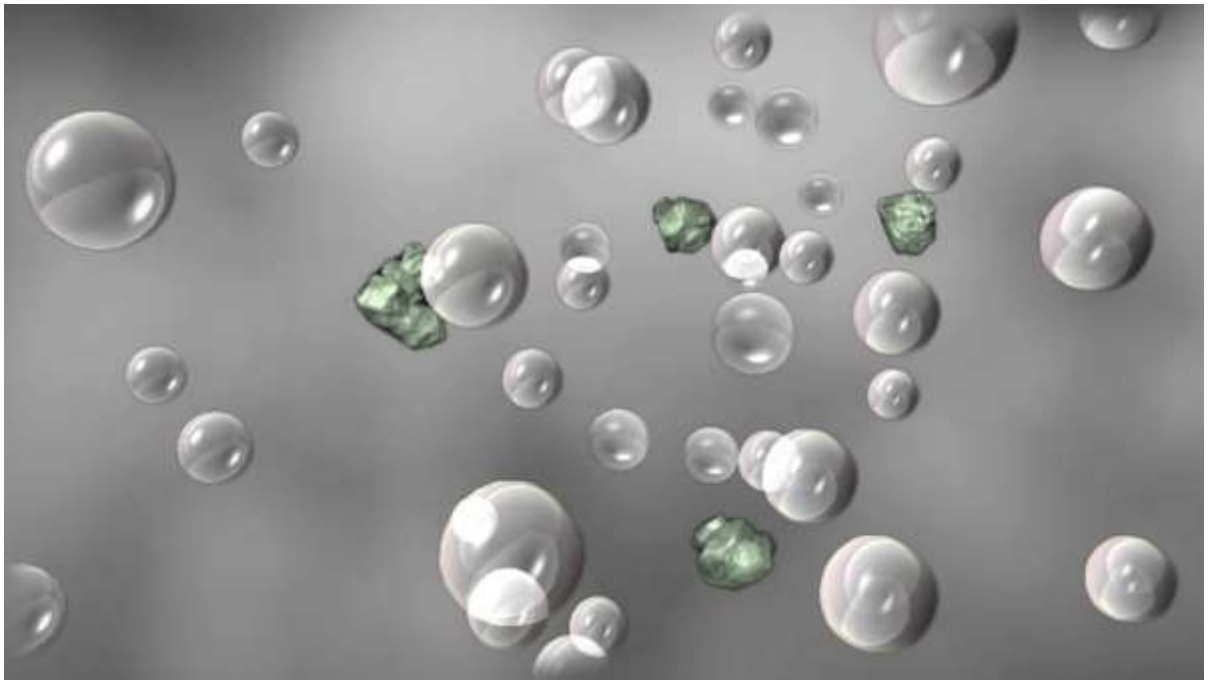
Microphysique des nuages

- Nucléation
  - Nucléation homogène
  - Nucléation hétérogène

Table de matières

- Formation des cristaux et gouttelettes de nuage
  - Nucléation homogène
  - Nucléation hétérogène (les aérosols)

Fermer le contenant avec le couvert respectif en faisant attention pour ne pas éclabousser de l'eau sur les surfaces métalliques



https://svs.gsfc.nasa.gov/10387

- Homogène
- Hétérogène

NUCLÉATION LIQUIDE

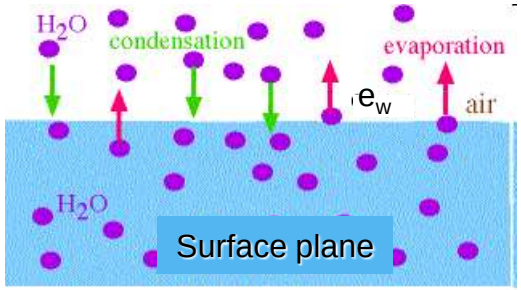
Comprendre la nucléation liquide

La nucléation liquide signifie qu'il y a formation de petites gouttes de liquide thermodynamiquement stables à partir du gaz.

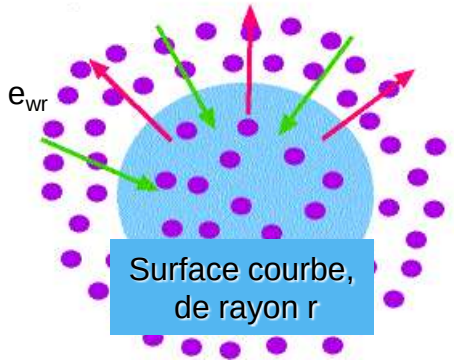
Si une goutte est trop petite, les forces de cohésion sont insuffisantes pour la maintenir.

Ce sont les gouttes au delà d'une taille critique qui subsistent.

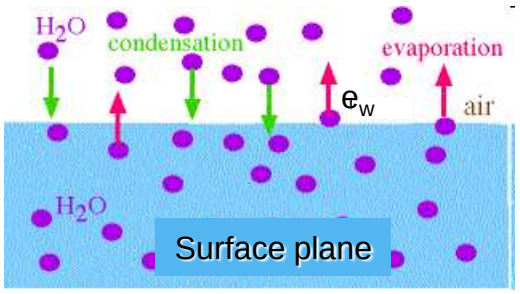
Dans le cas de la nucléation homogène, cette barrière de taille est difficile à franchir et la condensation de gouttelettes dans un système pur est obtenue pour une sursaturation élevée c'est-à-dire quand il y a une grande quantité de vapeur d'eau dans le gaz porteur (l'air atmosphérique).

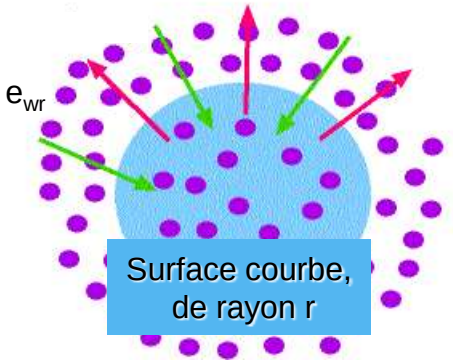


Commençons par comprendre la différence entre les conditions d'équilibre vapeur-liquide quand **l'interface est plane** et quand **l'interface est convexe.**



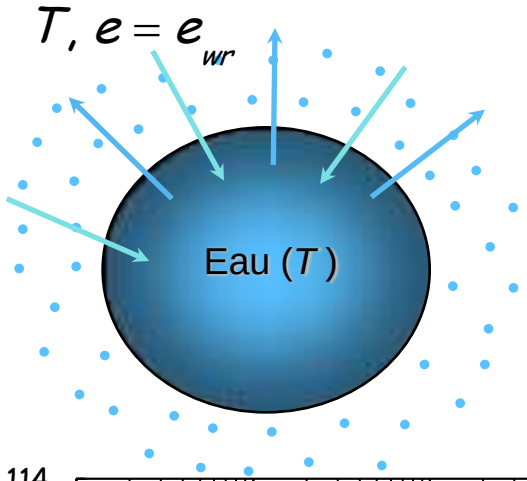
Équilibre entre la phase liquide et la phase vapeur : effet de courbure

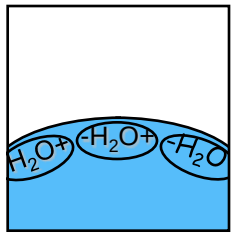




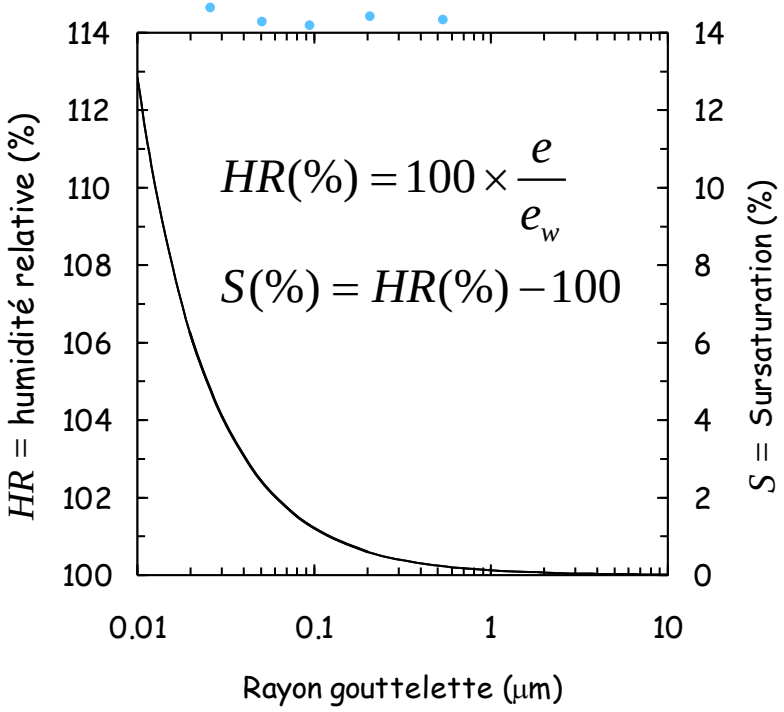
- Pour maintenir la courbure de la gouttelette il faut plus d'énergie de surface que dans une surface plane.
- *Alors* les molécules à la surface de la goutte ont plus d'énergie.
- L'évaporation à partir d'une surface courbe est facilitée par rapport à une surface plane.
- Le taux d'évaporation à partir d'une surface courbe est plus élevée que celle par rapport à une surface plane.
- Comme on est à l'équilibre, dans les deux cas le taux d'évaporation = taux de condensation.
- *Alors, à la même température, le taux de condensation sur la gouttelette > taux de condensation sur une surface plane d'eau : $e_{wr} > e_w$*
- *Donc :*
  - Si HR (surface plane) = 100 %, alors HR (goutte) > 100 %.
  - À l'équilibre, l'air autour d'une gouttelette d'eau doit être sursaturé!
- Ce fait est appelé **effet de courbure ou de Kelvin**.

Nucléation homogène : effet de courbure





Liens faibles = plus d'énergie



À l'équilibre, la pression de vapeur autour d'une gouttelette d'eau pure de rayon ***r***, e_{wr}, est plus grande que celle au-dessus d'un plan d'eau pure à la même température, e_w. Pour que la goutte maintienne sa taille (pas d'évaporation ni de condensation nette), l'humidité relative de l'environnement doit être supérieure à 100 %.

$$\frac{HR}{100} = \frac{e_{wr}}{e_w} > 1$$

$$S\left(\text{sursaturation}\right) = HR/100 - 1 > 0$$

S est la sursaturation (ou sous-saturation si S < 0)

Effet de courbure

- Quelle devrait être la valeur de HR pour que la goutte d'eau pure de diamètre 1,9 μm soit en équilibre avec son environnement (sa taille reste constante)

  R : HR = 100,1 %

- Qu'arrive à la goutte si l'humidité dans le nuage est HR = 100,15%?

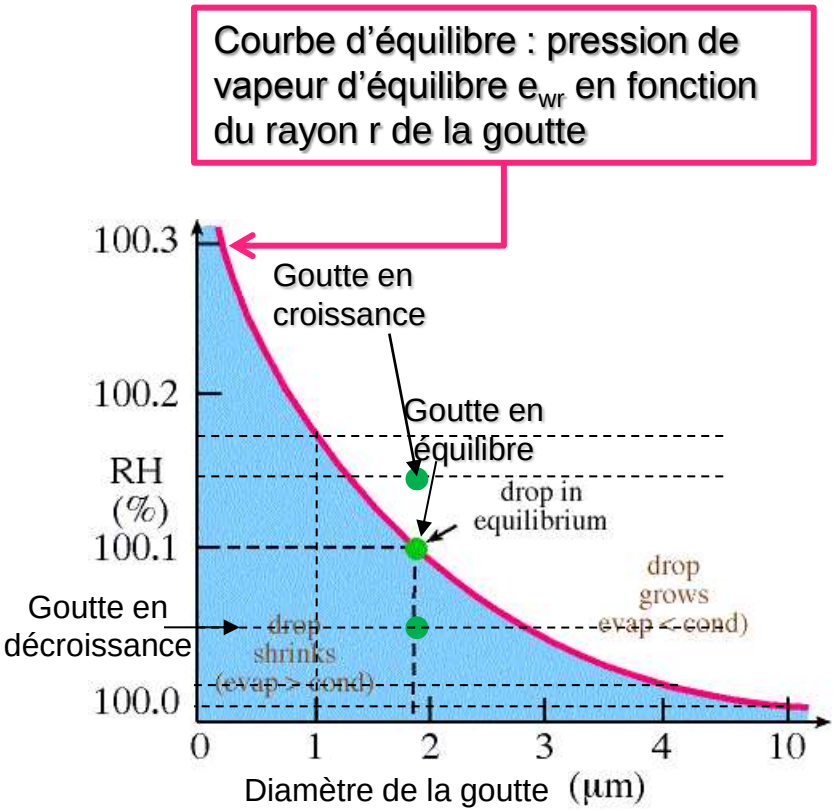
  R : elle grandit

- Qu'arrive-t-il à la goutte dans un nuage où HR = 100,05% ?

  R : elle évapore

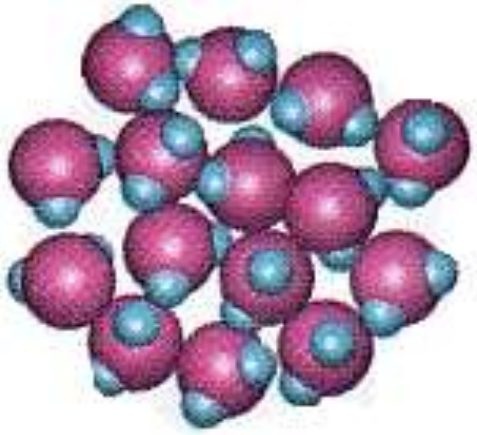
- À quelles humidités relatives les gouttes d'eau pure suivantes grossissent par condensation?
  - a. 10 microns HR > 100,01%
  - b. 4 microns HR > 100,02%
  - c. 1 micron HR > 100,18%

- Expliquez pourquoi des petites gouttelettes d'eau pure s'évaporent à des humidités relatives de 100%.



À cause de la courbure, à 100 % d'humidité, le taux d'évaporation à la surface de la gouttelette est supérieure au taux de condensation. La goutte évapore jusqu'à la pression de vapeur de l'environnement soit égale à e_{wr}

Nucléation homogène d'une gouttelette d'eau pure : Effet de courbure



Embryon de gouttelette de nuage

- L'humidité relative dans les nuages dépasse à peine les 100 %!
- La nucléation homogène des gouttelettes d'eau pure est peu probable lors de la formation des nuages.

Rayon et nombre de molécules pour des gouttelettes d'eau pure à 0°C et à l'équilibre avec la vapeur

Humidité relative (%)	Rayon critique r μm}	Nombre de molécules n
100	∞	∞
101	1.208×10^{-1}	2.468×10^{8}
110	1.261×10^{-2}	2.807×10^{5}
150	2.964×10^{-3}	3645
200	1.734×10^{-3}	730
300	1.094×10^{-3}	183
400	8.671×10^{-4}	91
500	7.468×10^{-4}	58
1000	5.221×10^{-4}	20

Résumé

- Les gouttes de nuage commencent comme de très petites gouttes sphériques, mais la pression de vapeur requise pour leur formation est beaucoup plus grande que la pression saturante jusqu'à ce qu'elles se rapprochent de 10-20 µm de taille.
- L'effet Kelvin ou de courbure est important seulement pour les très petites gouttes; Il est important dans l'atmosphère parce que toutes les gouttes commencent comme de minuscules gouttes et doivent passer par cette étape. Au fur et à mesure que les gouttes grossissent, leur rayon augmente et l'effet de courbure devient négligeable.
- Ainsi, est-il possible de former une goutte de nuage d'eau pure? Ce processus est appelé nucléation homogène.
- La seule manière pour que cela se produise est que deux molécules se collent, puis en ajoutent une autre, puis une autre, etc. Mais le rayon de la goutte de nucléation est si petit que la pression de vapeur doit être très grande. Il s'avère que les gouttes peuvent probablement s'agglomérer à un taux raisonnable lorsque l'humidité relative est d'environ 440%. Avez-vous déjà entendu parler d'une telle humidité relative aussi élevée dans l'atmosphère?

- Donc, la leçon ici est que la nucléation homogène est très peu probable en raison de l'effet Kelvin ou de courbure.

Nucléation hétérogène

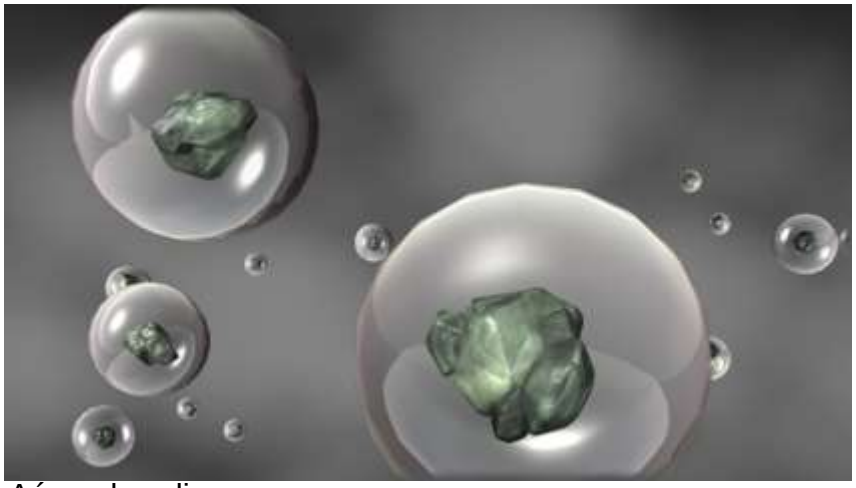
La thermodynamique statistique montre que S = HR - 100 doit être de 300-600% pour qu'on puisse observer une nucléation homogène par cm^3 par seconde dans l'atmosphère.

Comme S est rarement supérieure à 1 à 2%, on observe jamais de la nucléation homogène dans l'atmosphère

La nucléation (transition de phase avec formation d'une interface) à des S caractéristiques de l'atmosphère terrestre requiert un substrat (noyaux de condensation).

Nucléation hétérogène

Les noyaux de condensation les plus efficaces sont des les aérosols solubles ou hydrophiles.



Aérosols salins.
Source : http://phys.org/news/2013-08-insights-wildfire-climate.html

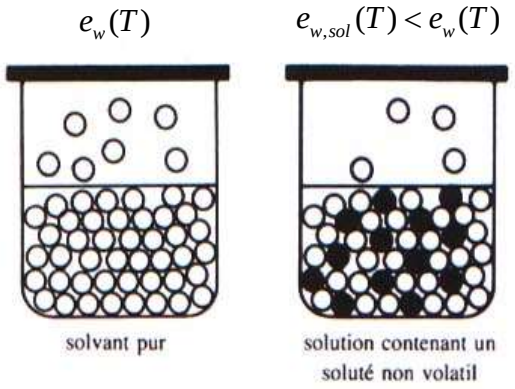
Expérience : les noyaux hydrophiles

Nucléation hétérogène : effet de solution ou loi de Raoult

Définitions :

Solvant : Le produit chimique dans lequel un autre produit chimique est dissous. Pour nous, le solvant est le H_2O.

Soluté : Le produit chimique qui est dissous dans le solvant.



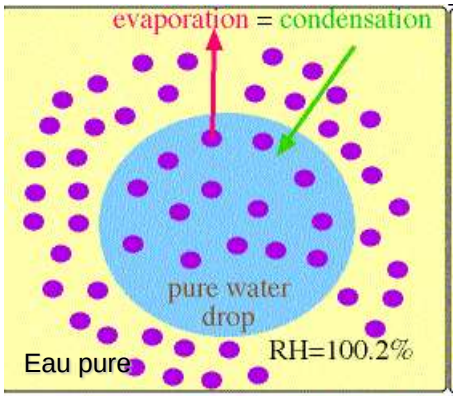
La vue la plus simple de l'effet de solution sur l'équilibre entre la vapeur et le liquide est que les molécules de soluté sont uniformément réparties dans l'eau (solvant).

Par conséquent, certaines molécules de soluté occupent des sites de surface qui seraient autrement occupés par des molécules d'eau. Ainsi, le soluté empêche les molécules d'eau de s'évaporer de ces sites.

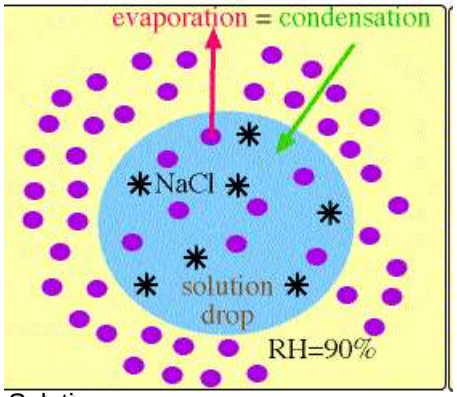
La loi de Raoult (chimie) montre que la pression de vapeur en équilibre avec une solution, $e_{w,sol}$, dépend leur de la fraction molaire du sel dans la solution χ_{sel}. *Plus grande est χ_{sel} plus petite est $e_{w,sol}$.*

L'effet de solution

- Dans la nature, la condensation se fait sur des aérosols hygroscopiques ou hydrophiles. Les gouttes formées seront alors des solutions. La nucléation est hétérogène.
- Dans ce cas, la goutte solution est en équilibre avec l'environnement à des humidités relatives plus basses que celle de la goutte d'eau pure.
- Ceci explique la formation de la brume humide.
- Ce processus de nucléation hétérogène facilite la nucléation et la croissance par condensation des petites gouttelettes des nuages.
- La brume humide apparaît à des humidités relatives inférieures à 100 %. Est-ce que les particules de brume sont des gouttelettes d'eau pure ou des gouttelettes de solution aqueuse? Pourquoi?



Eau pure



Solution aqueuse

La nucléation hétérogène : courbe de Köhler

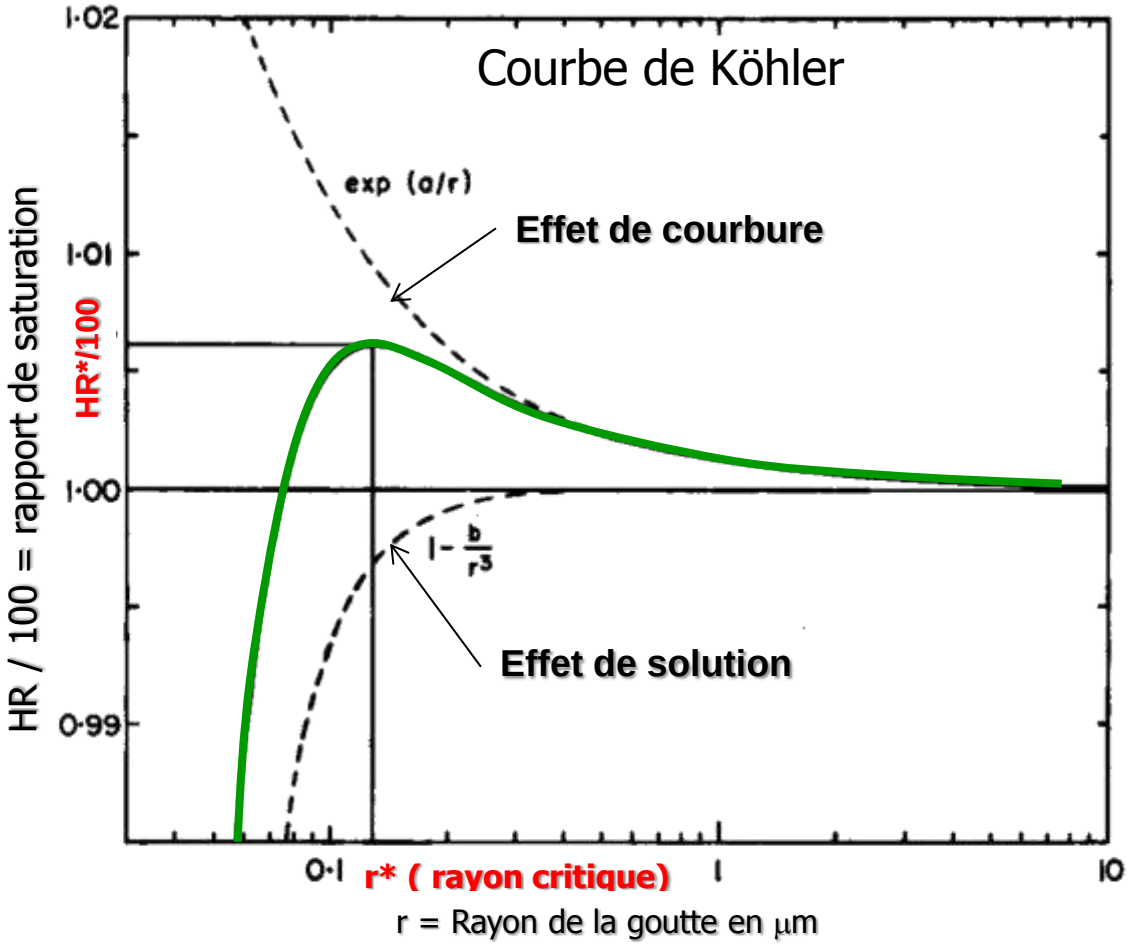


FIG. 6.2. Equilibrium saturation ratio of a solution droplet formed on an ammonium sulfate condensation nucleus of mass 10^{-16} g.

La courbe de Köhler donne l'humidité relative d'équilibre pour une goutte de rayon r qui s'est formée sur un noyaux de condensation hygroscopique de masse m_{sel}.

Elle intègre les effets de courbure et de solution sur l'équilibre thermodynamique des deux phases : vapeur et liquide.

Cette courbe a un maximum qui défini une humidité relative critique HR* et un rayon critique r* de la goutte formée dans l'aérosol correspondant à la courbe.

La nucléation hétérogène : courbe de Köhler

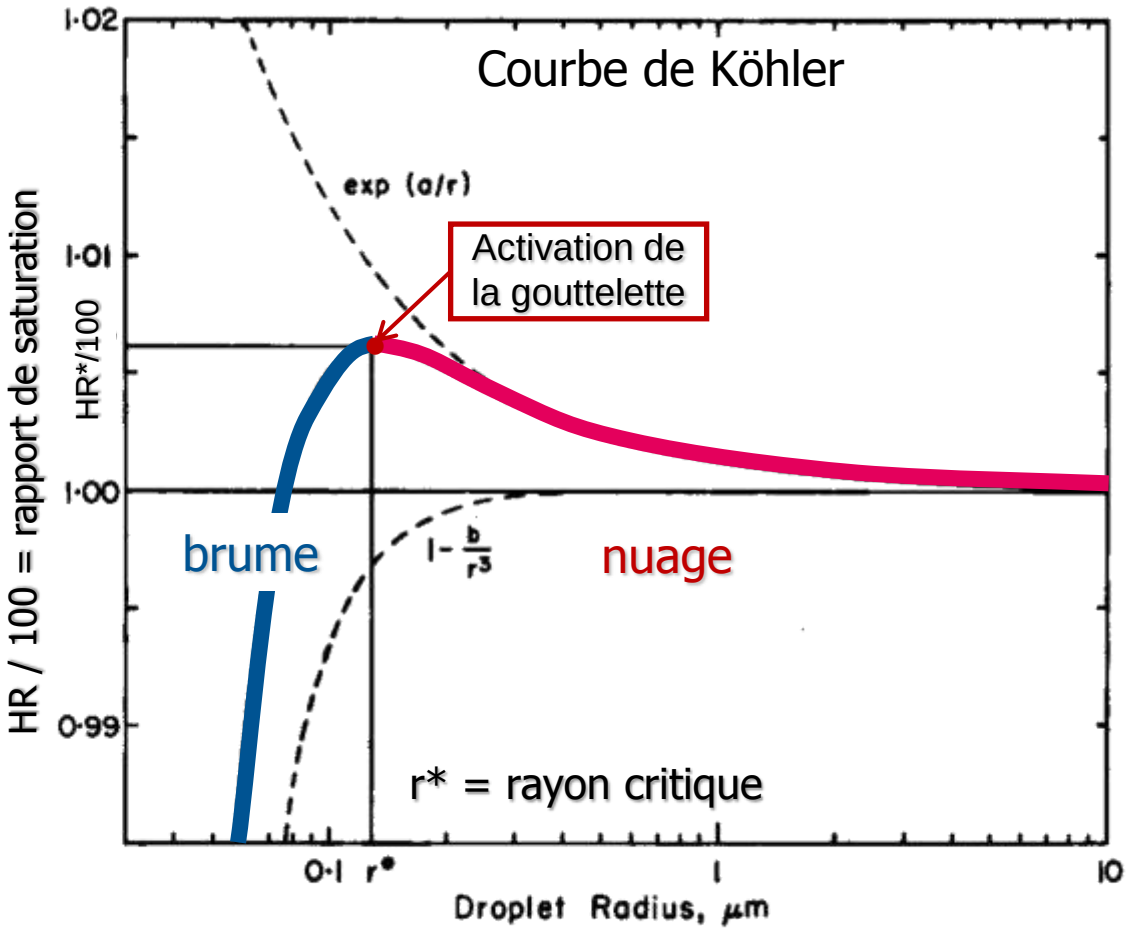


FIG. 6.2. Equilibrium saturation ratio of a solution droplet formed on an ammonium sulfate condensation nucleus of mass 10^{-16} g.

Quel est le terme dominant quand HR < 100% ?

Pouquoi la courbe de Köhler s'approche de 1.0 quand r augmente?

Si r < r* la goutte fait partie de la brume

Si r > r* la goutte fait partie d'un nuage

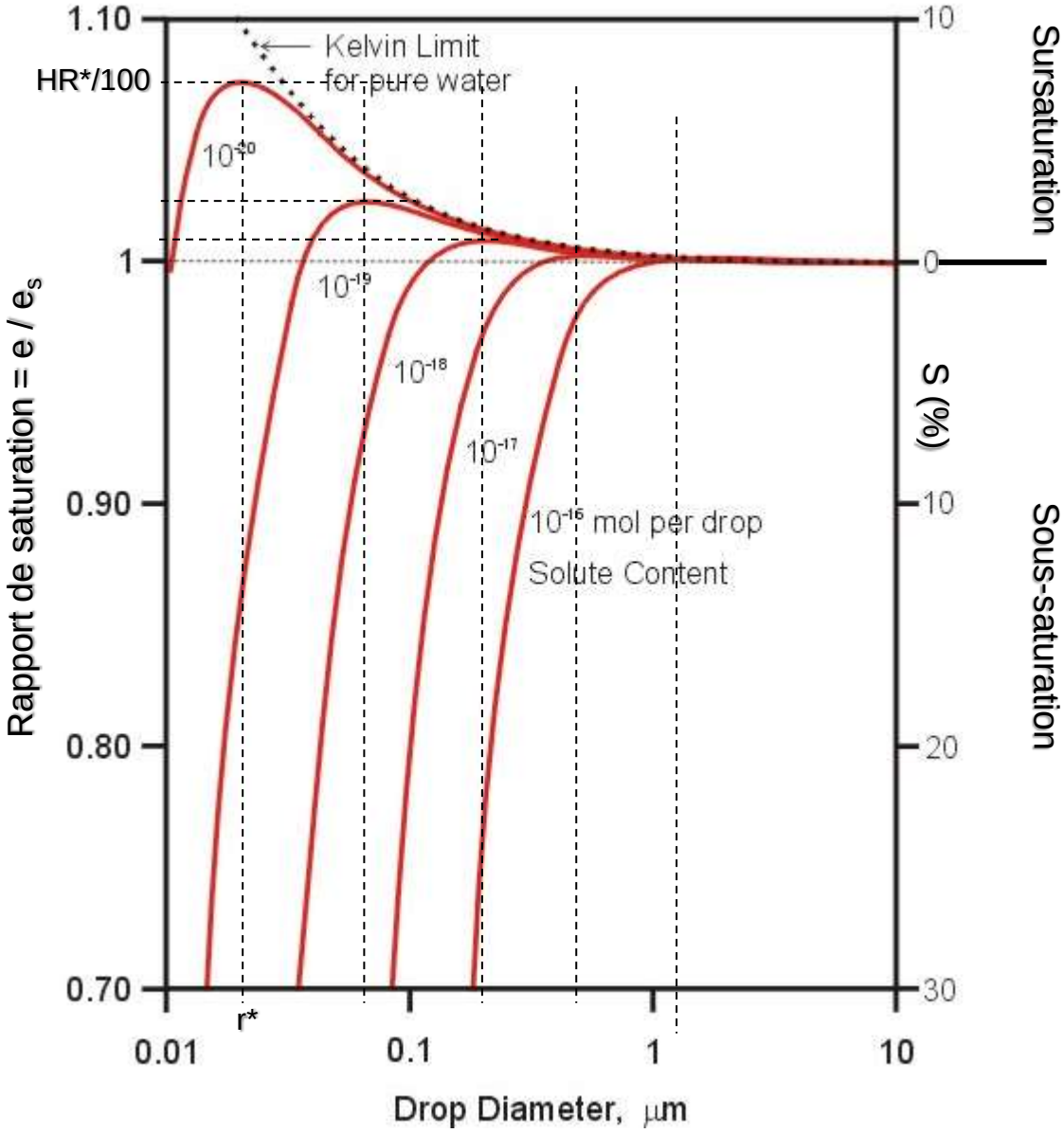
On dit qu'une goutte est activée quand sa taille atteint le rayon critique r*

Courbes de Köhler

La forme de la courbe dépend du nombre de moles qui constituent le sel (noyau de condensation) ainsi que de son pouvoir de dissociation.

La figure montre 5 courbes correspondant à des noyaux de condensation constitués de masses différentes d'un même sel.

On voit que l'humidité relative critique (ou rapport de saturation critique, HR*/100, dans le cas de la figure) diminue avec l'augmentation du nombre de moles du sel, tandis que le rayon critique r* augmente.

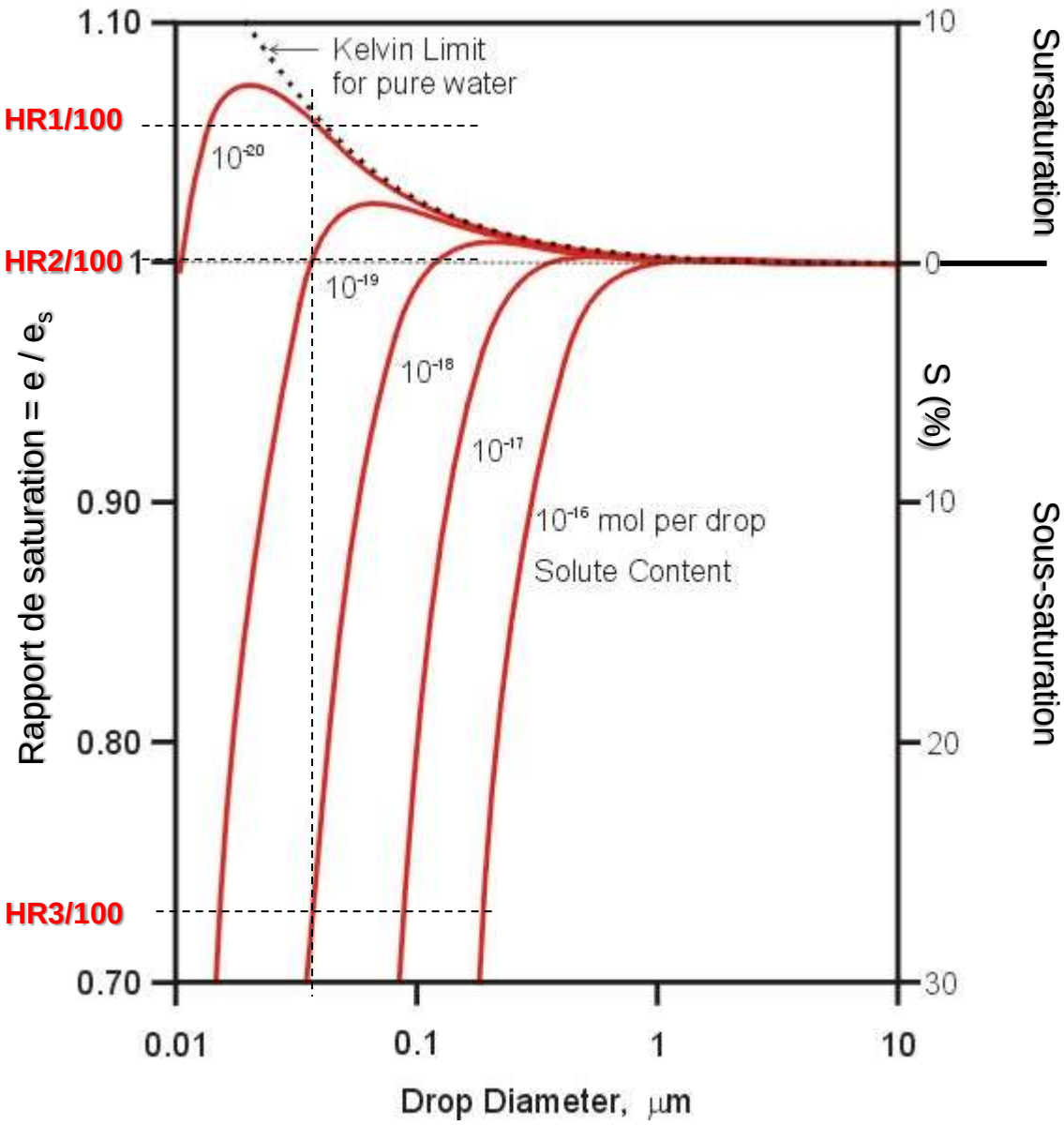


Source : http://www.ems.psu.edu/~lno/Meteo437/

Courbes de Köhler

Conditions : plusieurs noyaux de condensation d'un même sel mais de tailles différentes.

Pour la même taille de goutte nucléée, plus le noyaux de condensation est grand (masse plus élevée), plus l'humidité relative d'équilibre est petite.

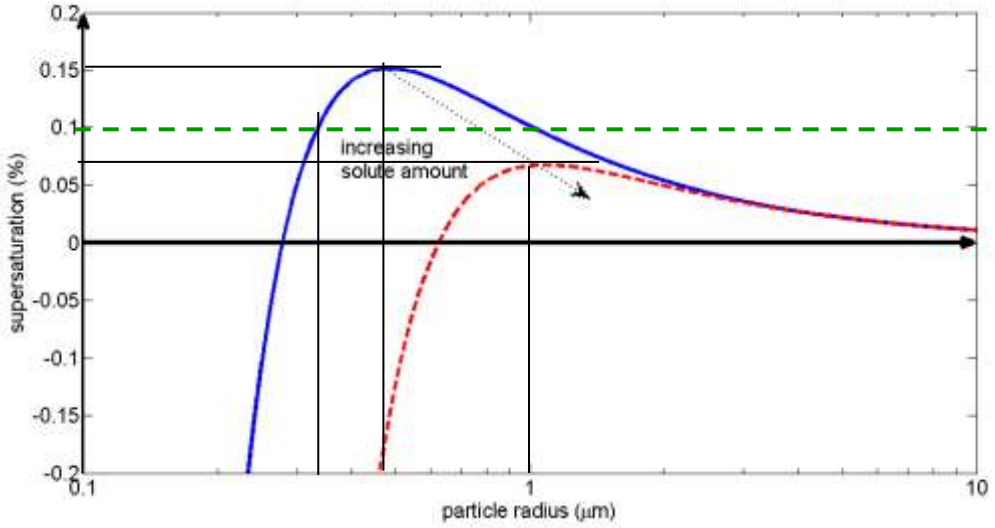


Source : http://www.ems.psu.edu/~lno/Meteo437/

Exemple :

Réponses :

1) ~0,155%; ~0,07%;
2) 0,48 μm; 1 μm;
3) La goutte qui contient plus de molécules de sel;
4) Le plus petit : r = 3,2 μm;
   Le plus grand : r >10 μm.
   Si la sursaturation restait constante la deuxième gouttelette grandirait jusqu'à l'infinie. Pourquoi c'est impossible qui ça se réalise?



La courbe de Köhler pour deux gouttes formées sur deux aérosols de taille différentes : n_{sel}=1x10^{-17} moles (bleu), n_{sel}=5x10^{-17} moles (rouge). La ligne verte - - - - - représente une sursaturation de l'air ambiant égal à 0,1% (question 4).
Crédit: W. Brune

Notons que la sursaturation critique est supérieure à 0,1% pour la plus petite particule et inférieure à 0,1% pour la plus grande particule de sel.

1) Quel doit être la sursaturation pour que la plus petite particule atteignent sa taille critique? Et l'autre?
2) Quelle est le rayon critique de chacune des particules?
3) Pendant l'ascension l'air se refroidit, la sursaturation change de S = 0% (NCA), à S > 0,2%, laquelle des gouttes va s'activer en premier?
4) Si la sursaturation de l'environnement se maintient a 0,1% quelle sera la taille de la gouttelette formée sur chacun des aérosols?

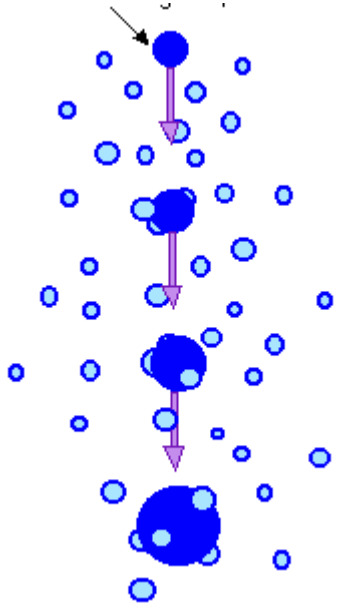
Morale de l'histoire

Vous pouvez imaginer toutes sortes de scénarios qui peuvent se produire quand il y a une distribution de noyaux de condensation de différentes tailles et de différentes quantités de soluté.

- Les gouttes avec plus de soluté ont des valeurs inférieures de sursaturation critique et sont donc susceptibles de se nucléer d'abord parce que dans un courant ascendant, la sursaturation augmente au fur et à mesure que la parcelle d'air monte.

- Donc, vous pouvez imaginer le plus grand CCN grossir par condensation de la vapeur d'eau ce qui fait diminuer la sursaturation ambiante en dessous de la sursaturation critique nécessaire à l'activation des CCN plus petits.

- En conséquence, la goutte de nuage nucléée sur le plus grand CCN tombe au sein d'une brume formée par les gouttelettes nucléées sur les plus petits CCN.

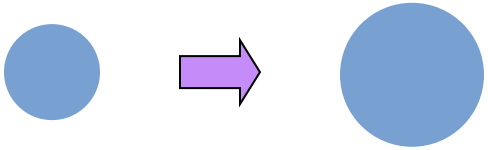


Morale de l'histoire? Si vous êtes un CCN, plus vous êtes grand, plus vous grandirez! (Toujours les mêmes…)

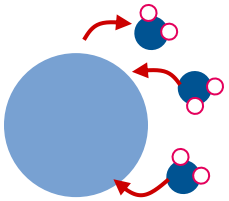
Résumé

Effet de courbure, $e_{wr} > e_w$

(note: pression de vapeur saturante, e_w est la pression de vapeur d'eau réquise pour l'équilibre avec une surface plane d'eau pure liquide)



Augmentation de r, diminue la pression de vapeur d'équilibre à la surface de la goutte (besoin de moins de molécules de vapeur d'eau pour que l'équilibre soit atteint)

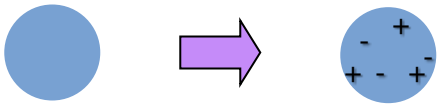


Pour atteindre l'équilibre, le flux de molécules vers la goutte est supérieur au flux de molécules sortant de la goutte (croissance)

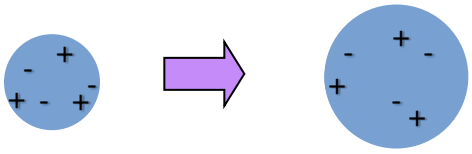
Résumé

L'effet de solution est nécessaire pour que la goutte se forme initialement (nucléation) en diminuant la sursaturation nécessaire à l'organization de la goutte d'eau)

Effet de solution



L'addition d'un soluté diminue la pression d'équilibre à la surface puisqu'il y a moins de molécules à la surface susceptibles de participer au flux de molécules sortant de la goutte



Quand r augmente les effets de la solution diminuent la solution devient de plus en plus diluée. Par contre les effets de courbure (qui contribuent à augmenter la pression d'équilibre) diminuent aussi.

Expérience : les noyaux hydrophiles

Regardez le montage

- Homogène
- Hétérogène

NUCLÉATION SOLIDE

La nucléation de la phase solide

L'eau peut rester à l 'état liquide à des températures très inférieures à 0 °C (rappelez-vous de l'expérience au lab - vidéo). La nucléation homogène (r << 1 μm) de la phase solide est possible seulement à des températures inférieures à -40 °C.

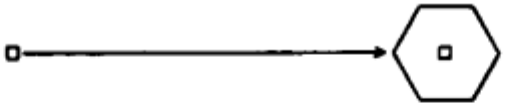
Diamètre de la goutte (μm)	Température de congélation (°C)
1	-42.3
10	-38.2
100	-34.8
1000	-32.2
10000	-30.0

Mécanismes de nucléation hétérogène

La nucléation hétérogène a lieu a des températures plus élevées en présence de **noyaux glaciation**.

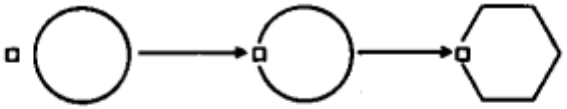
L'efficacité d'un noyaux de glaciation dépend de la similitude entre le réseaux cristallin du noyaux et celui du cristal de glace.

Condensation solide

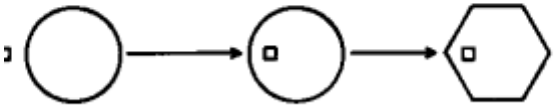


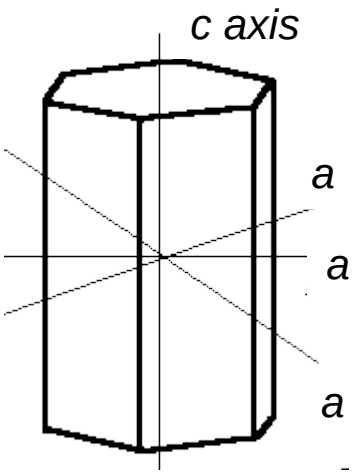
Condensation suivie de solidification

Solidification par contact



Solidification par immersion





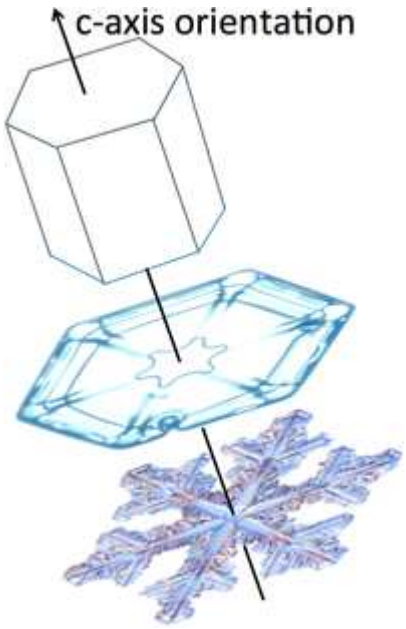


TABLE 9.1. *Temperatures at which different substances nucleate ice. (From Houghton, 1985)*

Substance	Crystal lattice dimension		Temperature to nucleate ice (°C)	Comments
	a axis (Å)	*c* axis (Å)		
Pure substances				
Ice	4.52	7.36	0	—
AgI	4.58	7.49	−4	Insoluble
PbI_2	4.54	6.86	−6	Slightly soluble
CuS	3.80	16.43	−7	Insoluble
CuO	4.65	5.11	−7	Insoluble
HgI_2	4.36	12.34	−8	Insoluble
Ag_2S	4.20	9.50	−8	Insoluble
CdI_2	4.24	6.84	−12	Soluble
I_2	4.78	9.77	−12	Soluble
Minerals				
Vaterite	4.12	8.56	−7	
Kaolinite	5.16	7.38	−9	(Silicate)
Volcanic ash	—	—	−13	
Halloysite	5.16	10.1	−13	
Vermiculite	5.34	28.9	−15	
Cinnabar	4.14	9.49	−16	
Organic materials				
Testosterone	14.73	11.01	−2	
Chloresterol	14.0	37.8	−2	
Metaldehyde	—	—	−5	
β-Naphthol	8.09	17.8	−8.5	
Phloroglucinol	—	—	−9.4	
Bacterium *Pseudomonas Syringae*	—	—	−2.6	(Bacteria in leaf mold)

Concentration de cristaux dans les nuages

La concentration des cristaux dépend :

a) de la température du sommet;

b) du degré de développement.

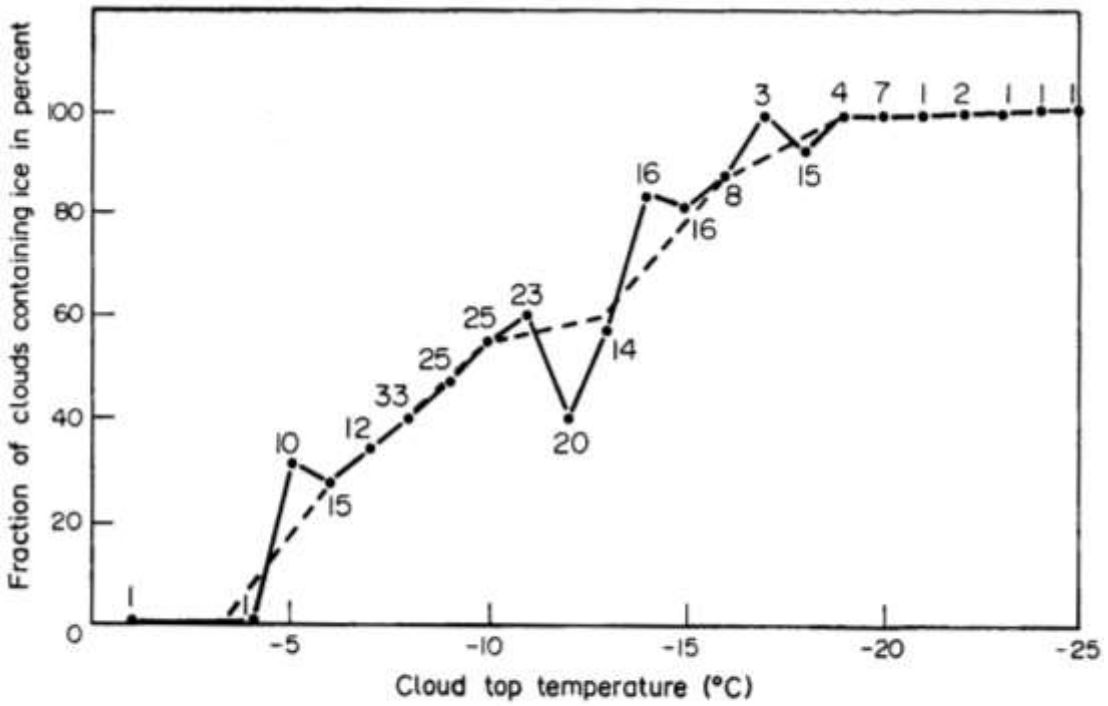
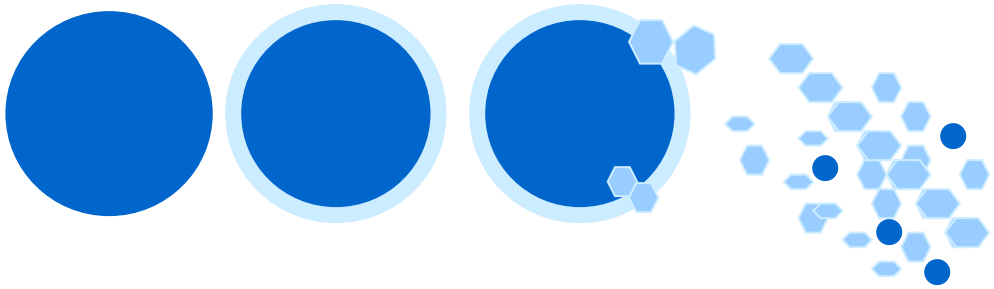


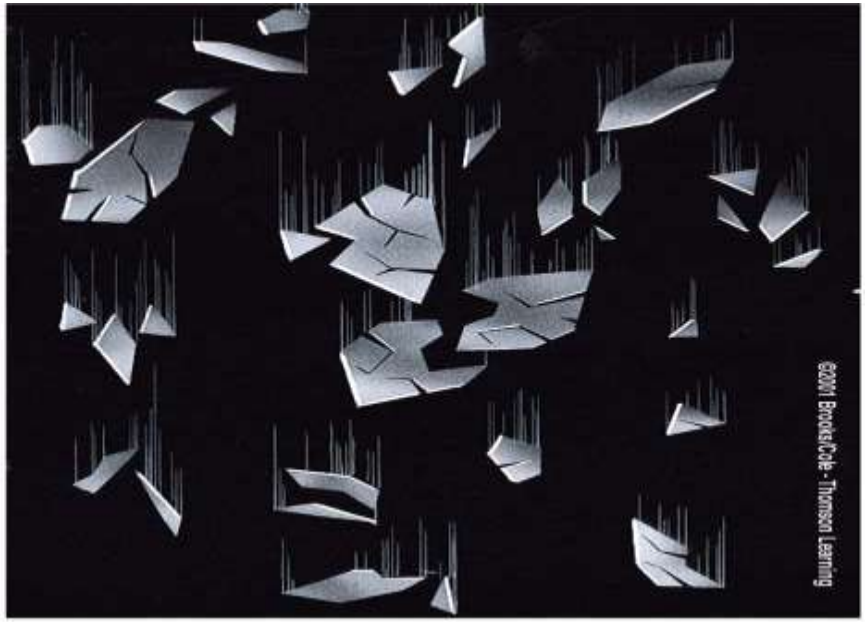
FIG. 5.11. The fraction of clouds containing ice as a function of cloud top temperature, from observations of 258 clouds by several investigators in different regions. The number above each point is the number of observations at that temperature; the dashed curve is a three-point running mean. (From Houghton, 1985, after Hobbs *et al.*, 1974.)

Les mesures de noyaux de glaciation et du nombre de cristaux qui se forment par refroidissement de l'échantillon d'air, montrent que le nombre de cristaux est supérieur au nombre de noyaux de glaciation.

Le nombre de particules de glace mesuré est supérieur au nombre de noyaux de glaciation. Pourquoi??



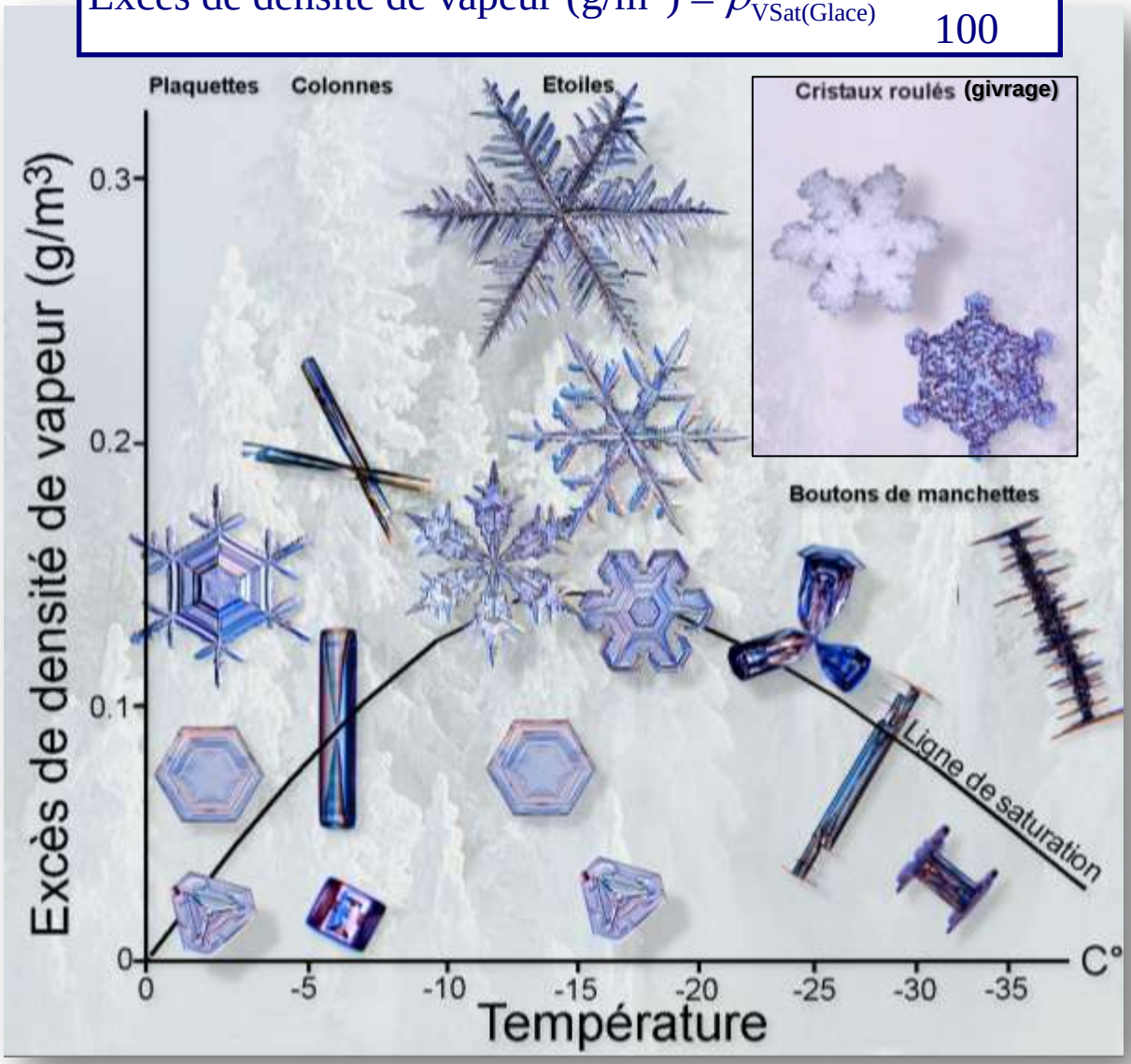
1) À cause de l'éclatement des gouttes surfondues en voie de geler.



2) À cause de la fragmentation des cristaux de glace par collision

Morphologie des cristaux de glace

$$\text{Excès de densité de vapeur } (g/m^3) = \rho_{VSat(Glace)} \frac{HR - 100}{100}$$



La forme des cristaux de neige dépend de 2 facteurs:

- la température
- l'humidité relative

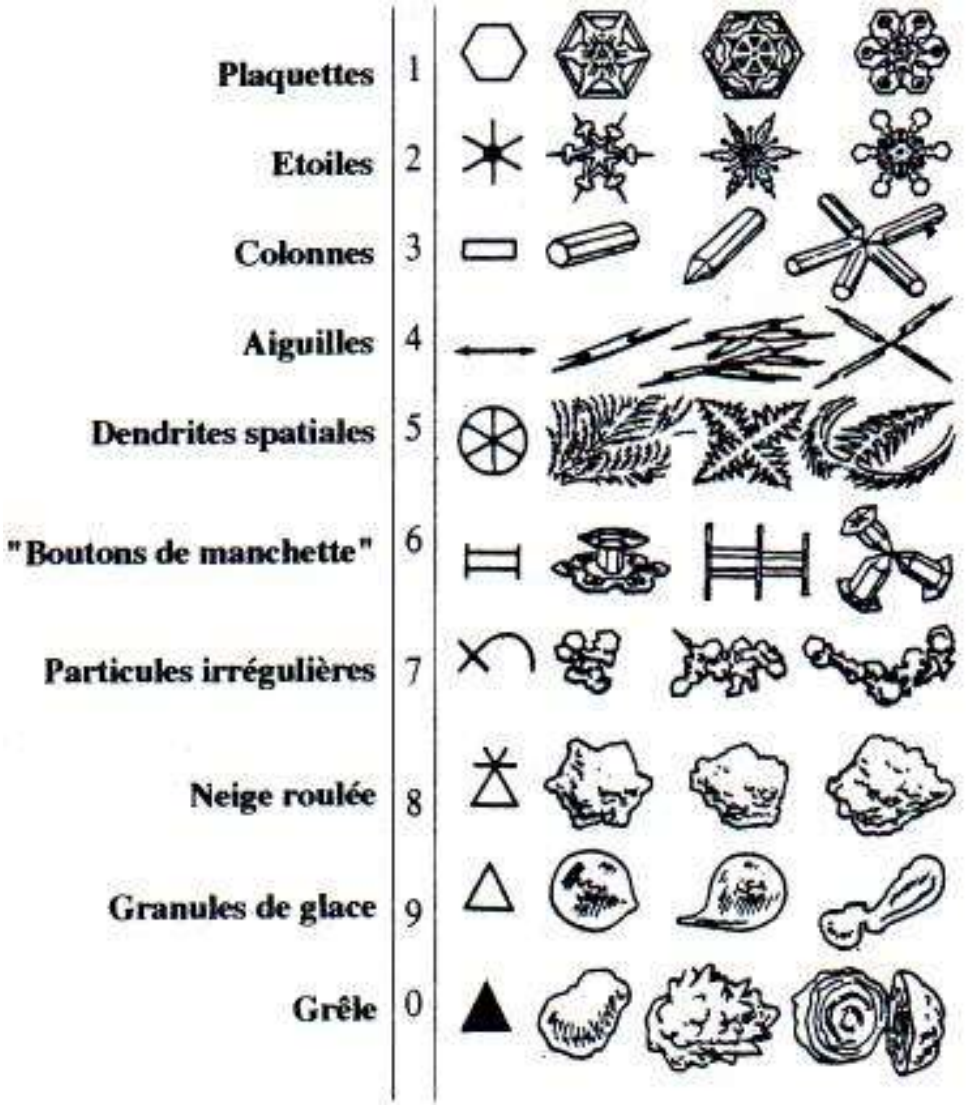
D'après la courbe de excès de vapeur par rapport à HR = 100 % en fonction de T :

- de 0 à -4°C : minces plaques hexagonales;
- de -4 à -6°C : aiguilles;
- de -6 à -10°C : colonnes creuses;
- de -10 à -12°C : plaquettes; cristaux à six pointes longues;
- de -12 à -22°C: dendrites filiformes et plaquettes.
- < -22 °C : boutons de manchette; boutons de machette multiples

Source - http://pedagogie.ac-toulouse.fr/gappic/index.php/atmosphere/observer-la-neige

Types de cristaux et particules de de neige

http://www.laboiteverte.fr/des-macros-de-flocons-de-neige/



http://pedagogie.ac-toulouse.fr/gappic/observer-la-neige/

Résumé

• Les gouttelettes des nuages gèlent à des très basses températures, plus les gouttes sont petites plus basse est la température de solidification homogène;

• La présence de certains aérosols, les noyaux de glaciation facilitent la solidification des gouttes (nucléation hétérogène);

• Le nombre de noyaux de glaciation est petit dans l'atmosphère ⇒ présence de nuages surfondus ou mixtes.

• La forme des cristaux de glace dépend de deux facteurs

- La température
- L'humidité

• Noyaux de congélation

Types
- Par déposition
- Par contact
- Par immersion

• Multiplication des cristaux

1. Par éclatement de gouttes en voie de solidification
2. Par fragmentation des cristaux de glace

À venir… La précipitation