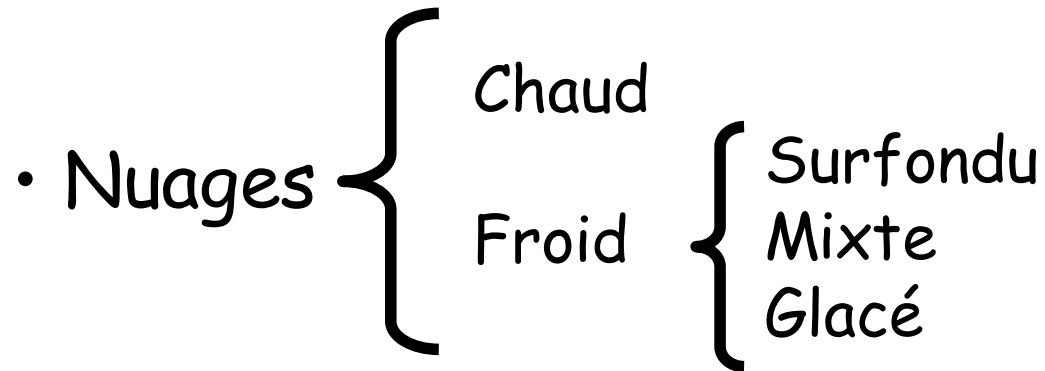
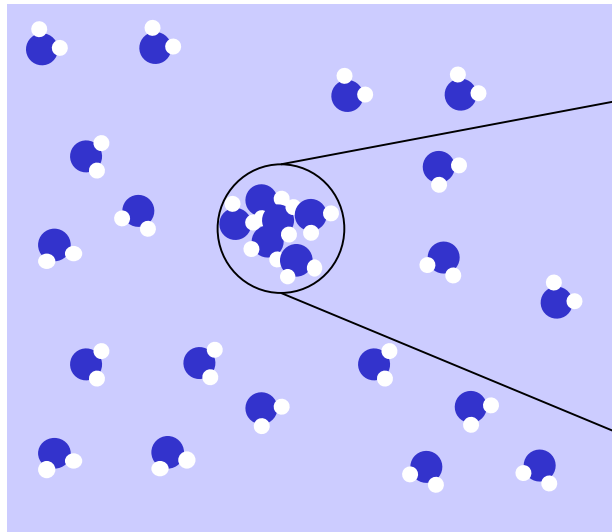


Microphysique des nuages : formation

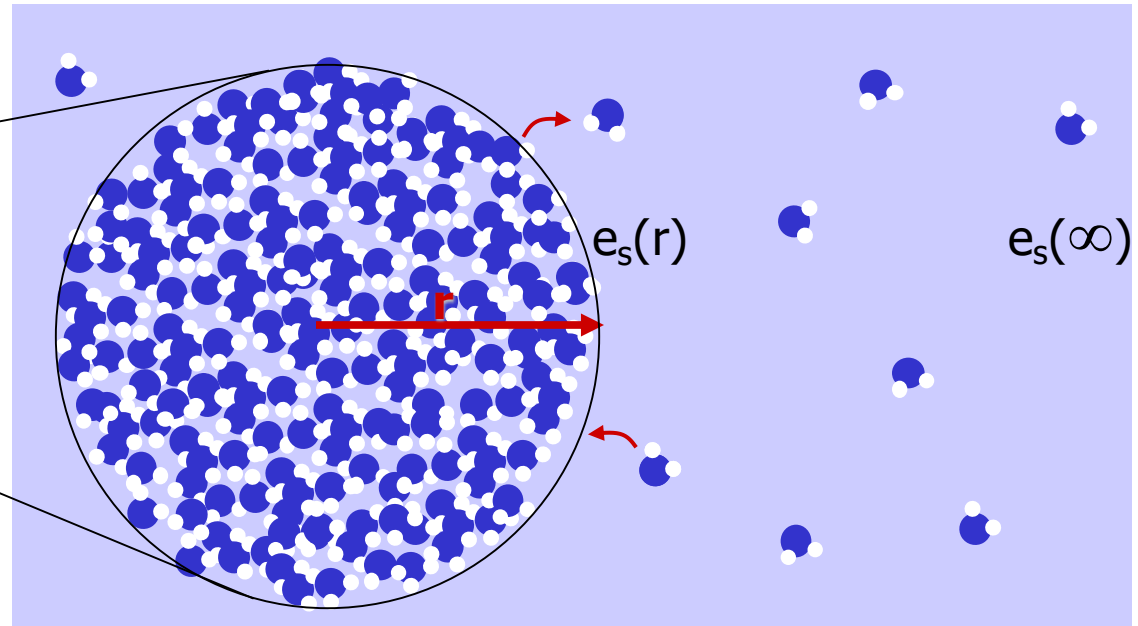


- Nucléation homogène
- Nucléation hétérogène
 - Noyaux de condensation (CCN)
 - Noyaux de glaciation (IN)

Formation des gouttelettes de nuage: la nucléation



Agrégation par collision

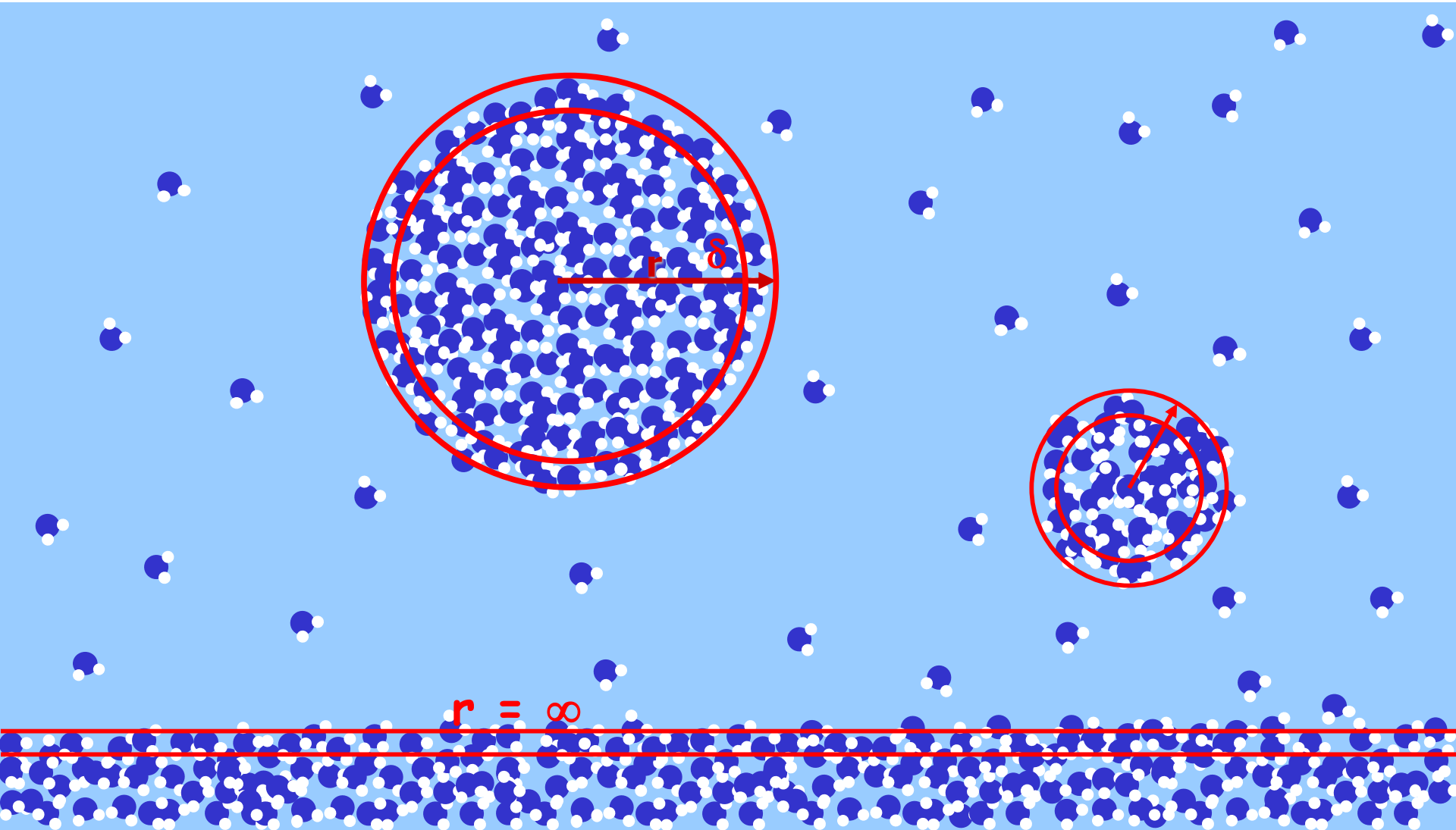


Croissance par diffusion

Pourquoi on n'observe pas la formation de gouttelettes à 100% d'humidité relative, quand l'air est très pur ?

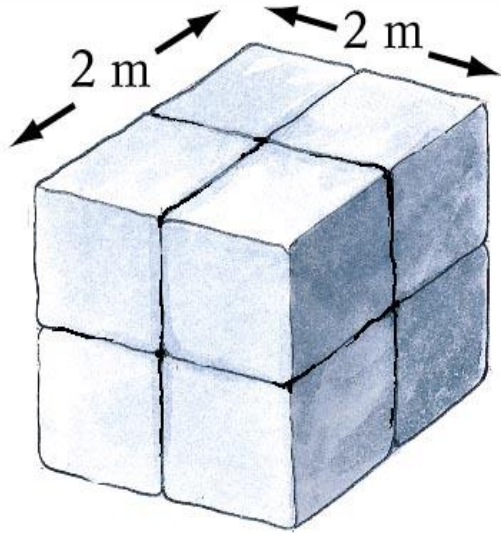
On a vu que les changements de phase sont des transformations thermodynamiques qui tendent à minimiser l'énergie libre de Gibbs

Énergie de surface : négligeable?

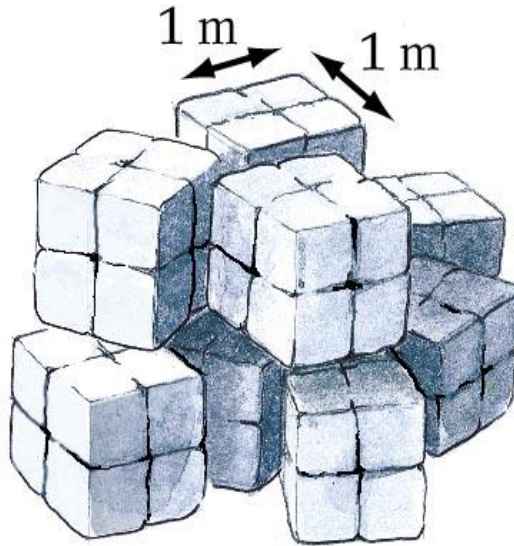


Énergie de surface : négligeable?

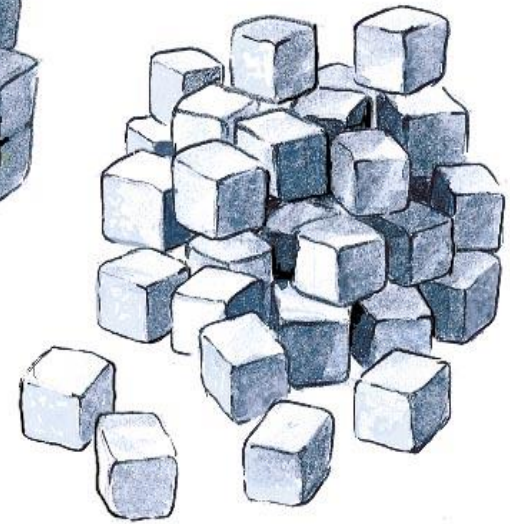
Increase in
surface area



Total surface area = 24 m^2
($4 \text{ m}^2 \times 6 \text{ sides}$)



Total surface area = 48 m^2
($1 \text{ m}^2 \times 6 \text{ sides} \times 8 \text{ cubes}$)

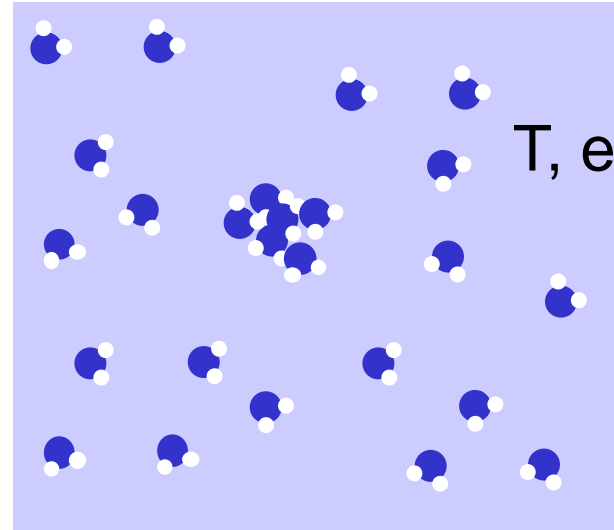


Total surface area = 96 m^2
($0.25 \text{ m}^2 \times 6 \text{ sides} \times 64 \text{ cubes}$)

Équilibre de phases: $dG = 0$

Formation d'un embryon
de goutte liquide au sein
de la vapeur d'eau de
pression e et température T

$$dG = 0$$



$$g_w = g_v - \frac{2\sigma}{r\rho_w}$$

$$\underbrace{r \rightarrow \infty \Rightarrow g_w = g_v}_{\text{surface plane}}$$

Variation de l'énergie de Gibbs avec le rayon de l'embryon.

$$\frac{d}{dr} \left(g_w - g_v + \frac{2\sigma}{r\rho_w} \right) = 0$$



démonstration

$$\ln \left(\frac{e_{sr}}{e_{s\infty}} \right) = \ln S \cong \left(\frac{2\sigma}{r^* \rho_w R_v T} \right) + \underbrace{\frac{\rho_v}{\rho_w} \left(\frac{e - e_{s\infty}}{e} \right)}_{\text{négligeable}}$$

Erreur dans les notes de cours pg. 14 (premières équations)

Rayon critique : r^* ou r_c

$$r^* = \frac{2\sigma}{\rho_w R_v T \ln S}$$

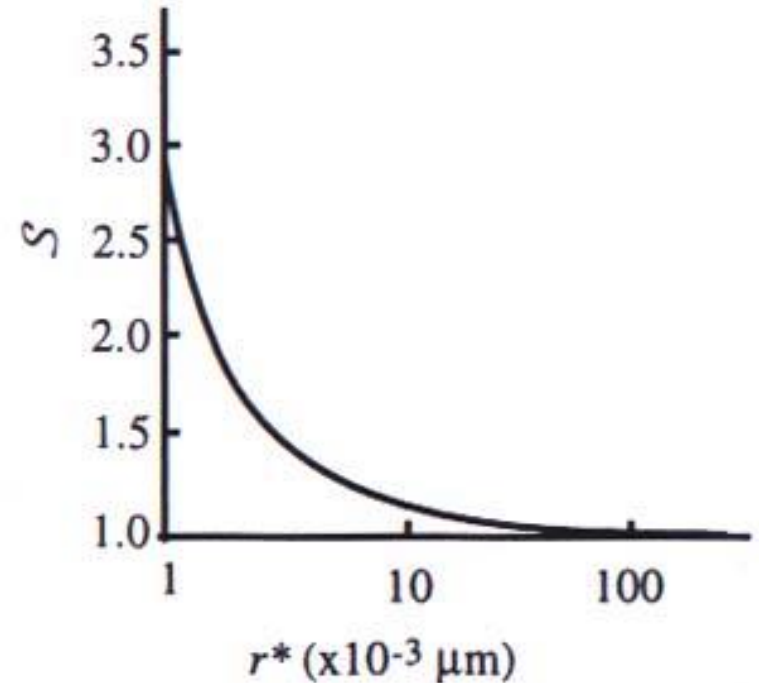
où $S = e/e_s(\infty)$ est le **rapport de saturation**

TABLE 6.1. Radii and Number of Molecules in Droplets of Pure Water in Equilibrium with the Vapor at 0°C

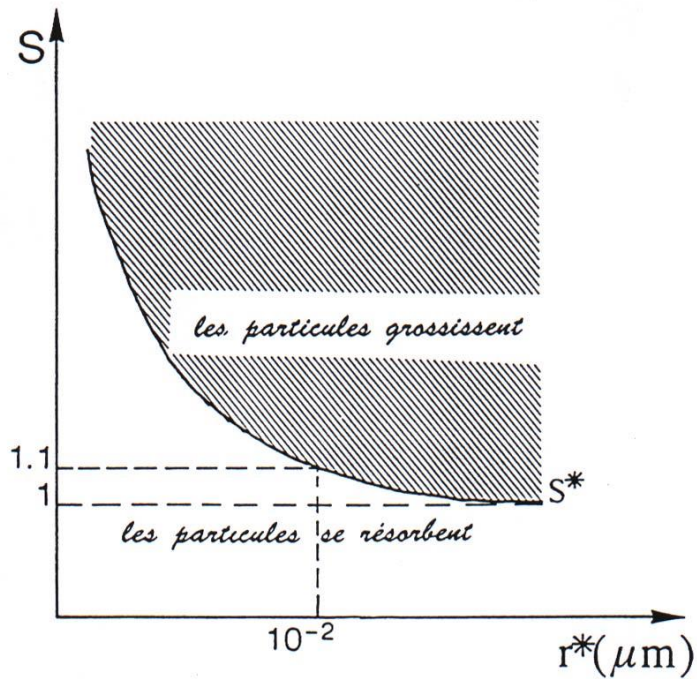
Saturation ratio S	Critical radius r_c (μm)	Number of molecules n
1	∞	∞
1.01	1.208×10^{-1}	2.468×10^8
1.10	1.261×10^{-2}	2.807×10^5
1.5	2.964×10^{-3}	3.645×10^3
2	1.734×10^{-3}	730
3	1.094×10^{-3}	183
4	8.671×10^{-4}	91
5	7.468×10^{-4}	58
10	5.221×10^{-4}	20

Rapport de saturation d'équilibre en fonction du rayon

$$S \cong \frac{e_{sr}}{e_{s\infty}} = \exp\left(\frac{2\sigma}{r^* \rho_w R_v T}\right)$$



Rapport de saturation d'équilibre en fonction du rayon



La croissance dépend de la différence entre $e_s(r)$ et e

$e < e_s(r)$ décroissance (évaporation)
 $e > e_s(r)$ croissance (condensation)

Quand le rayon de la goutte est tel que $e = e_s(r)$ la goutte est stable :

Nucléation hétérogène

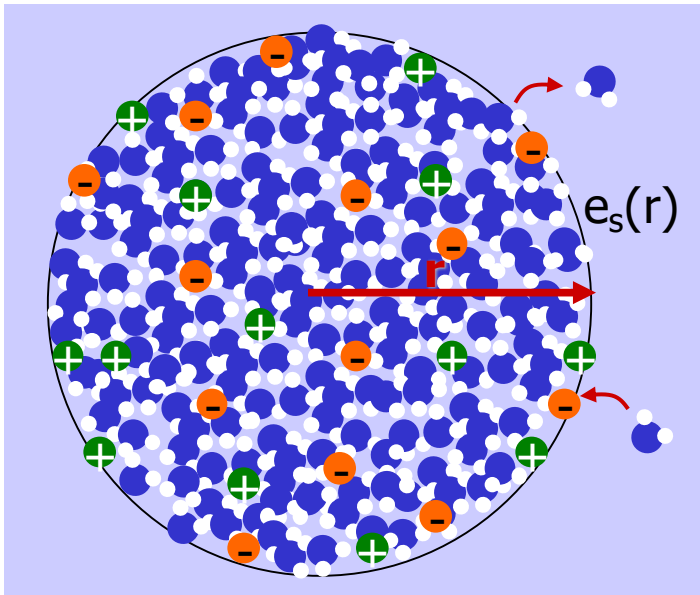
La thermodynamique statistique montre que **S doit être de 300-600%** pour qu'on puisse observer **une nucléation homogène par cm³ par seconde** dans l'atmosphère.

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

La nucléation (transition de phase avec formation d'une interface) requiert un substrat (**noyaux de condensation**).

La nucléation hétérogène : noyaux de condensation

Les noyaux de condensation solubles dans l'eau diminuent la tension de vapeur d'équilibre, e_s

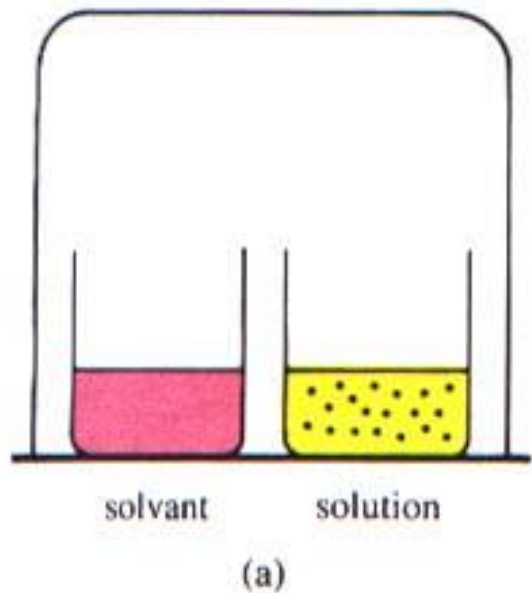


La présence de molécules de soluté à la surface de la goutte fait que le flux de molécules de la surface du liquide vers la phase gazeuse diminue. L'équilibre est atteint à des pressions de vapeur plus faibles

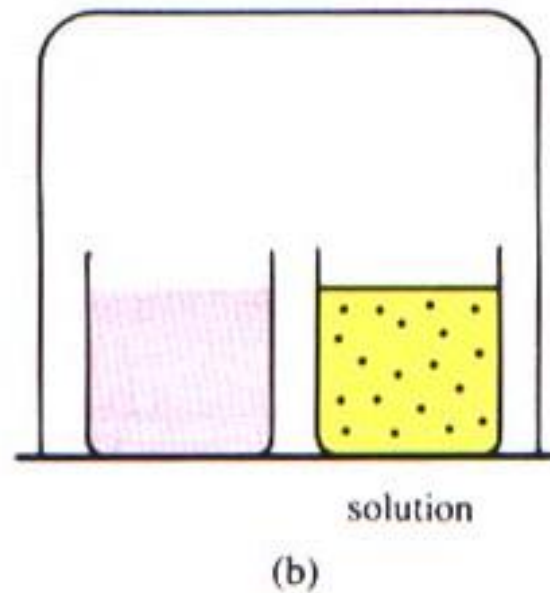
La nucléation hétérogène : loi de Raoult

Expérience

temps initial

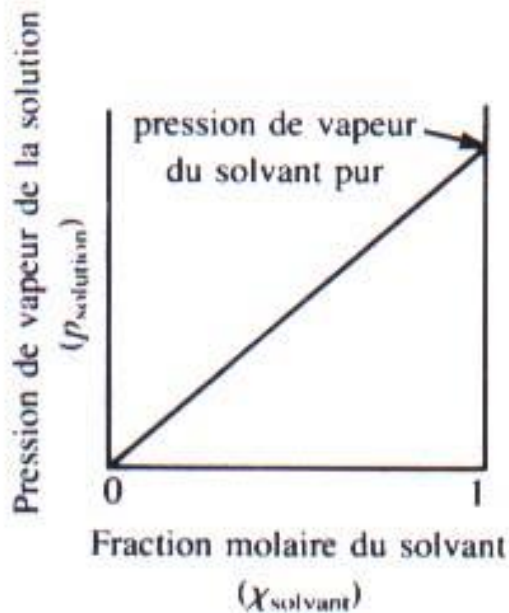


quelque temps après...



La nucléation hétérogène : loi de Raoult

Les noyaux de condensation solubles dans l'eau diminuent la tension de vapeur d'équilibre, e_s



$$P_{solution} = \chi_{solvant} P_{solvant}^0$$

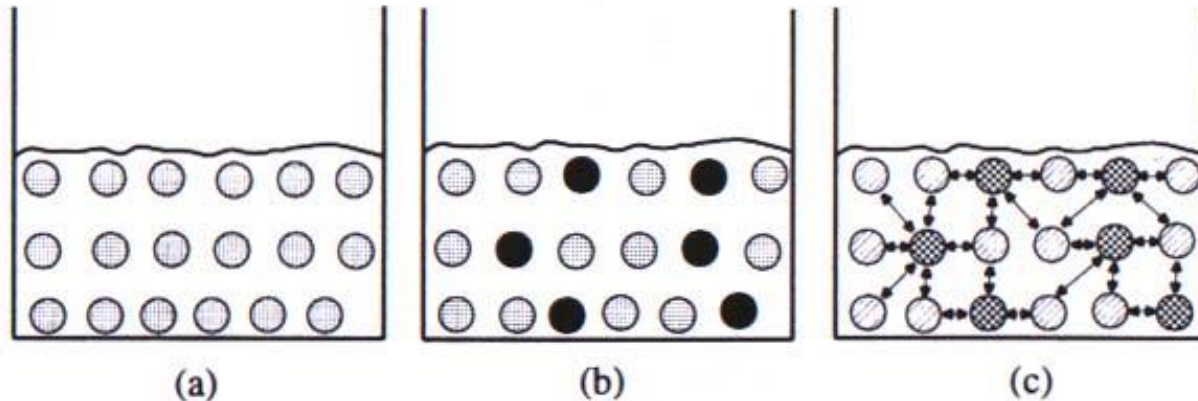
Où χ est la fraction molaire

$$\chi_{solvant} = \frac{n_{solvant}}{n_{totale}}$$

La nucléation hétérogène : loi de van 't Hoff. Soluté électrolytique

$$n_{\text{soluté}}^{\text{eff}} = i n_{\text{soluté}}$$

$$\chi_{\text{solvant}} = \frac{n_{\text{solvant}}}{n_{\text{totale}}} = \frac{n_{\text{solvant}}}{n_{\text{solvant}} + i n_{\text{soluté}}}$$



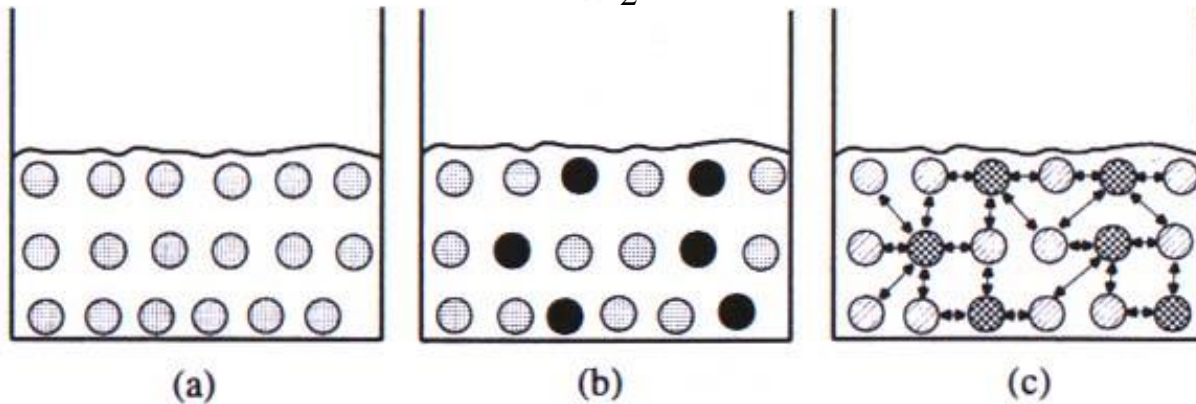
La nucléation hétérogène :

cas d'une goutte formée sur un aérosol électrolytique

$$P_{solution} = \chi_{solvant} P_{solvant}^0$$

$$\chi_{solvant} = \frac{n_{solvant}}{n_{solvant} + in_{soluté}}$$

$$e_s(n_{solution}) = \frac{n_{H_2O}}{n_{H_2O} + in_{sel}} e_s$$



La nucléation hétérogène : effet de solution (aérosol électrolytique)

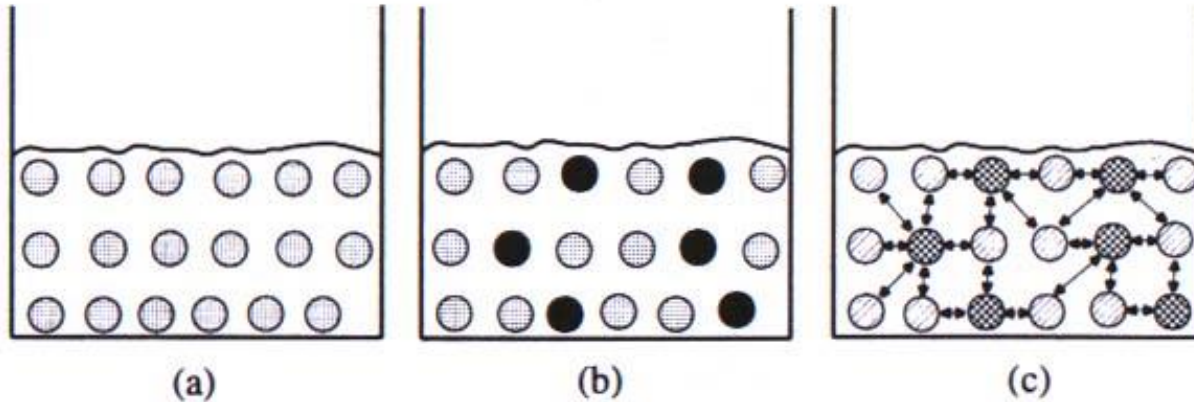
$$e_s(n_{solution}) = \frac{n_{H_2O}}{n_{H_2O} + in_{sel}} e_s \cong 1 - \frac{in_{sel}}{n_{H_2O}}$$

$$n_{sel} = \frac{m_{sel}}{M_{sel}}$$

$$n_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}}$$

$$\frac{e_s(n_{solution})}{e_s} = 1 - \frac{b}{r^3}$$

$$b = \frac{3iM_v m_{sel}}{4\pi M_{sel} \rho_w}$$



La nucléation hétérogène :

cas d'une goutte formée sur un aérosol électrolytique

$$\frac{e_{sr}}{e_{s\infty}} = \exp\left(\frac{2\sigma}{r^* \rho_w R_v T}\right)$$

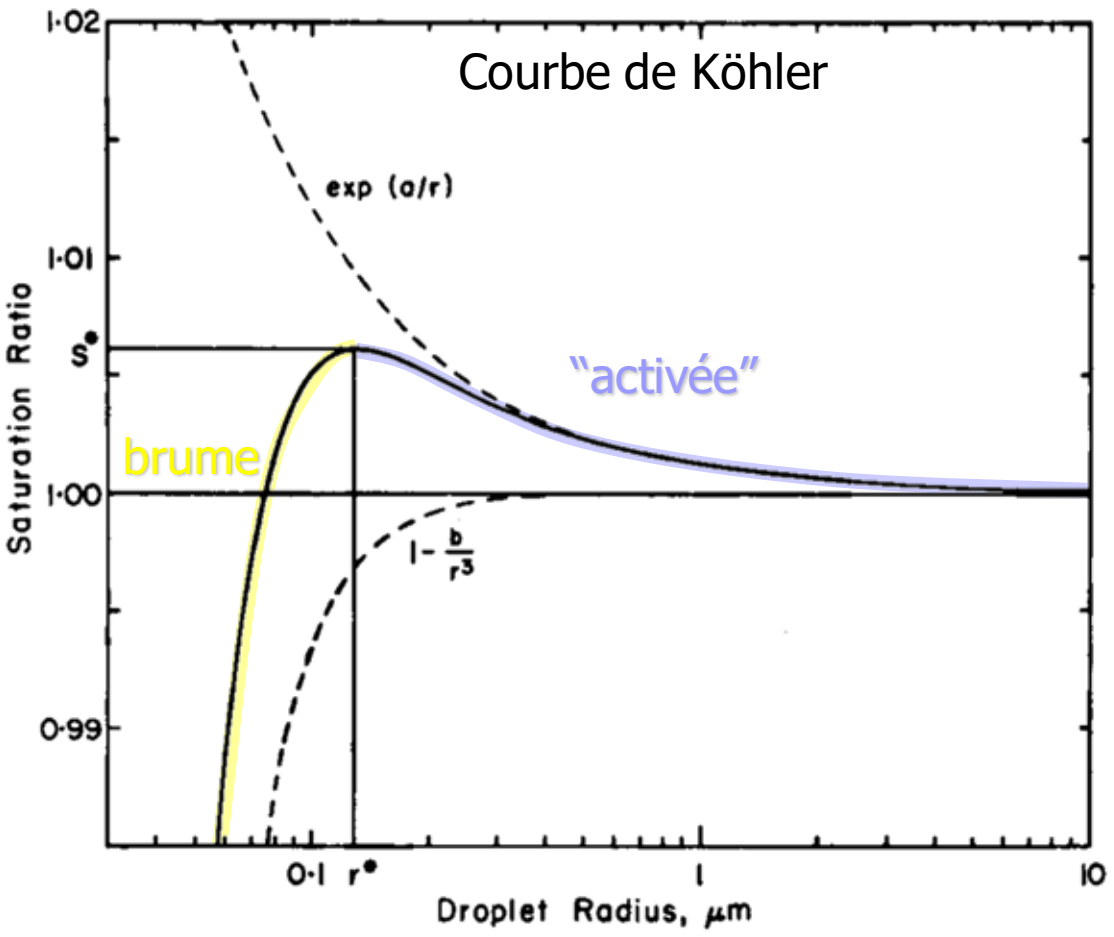
Effet de courbure

$$\frac{e_s(n_{solution})}{e_s} = 1 - \frac{b}{r^3}$$

Effet de solution

$$\frac{e_{sr}}{e_{s\infty}} = \left(1 - \frac{b}{r^3}\right) \exp\left(\frac{a}{r}\right)$$

La nucléation hétérogène : courbe de Köhler



$$\frac{e_{sr}}{e_{s\infty}} = \left(1 - \frac{b}{r^3}\right) \exp\left(\frac{a}{r}\right)$$

$$\cong 1 + \frac{a}{r} - \frac{b}{r^3}$$

$$a = 2\sigma / \rho_L R_V T,$$

$$b = 3im_V M / 4\pi \rho_L m_s$$

Quel est le terme dominant quand HR < 100% ?

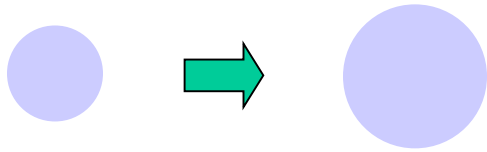
Pourquoi la courbe de Köhler s'approche de 1.0 quand r augmente?

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

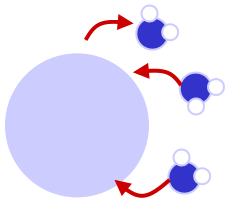
Résumé

Effet de courbure $\frac{e_s(r)}{e_s(\infty)} = e^{\frac{2\sigma}{rR_v p_i T}} = e^{\frac{a}{r}}$

(note: pression de vapeur **saturante** est la pression de vapeur requise pour l'**équilibre**)



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)



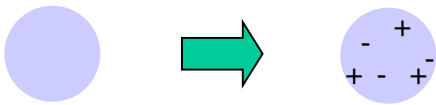
(Pourquoi se processus requiert un état de sursaturation?)

Parce que ce phénomène de rétroaction positive n'a pas lieu facilement dans l'atmosphère.

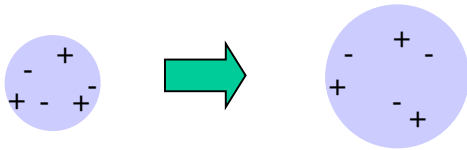
Résumé

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

Effet de solution $\frac{e'_s(r)}{e_s(\infty)} = \left[1 - \frac{b}{r^3}\right] e^{a/r} \approx 1 + \frac{a}{r} - \frac{b}{r^3}$



L'addition d'un soluté diminue la tension 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 tension d'équilibre) diminuent aussi.

Formation des cristaux de glace dans les nuages : la nucléation de la phase solide

- Nuage froid {
 - Surfondu
 - Mixte
 - Glacé
- Nucléation homogène
- Nucléation hétérogène
- Types de noyaux de congélation

La nucléation de la phase solide

Par analogie avec la nucléation de la phase liquide on admet qu'il existe un rayon critique à partir duquel il devient possible la formation d'un cristal

$$r^* = \frac{2\sigma_{il}}{\rho_i R_v \ln(e_s / e_{si})}$$

$$r^* = \frac{2\sigma_{il} T_t}{\rho_i \bar{l}_{il} (T_t - T)}$$

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

Température de congélation versus la taille des gouttes

Diamètre de la goutte (μm)	Température de congélation ($^{\circ}\text{C}$)
1	-42.3
10	-38.2
100	-34.8
1000	-32.2
10000	-30.0

Mécanismes de nucléation hétérogène

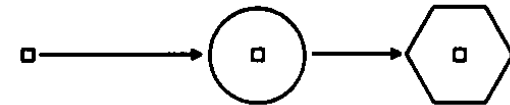
La nucléation hétérogène a lieu à des températures plus élevées en présence de noyaux de condensation.

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

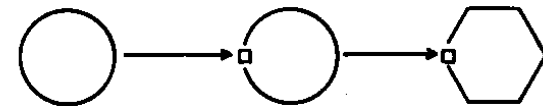
Condensation solide



Condensation suivie de solidification



Solidification par contact



Solidification par immersion

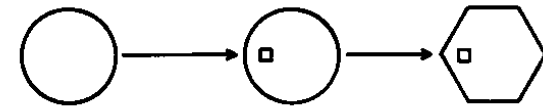


TABLE 9.1. *Temperatures at which different substances nucleate ice. (From Houghton, 1985)*

Substance	Crystal lattice dimension		Temperature to nucleate ice (°C)	Comments
	<i>a</i> axis (Å)	<i>c</i> 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 ₂ S	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	(Silicate)
Kaolinite	5.16	7.38	-9	
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	(Bacteria in leaf mold)
Chloesterol	14.0	37.8	-2	
Metaldehyde	—	—	-5	
β-Naphthol	8.09	17.8	-8.5	
Phloroglucinol	—	—	-9.4	
Bacterium	—	—	-2.6	
<i>Pseudomonas</i>				
<i>Syringae</i>				

Concentration de cristaux dans les nuages

Dépend :

- a) de la température du sommet
- b) du degré de développement

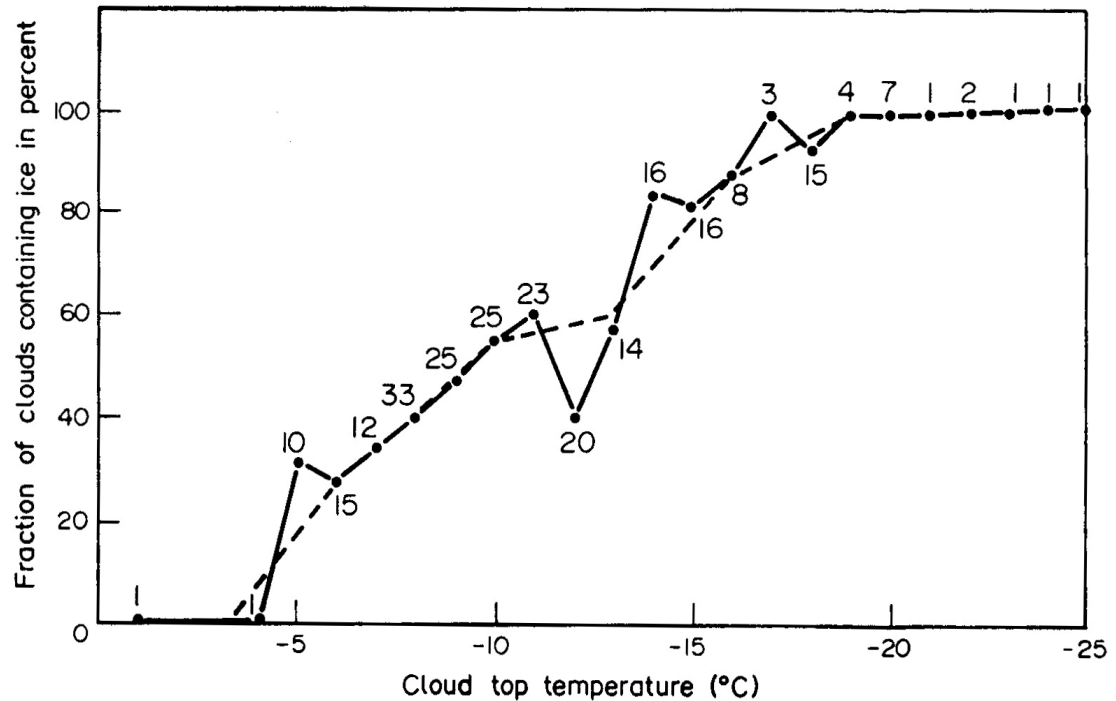
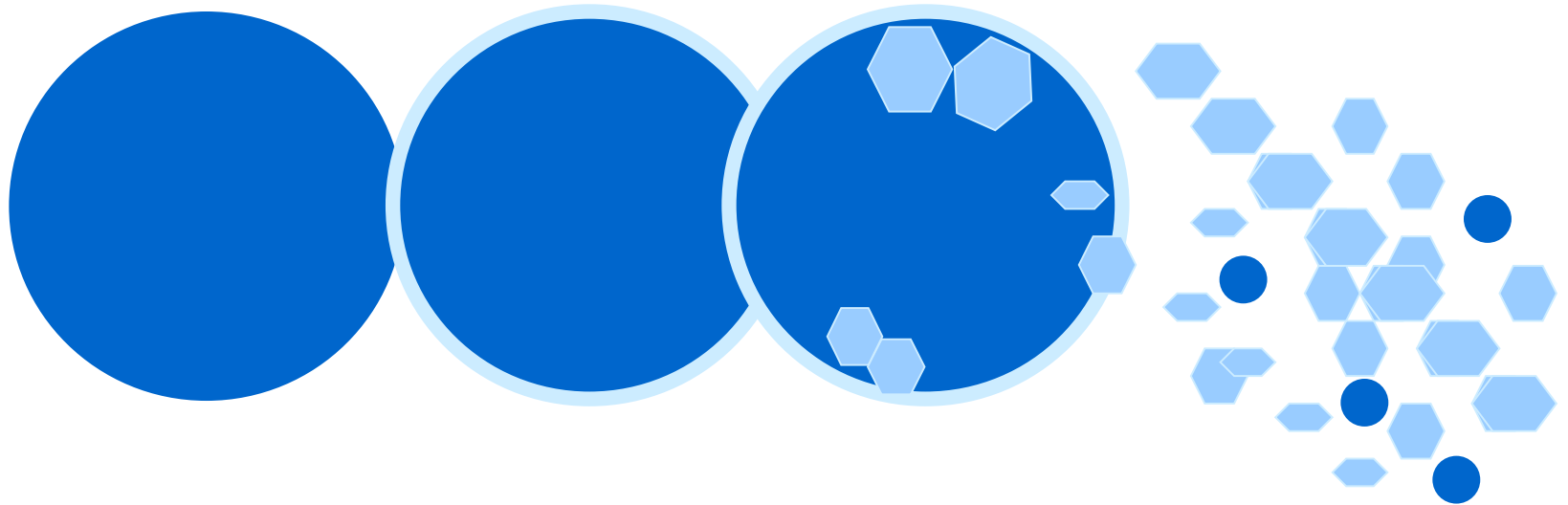
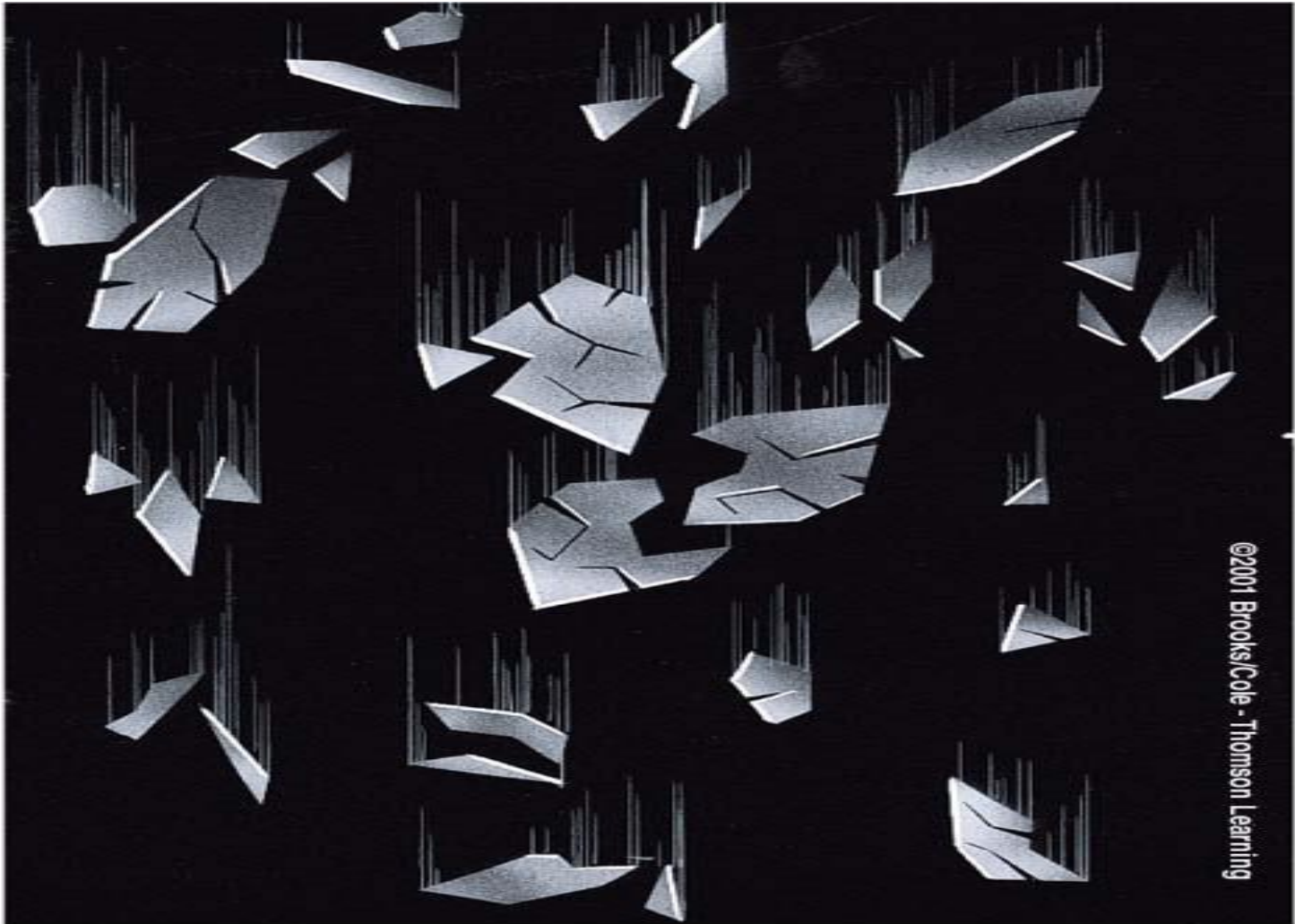


FIG. 5.11. The fraction of clouds containing ice as a function of cloud top temperature, from observations of 258 clouds by several investigators in different regions. The number above each point is the number of observations at that temperature; the dashed curve is a three-point running mean. (From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

Nb de particules de glace mesuré supérieur au nombre de noyaux glaçogènes. Pourquoi??



Nb de particules de glace mesurées supérieur au nombre de noyaux glaçogènes. Pourquoi??



Résumé

- Les gouttelettes des nuages gèlent à des très basses températures (nucléation homogène)
- La présence de certains aérosols, les noyaux de glaciation facilitent la solidification des gouttes (nucléation hétérogène)
- Le nb de noyaux de glaciation est petit dans l'atmosphère \Rightarrow présence de nuages surfondus ou mixtes.

Résumé

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

$$(T_t - T) = \frac{2\sigma_{il}T_t}{r^* \rho_i \bar{l}_{il}}$$

Résumé

Noyaux de congélation

Types

Par déposition

Par contact

Par immersion

Nombre

Loi de Fletcher

$$\ln N = a(T_1 - T)$$

$$T_1 = -20 \text{ C}$$

$$0.3 < a < 0.8$$

Résumé

Multiplication des cristaux

• Par fragmentation de gouttes en voie de solidification

• Par fragmentation des cristaux de glace