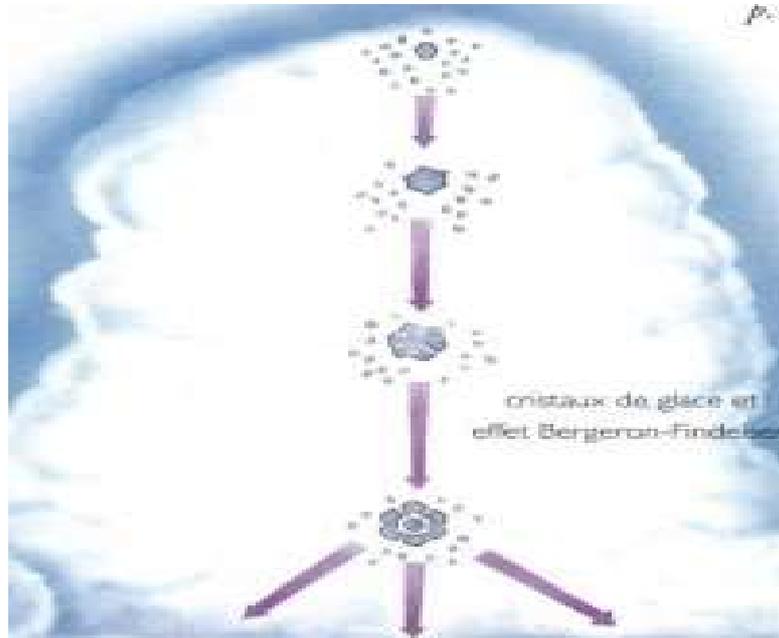
Le phénomène de précipitation est dû essentiellement à l'accroissement de la taille des gouttes dont la masse devient suffisante pour vaincre les forces d'agitation et ainsi tomber.

Ce grossissement est dû aux deux processus suivants : l'effet Bergeron et l'effet de coalescence. Voyons en quoi ils consistent.

Tout d'abord l'effet Bergeron :

Dans la partie du nuage où la température est négative mais supérieure à -41°C , coexistent des cristaux de glace et des gouttelettes d'eau surfondues (eau liquide avec une $T < 0^\circ\text{C}$). Dans ces conditions si la vapeur d'eau est saturante par rapport à la glace, elle ne l'est pas par rapport à l'eau liquide surfondu. Il y a alors évaporation de l'eau liquide (surfondu); la vapeur tendant à être « sursaturante » par rapport à la glace, il se produit un phénomène de condensation solide sur les cristaux qui grossissent aux dépens des gouttelettes. Lorsqu'ils sont suffisamment gros,

ils tombent, fondent s'ils rencontrent des températures positives et ainsi le nuage donne la pluie. On peut observer des chutes de neige si la température est constamment négative ou bien si l'isotherme 0°C est très basse.



Mais ce processus est insuffisant à lui seul pour former de grosses gouttes de pluie.

En effet, il faut 4 heures d'effet Bergeron pour former une goutte de pluie de 2mm de diamètre.

Lorsqu'il y a des orages par exemple des gouttes de taille similaires se forment en 2 heures, ainsi intervient l'effet de coalescence qui participe largement au grossissement.

L'effet de coalescence est essentiel dans le phénomène de précipitation.

Maintenant l'effet de coalescence :

Il y a grossissement par choc et fusionnement avec d'autres particules. Du fait de la dispersion des vitesses, le cristal en se déplaçant, soit en chute libre, soit par turbulence, entre en collision avec les gouttelettes surfondues ; la congélation de celles-ci augmente le volume du cristal. Il en est de même pour les grosses gouttes qui entrent en collision avec des gouttelettes de diamètre inférieur. Ce processus provoque un accroissement rapide de leur dimension et donc de leur masse, augmentant leur vitesse de chute.

Remarque : en fait la goutte ne grossit pas indéfiniment, elle grossit puis lorsqu'elle est trop grosse, elle va se diviser à cause d'efforts, de vibrations lors de sa chute.

On peut observer simplement ce phénomène de coalescence en vaporisant de l'eau sur une vitre ou sur un miroir ; on s'aperçoit alors que les gouttes, petites après la première vaporisation, vont grossir au fur et à mesure que l'on continue à vaporiser, elles grossissent par ce phénomène de coalescence .

Les photos suivantes nous le montrent:



Sur la photo de gauche on ne voit que de fines gouttelettes, alors que sur celle de droite on voit nettement les grosses gouttes qui se sont formées.

Enfin, on pourra noter que lorsque deux cristaux entrent en collision, de fins cristaux se retrouvent éjectés et ainsi servent de noyaux de condensation qui augmenteront la densité des cristaux. On comprend pourquoi, avec l'effet Bergeron en plus, 97% des nuages donnant lieu à des précipitations présentent des températures négatives à leur sommet.



Voici maintenant quelques ordres de grandeur de vitesses de chute:

	<i>Diamètre des gouttes</i>	<i>Vitesse de la précipitation</i>
Bruine	0.006 - 0.06 mm	0.10 – 20 cm/s
Pluie fine	0.06 – 0.6 mm	20 – 100 cm/s
Pluie continue	1 – 3 mm	150 – 400 cm/s
Averse	4 – 6 mm	500 – 800 cm/s

Formation des nuages

I-Matériel nécessaire

II-Protocole

1-Mise en place du montage

2-Expérience

a-Nous allons dans un premier temps montrer l'apparition d'un nuage

b-Rendons ce nuage plus lumineux!

III-Explications

1-Dans notre première expérience

2-Lorsque l'on crée notre petit nuage

IV-Analogies

1-Exemple de la vie quotidienne de cette condensation

2-D'un point de vue atmosphérique

V-Allons un peu plus loin

1-Montrons que la pression diminue bien avec l'altitude

2-Les différents phénomènes de condensation dans l'atmosphère

a-Condensation par détente adiabatique

b-Condensation par refroidissement isobare

c-Condensation par brassage

3-Notions de changements de phases et de vapeur saturante.

4-Lumière sur notre nuage

5-Microphysique des nuages

6-Phénomène de pluie

BIBLIOGRAPHIE :

Fondamentaux de Météorologie-Sylvie Malardel-Cépadues édition
Triplet and Roche-1988

SITE INTERNET :

www.ens-lyon.fr