



Introduction à la Météorologie

SCA2611

Table des matières

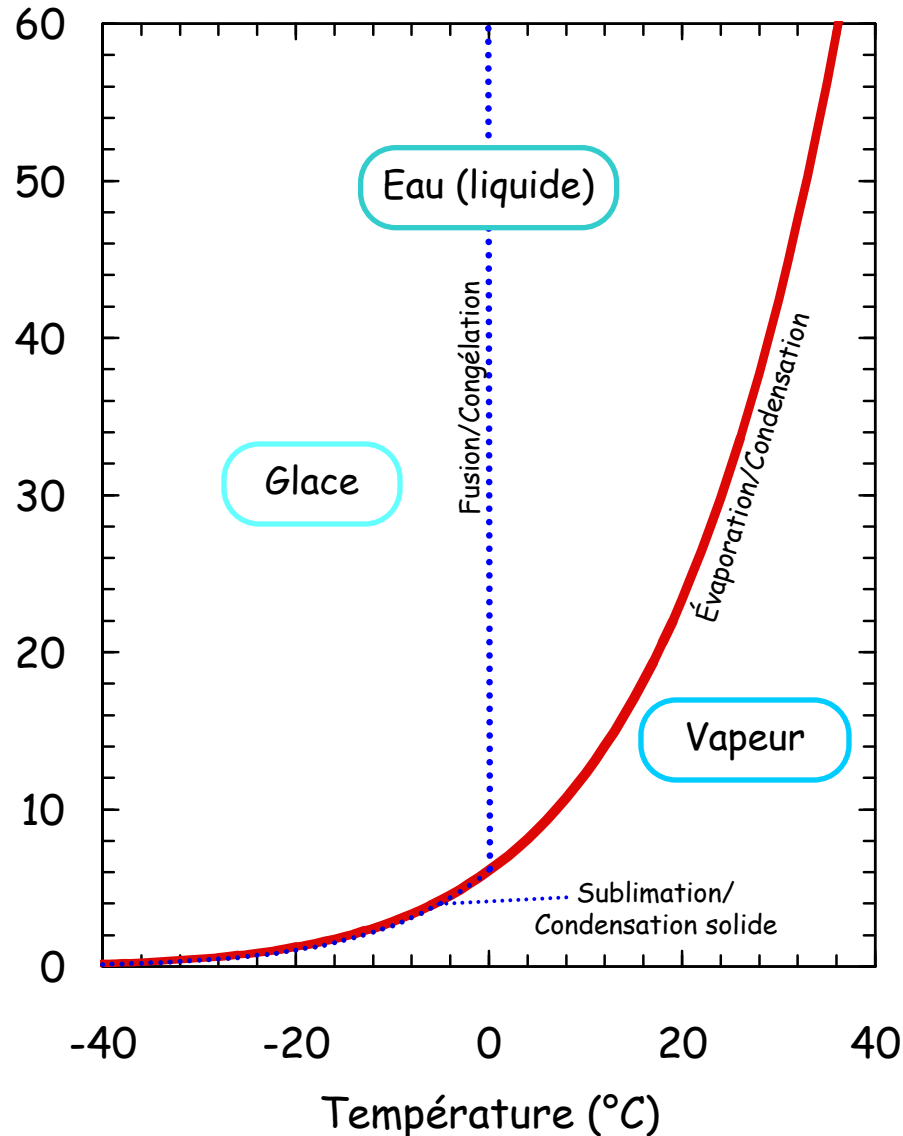
6. Les précipitations

- Formation des gouttelettes de nuage
 - i. Nucléation homogène
 - ii. Nucléation hétérogène (les aérosols)
 - iii. La croissance par condensation
- La formation de la précipitation
 - Nuages chauds
 - Croissance par collision et coalescence
 - Nuages froids
 - Formation des cristaux de glace
 - Processus de Bergeron
- Pluie, neige, grésil et verglas

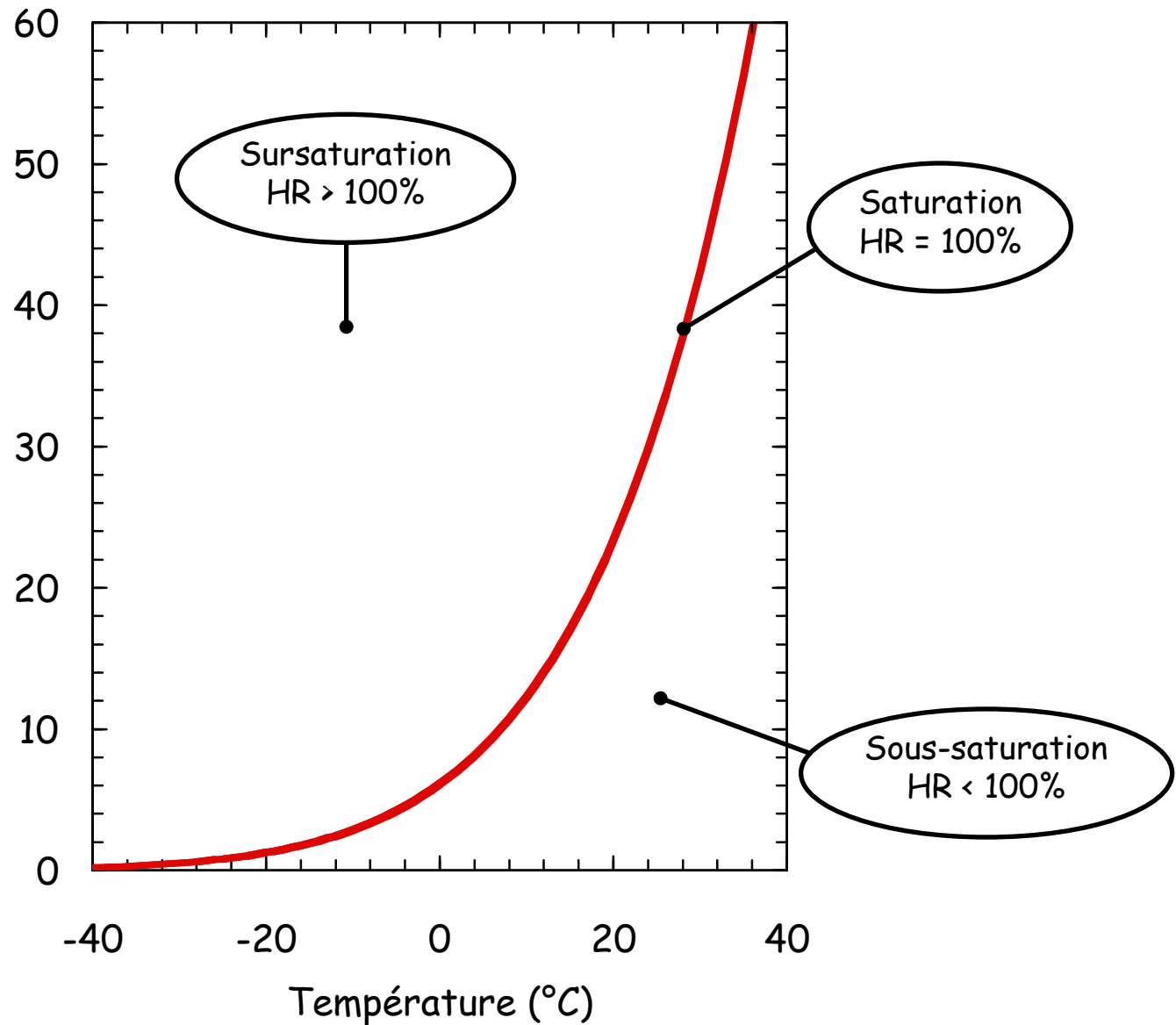
Relation entre e_s et T

Pression de vapeur saturante

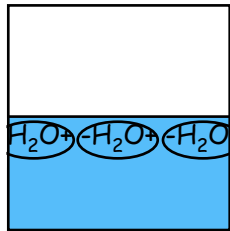
Surface d'eau chimiquement pure



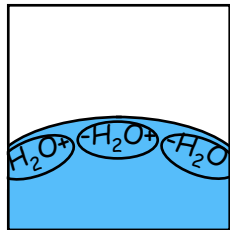
État de saturation



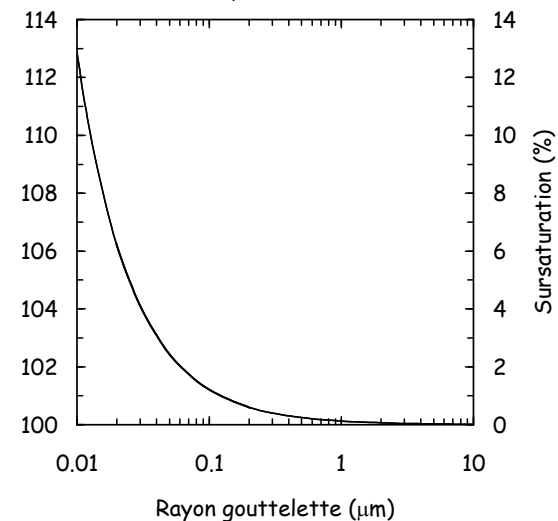
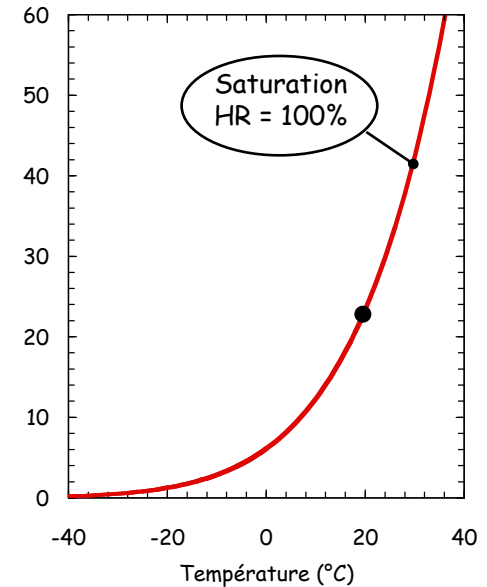
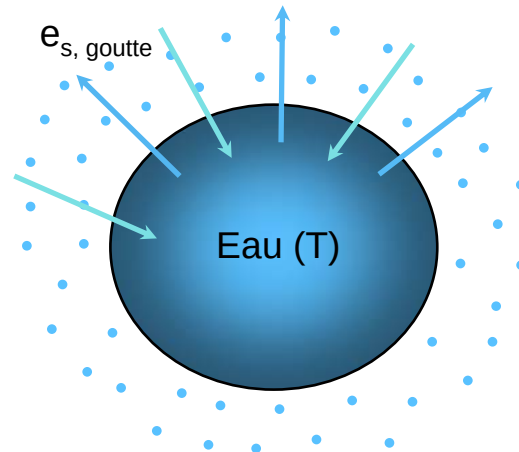
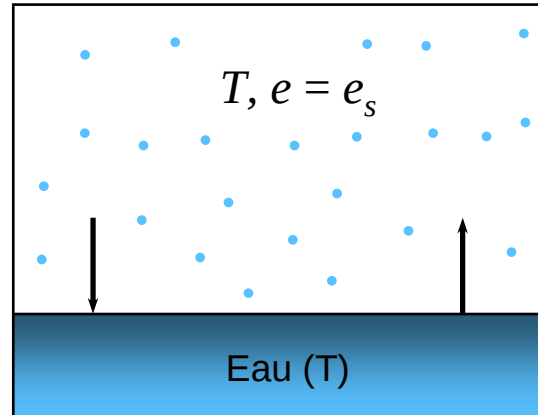
Nucléation homogène : Effet de courbure



Liens forts



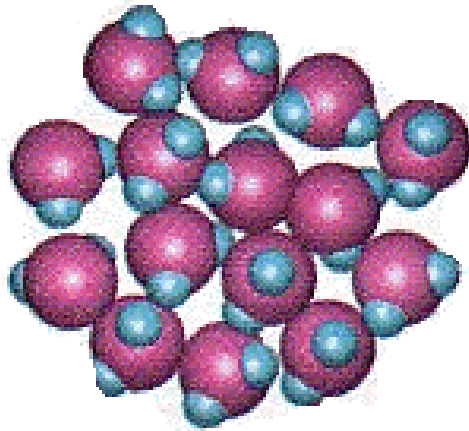
Liens faibles



- La pression de vapeur saturante est plus grande autour d'une gouttelette d'eau pure que sur un plan d'eau pure à la même température

Nucléation homogène d'une gouttelette d'eau pure

Effet de courbure



Embryon de gouttelette
de nuage

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		
110		
150		
200		730
300		183
400		91
500		58
1000		20

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

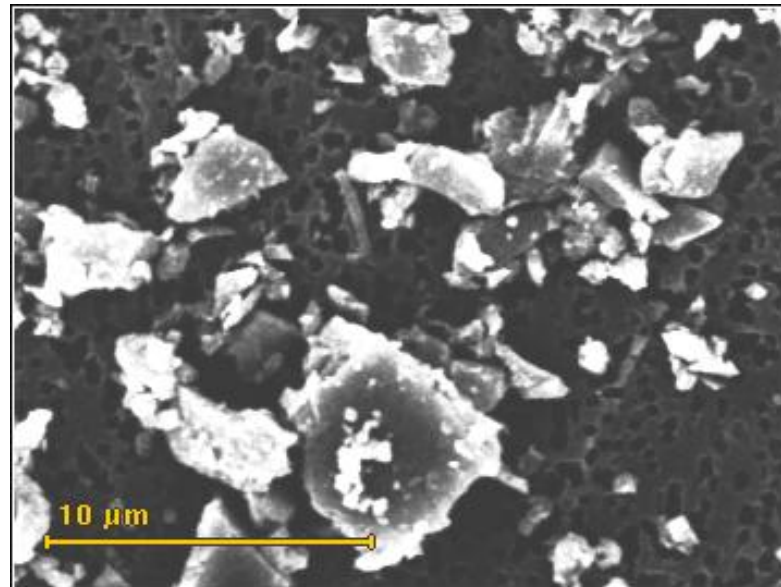
Les aérosols

Nucléation hétérogène

Aérosol : particule solide (-sol) en suspension dans l'air (aéro-).

Les aérosols hygroscopiques

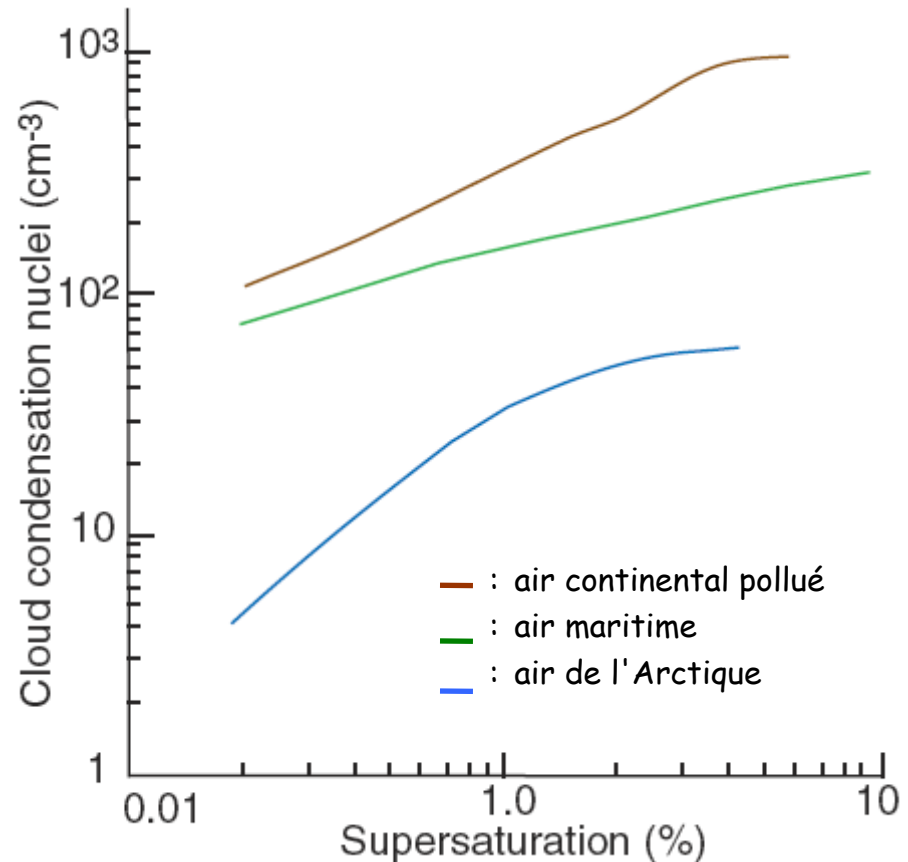
- On peut souvent voir (*-scope*) de l'eau (*hygro-*) se déposer sur ces aérosols. Ils facilitent la nucléation des gouttelettes, car ils offrent une surface sur laquelle l'eau peut se condenser, réduisant ainsi la nécessité d'une concentration élevée de vapeur d'eau autour de la gouttelette, essentiel au maintien de sa cohésion.



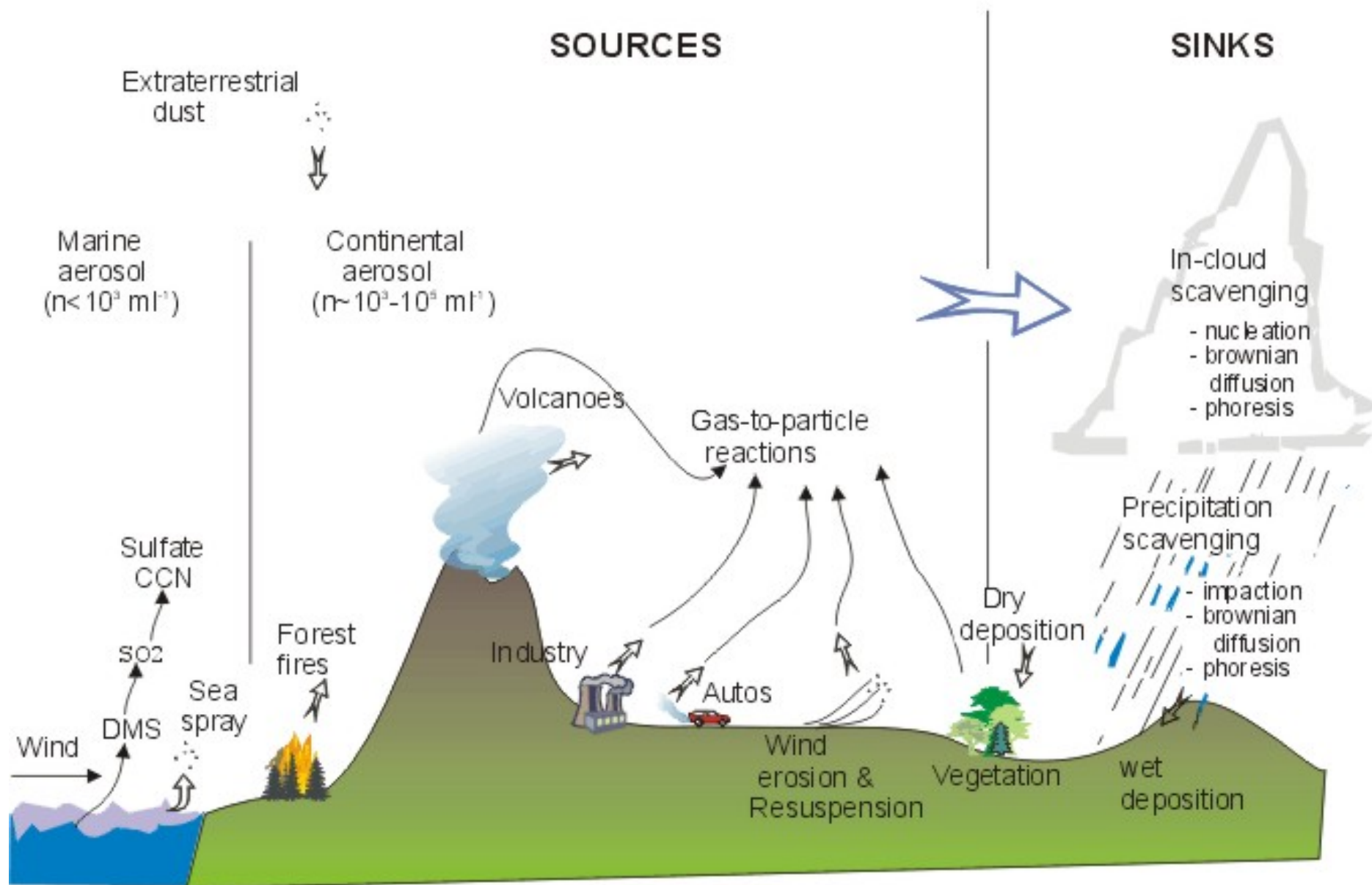
Les aérosols

Les aérosols sont des particules solides et/ou liquides en suspension dans l'air de tailles allant de $0,001 \mu\text{m}$ à quelques dizaines de μm .

- poussières
- bactéries
- sel de mer
- sulfates
- composés organiques

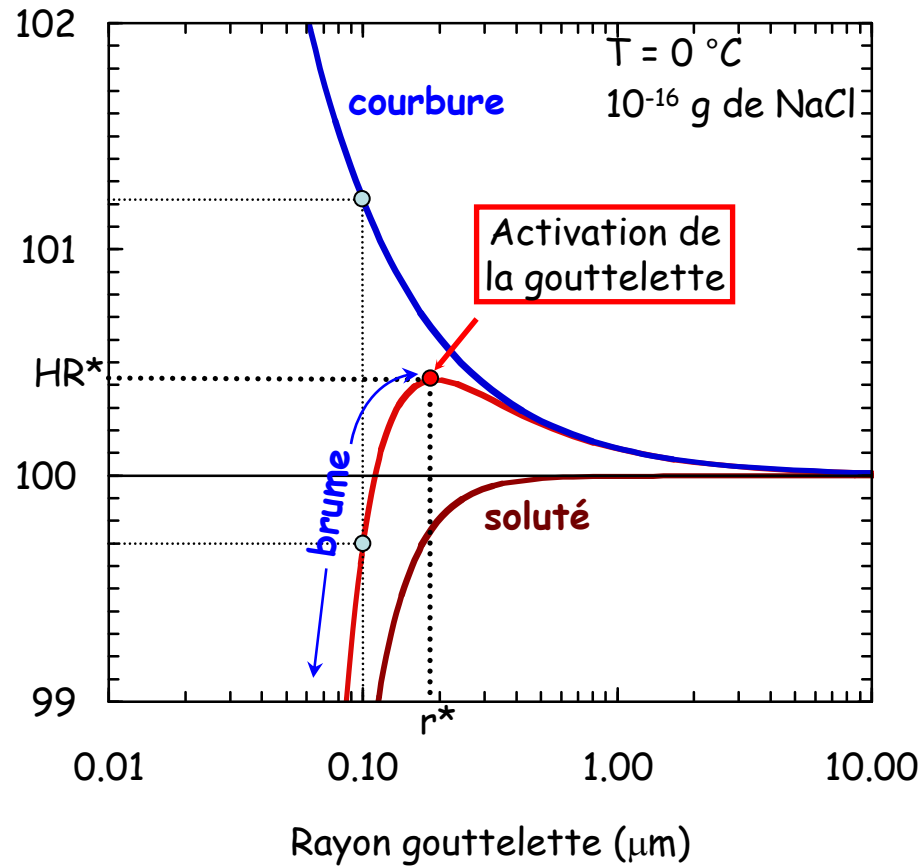


ATMOSPHERIC AEROSOL



Nucléation hétérogène

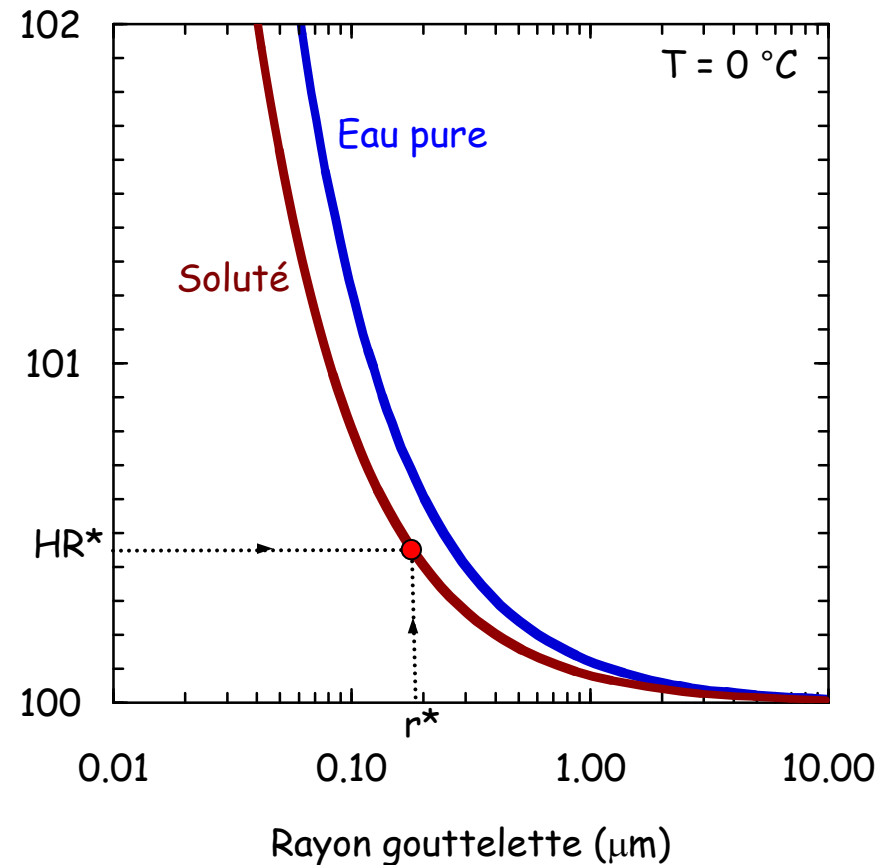
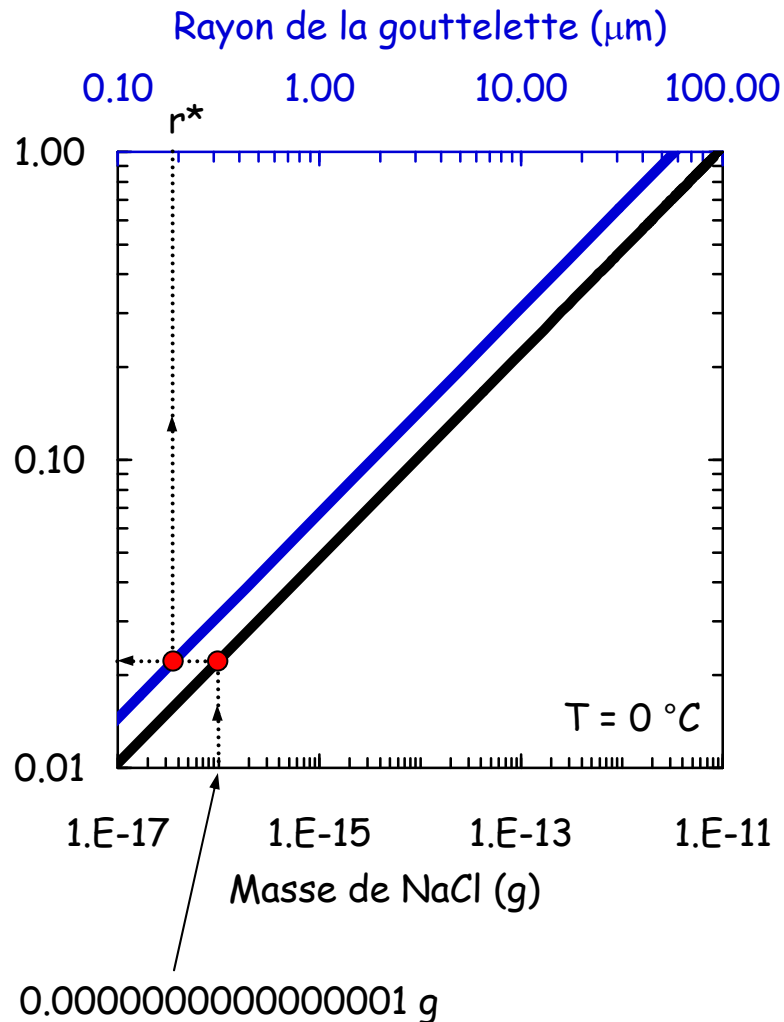
Aérosols solubles



Humidité relative saturante autour d'une gouttelette de soluté formée sur un noyau de 10^{-16} g de NaCl (chlorure de sodium, r ; $0.02\ \mu\text{m}$).

Nucléation hétérogène

Aérosols solubles

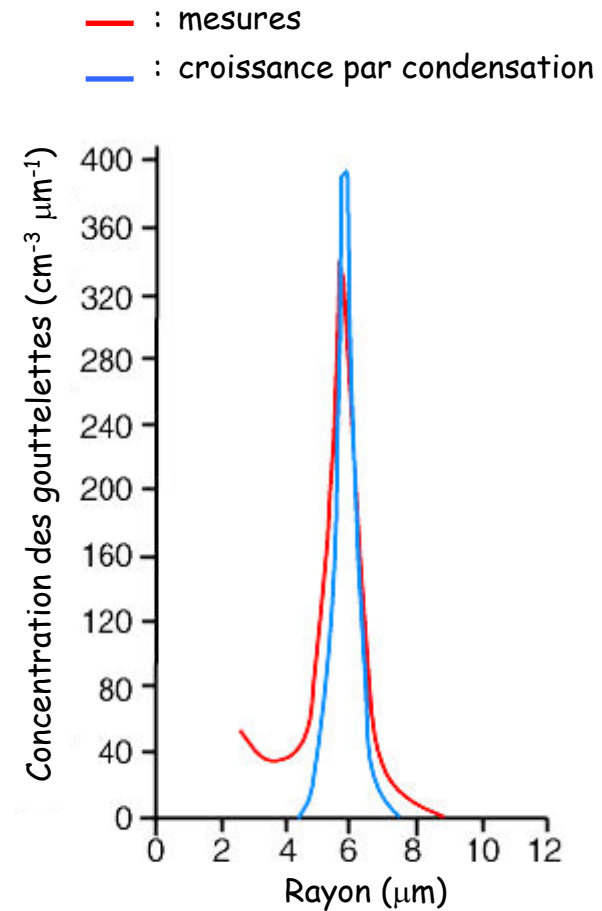
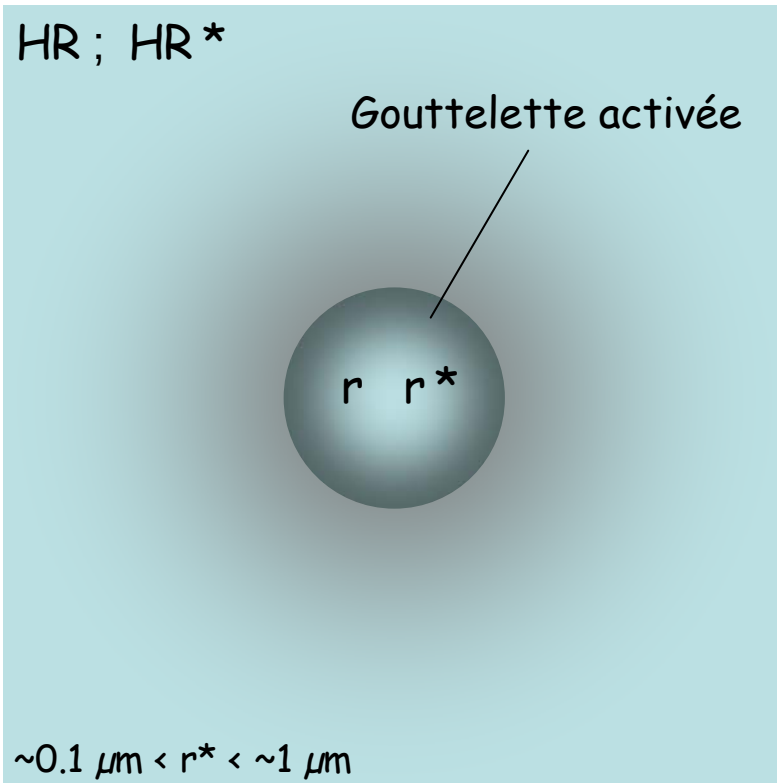


Nucléation hétérogène

- Formation de gouttelettes de brume pour des humidités relatives inférieure à 100 %.
- La nucléation hétérogène permet l'activation des gouttelettes de nuage pour des humidités relatives correspondantes aux observations (légère sursaturation)
- Les particules d'aérosol dont le diamètre est supérieur à $0,02 \mu\text{m}$ peuvent en général servir de noyau de condensation pour les gouttelettes de nuage.

Croissance par condensation

Croissance par condensation



Comparaison entre mesures et modélisation

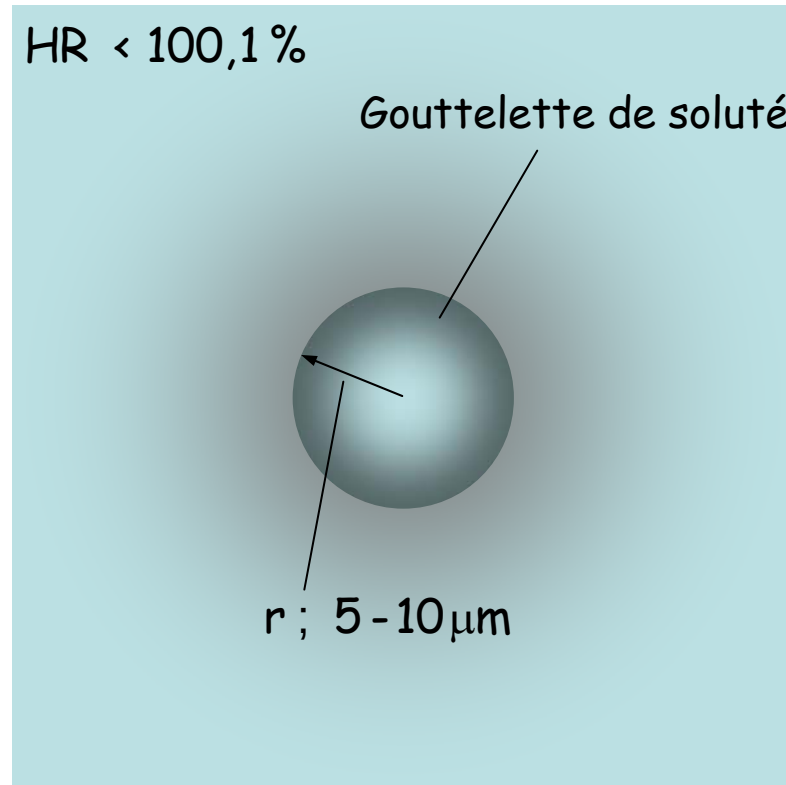
Croissance par condensation

Taux de croissance par condensation sur des noyaux de NaCl
(HR = 100,05 %, p = 900 hPa et T = 0 °C)

Masse du noyau (g)	10^{-14}	10^{-13}	10^{-12}
Rayon du noyau (μm)	0.103	0.223	0.479
Rayon (μm)	Temps (sec) pour croître à partir d'un rayon initial de 0,75 μm		
1	2.4	0.15	0.013
2	130	7.0	0.61
	1 000	320	62
	2 700	1 800	870
	8 500	7 400	5 900
	17 500	16 000	14 500
	44 500	43 500	41 500

- Le taux de croissance par condensation est inversement proportionnelle à la taille de l'hydrométéore. ➔ Il diminue donc en fonction de la taille.
- Ce processus devient peu efficace pour des tailles plus grandes de 5 - 10 μm
- Le temps de formation de la précipitation est d'environ 15 - 30 minutes seulement!

Croissance par condensation



- La seule croissance par condensation ne permet donc pas aux gouttelettes de nuage d'atteindre la taille ($r > \sim 100 \mu\text{m}$) d'une goutte de pluie dans un temps adéquat (30 min).

QUESTION

Une fois que la vapeur d'eau s'est condensée sur un noyau pour devenir une gouttelette ou, comment grossit-elle jusqu'à devenir une goutte, assez lourde pour précipiter?

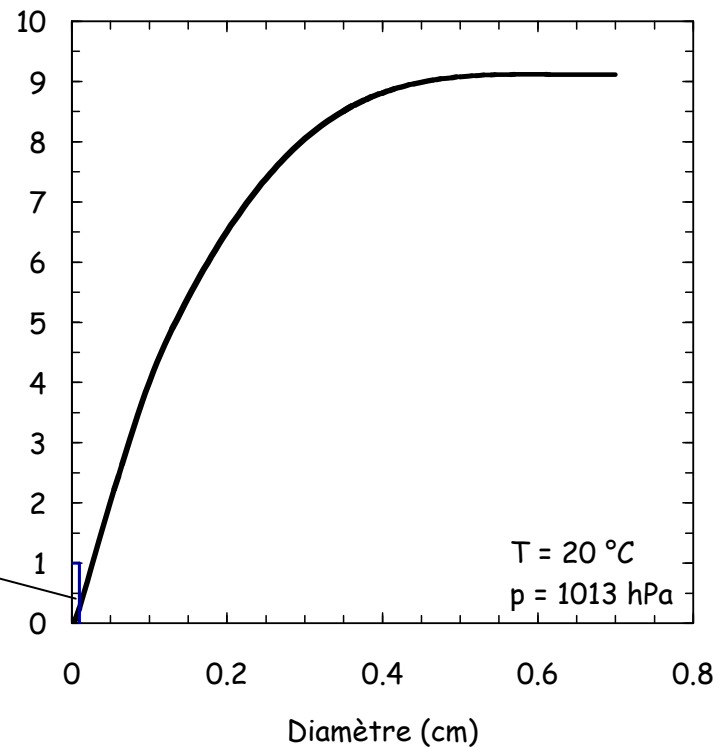
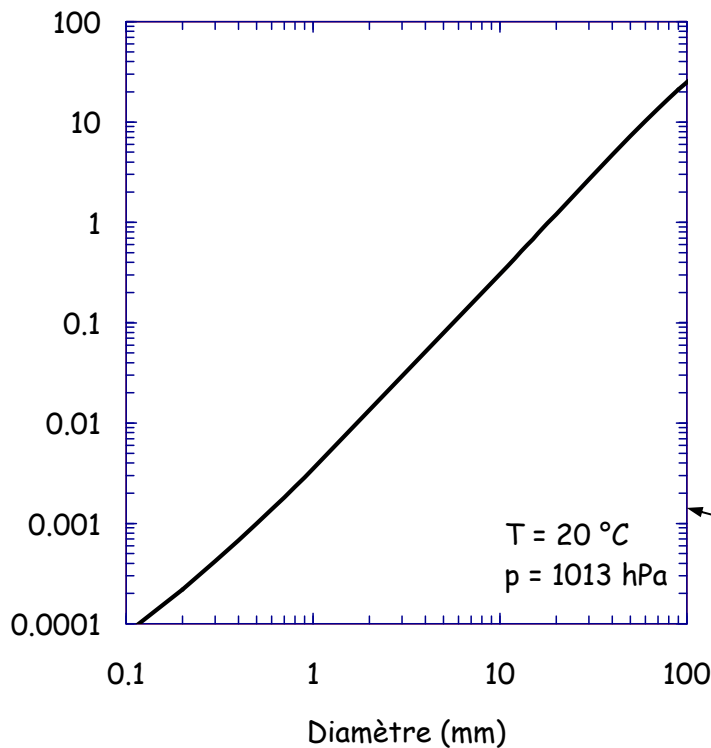
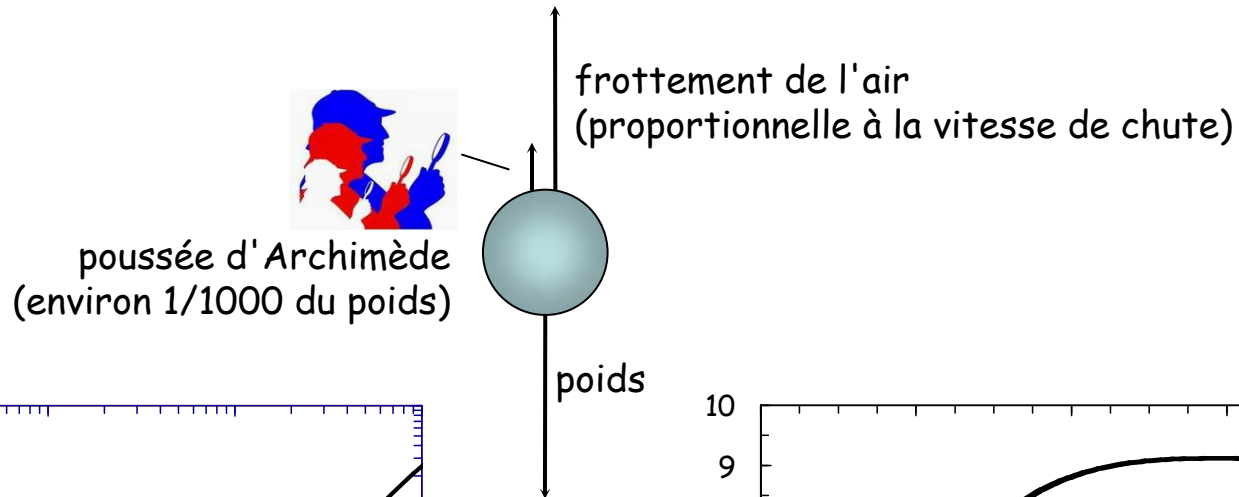


La formation de la pluie

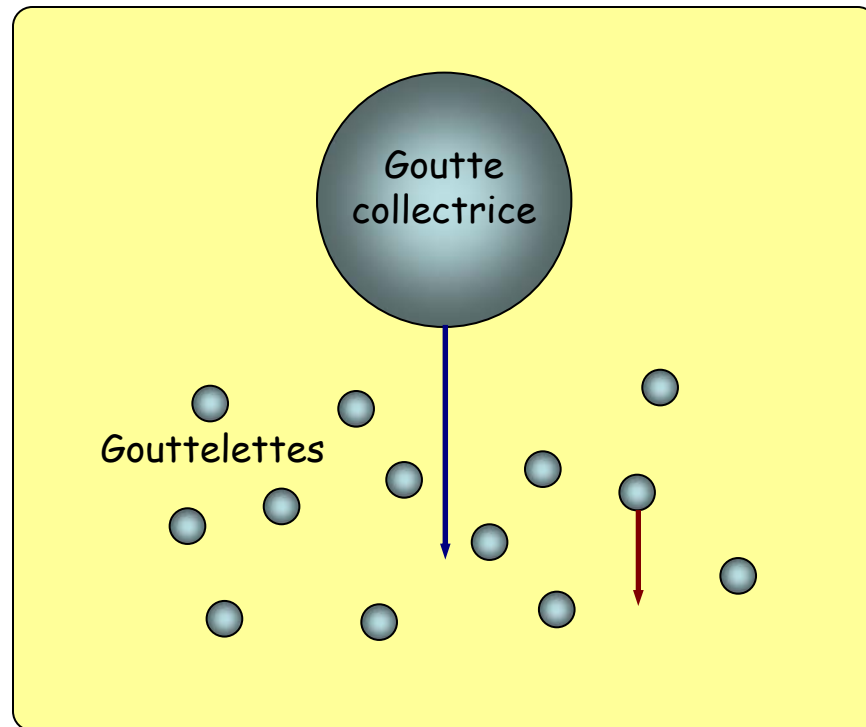
Nuages chauds : $T_{\text{sommet}} > 0^{\circ}\text{C}$

La dynamique des gouttelettes de nuage

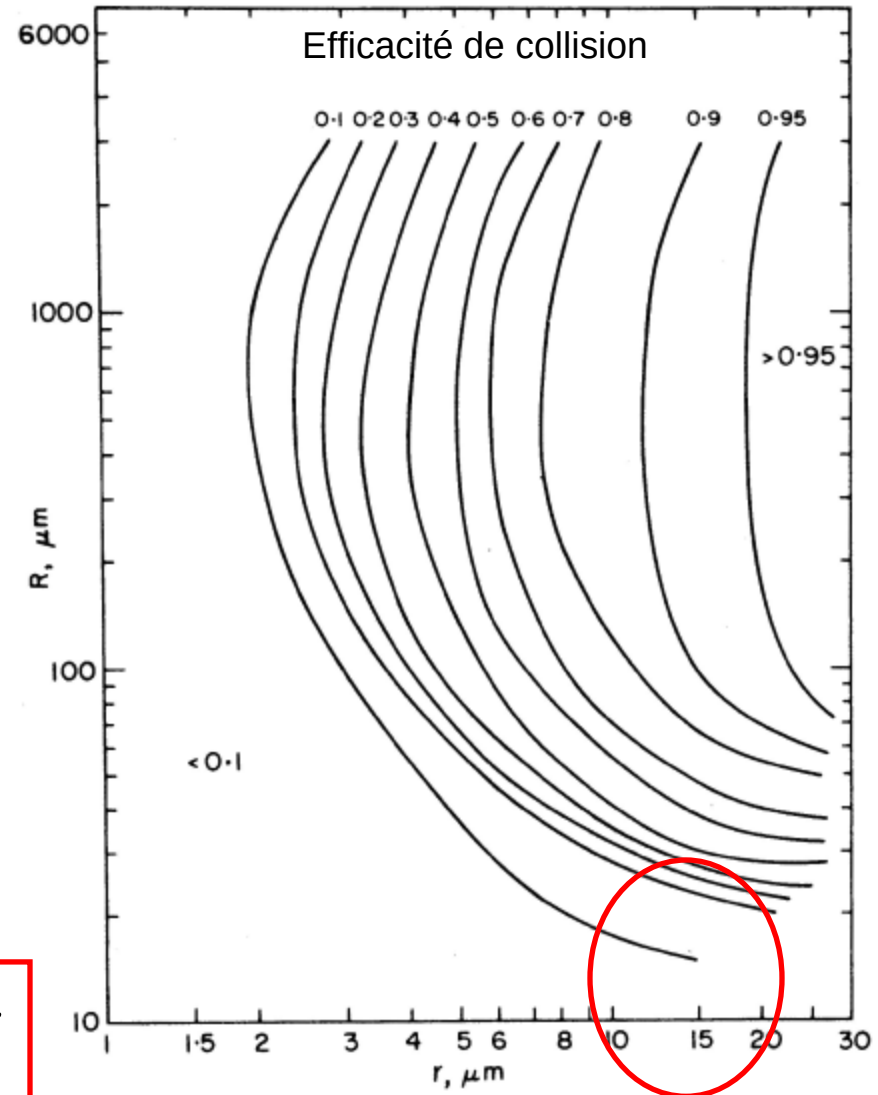
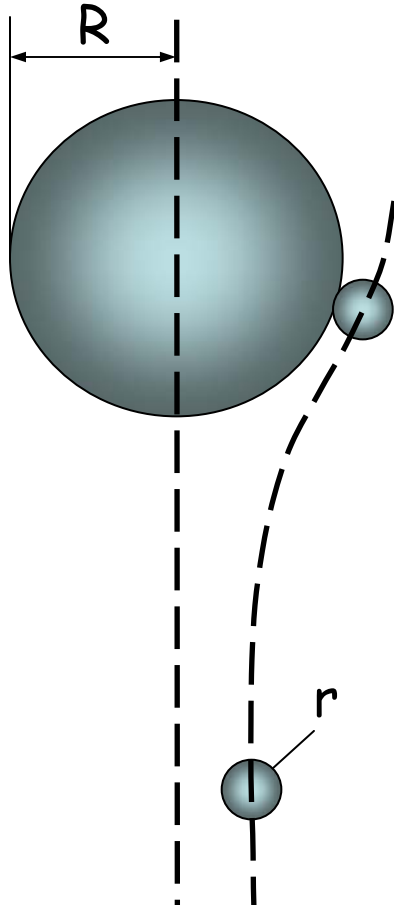
Vitesse terminale de chute



Croissance par collision - coalescence

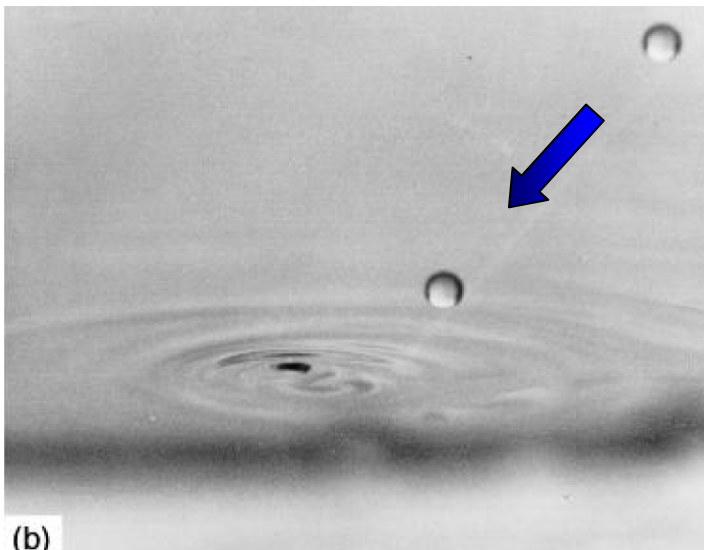
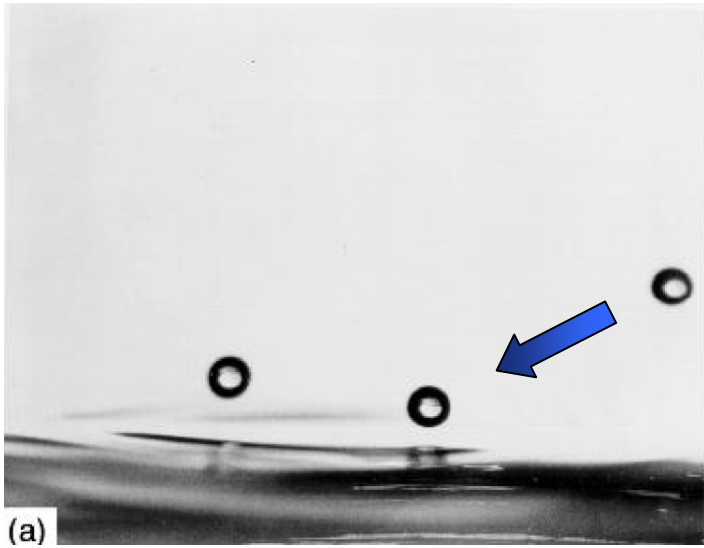


Efficacité de collision

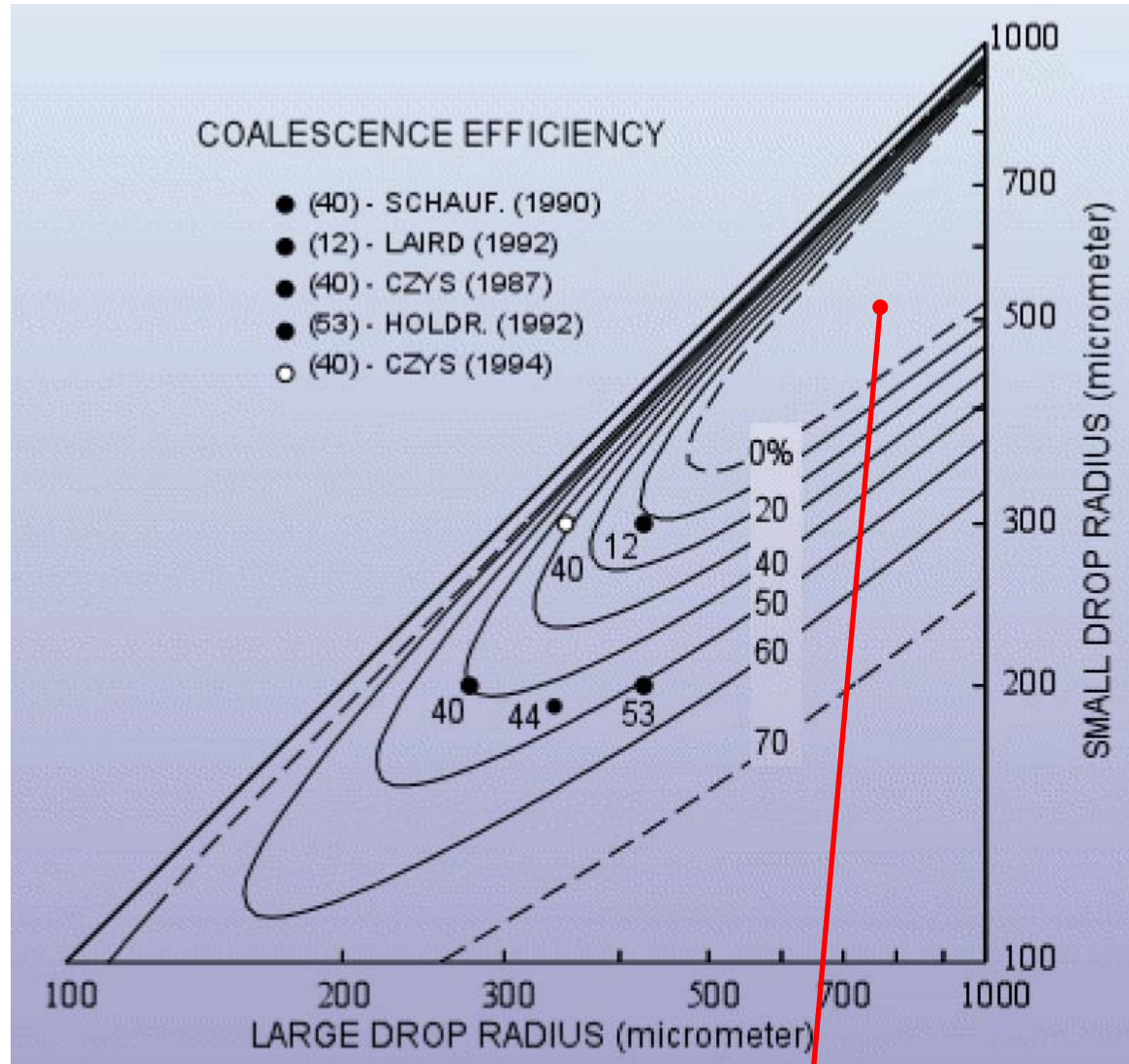


- La collision commence à être efficace pour $R > 20 \mu\text{m}$

Efficacité de coalescence



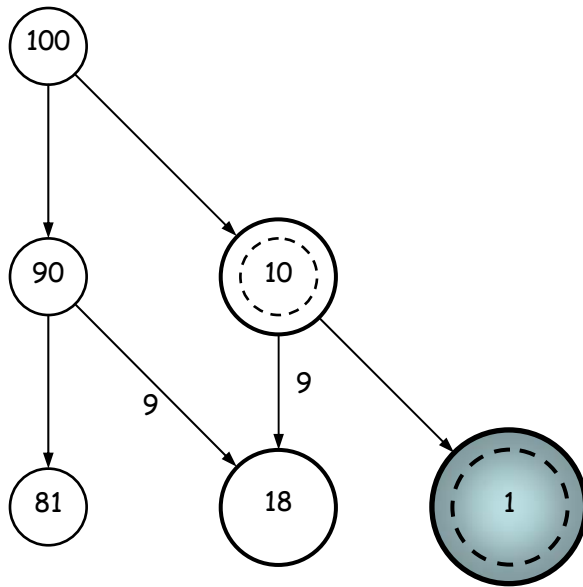
Jet de gouttes d'eau ($\sim 100 \mu\text{m}$) de la droite : a) rebondissement, b) coalescence



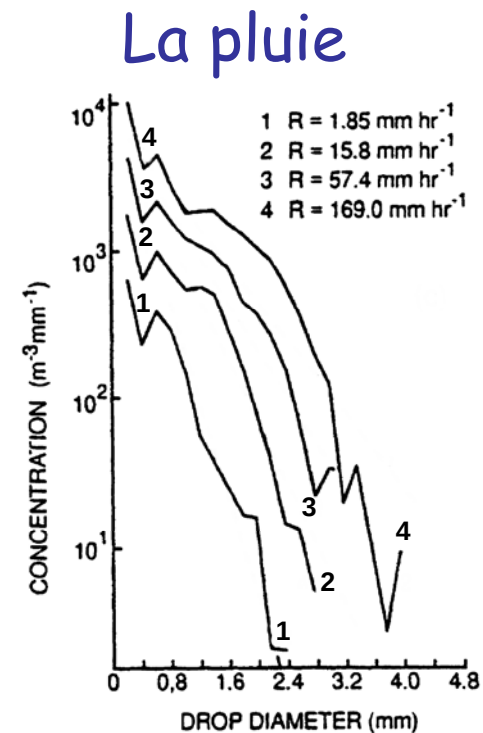
- La coalescence est toujours bonne, sauf pour $R > \sim 400 \mu\text{m}$ et $r > \sim 300 \mu\text{m}$

Croissance stochastique

- La collision et la coalescence d'une gouttelette avec d'autres gouttelettes sont des événements individuels, distincts et distribués statistiquement dans le temps et l'espace.
- Des gouttelettes de la même taille initiale auront atteint après un certain temps des tailles différentes.



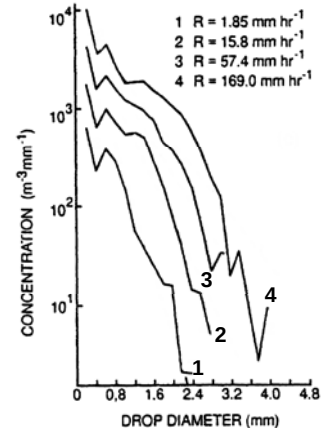
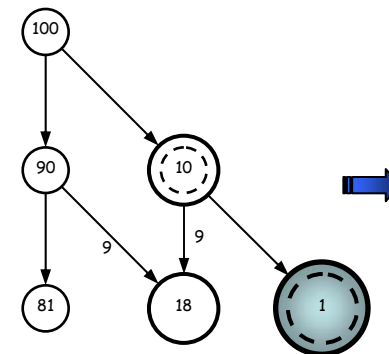
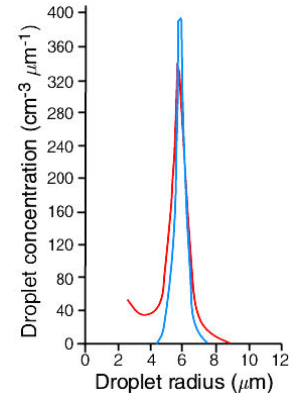
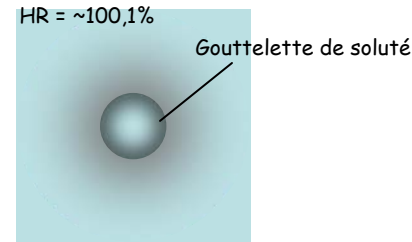
Probabilité de collision et coalescence de 10%



La formation de la pluie

Nuages chauds

- Nucléation hétérogène des gouttelettes de nuage : aérosols.
- Croissance par condensation pour atteindre une taille de 5 - 10 μm .
- Croissance par collision et coalescence stochastiques pour atteindre la taille d'une goutte de pluie.



gouttelettes de nuage :
1000 par cm^3

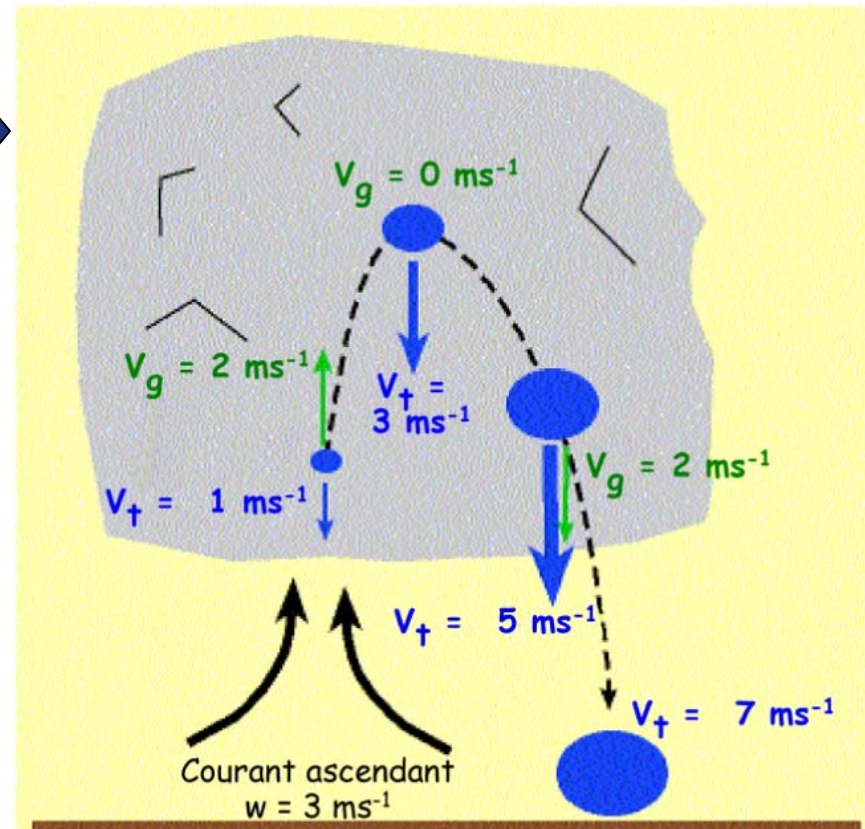
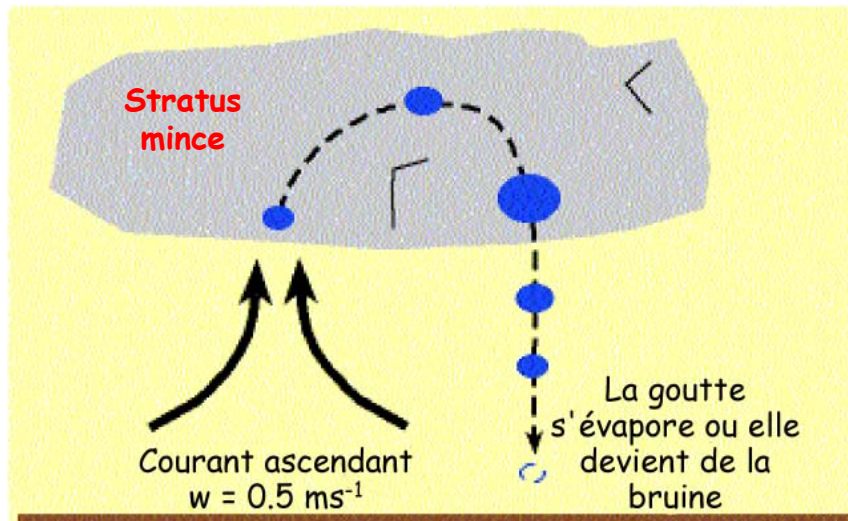


gouttes de pluie :
100 par litre

La formation de la pluie

Nuages chauds

- La croissance par collection est efficace si le nuage est épais et que le mouvement vertical ascendant dans le nuage est fort.



QUESTION

Comment expliquer alors que certains nuages de faible extension verticale produisent de la précipitation ?

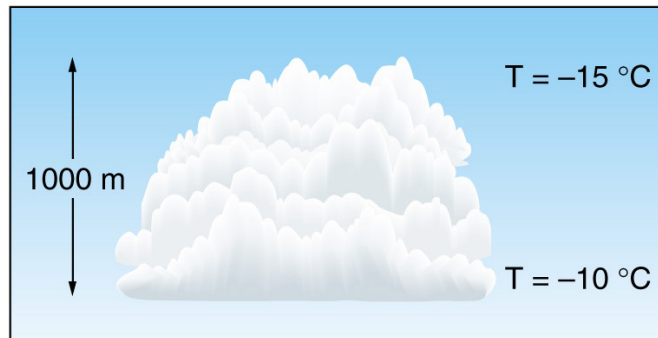


La formation de la précipitation

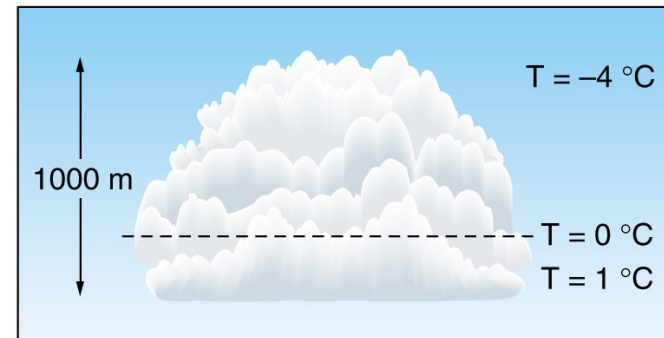
Nuages froids : $T_{\text{sommet}} < 0^{\circ}\text{C}$

Nuages froids

- La majorité des nuages aux moyennes et hautes latitudes ont leur sommet en dessous du point de congélation.



(a) Nuages froid



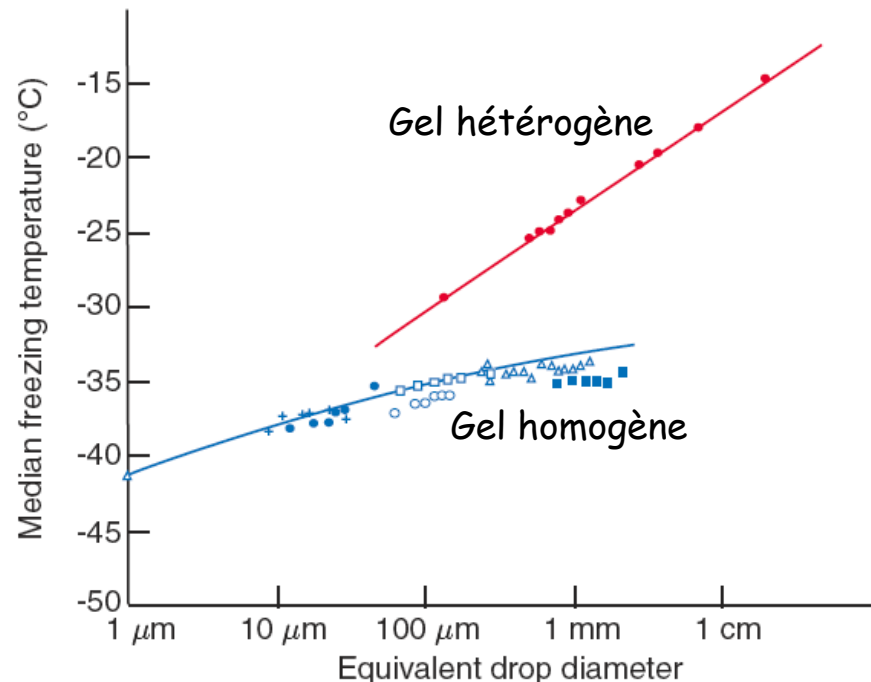
(b) Nuages frais

- Les trois phases de l'eau (liquide, solide et gazeux) peuvent coexister à ces températures.
- Les nuages sont généralement saturés par rapport à l'eau.

Les cristaux de glace

Les cristaux de glace

- Gel homogène (liquide → solide)
 - Lorsque $T < -40^{\circ}\text{C}$ seulement.
 - Se produit dans les nuages élevés de type cirrus.
- Gel hétérogène (liquide → solide avec noyau de congélation)
 - Il s'agit de gouttelettes d'eau qui demeurent liquides à des températures inférieures à 0°C .
- Pour geler, une gouttelette doit entrer en contact avec un corps étranger (noyaux de congélation) qui agit comme catalyseur pour la congélation de la gouttelette. Dans l'atmosphère, ces noyaux de congélation sont en faible concentration.



Les cristaux de glace

- Condensation solide hétérogène
(vapeur d'eau → solide avec noyau de condensation solide)
 - $T < \sim -5\text{ °C}$
 - Ce processus augmente en efficacité quand T diminue.
 - Les noyaux de condensation solide sont "peu nombreux".

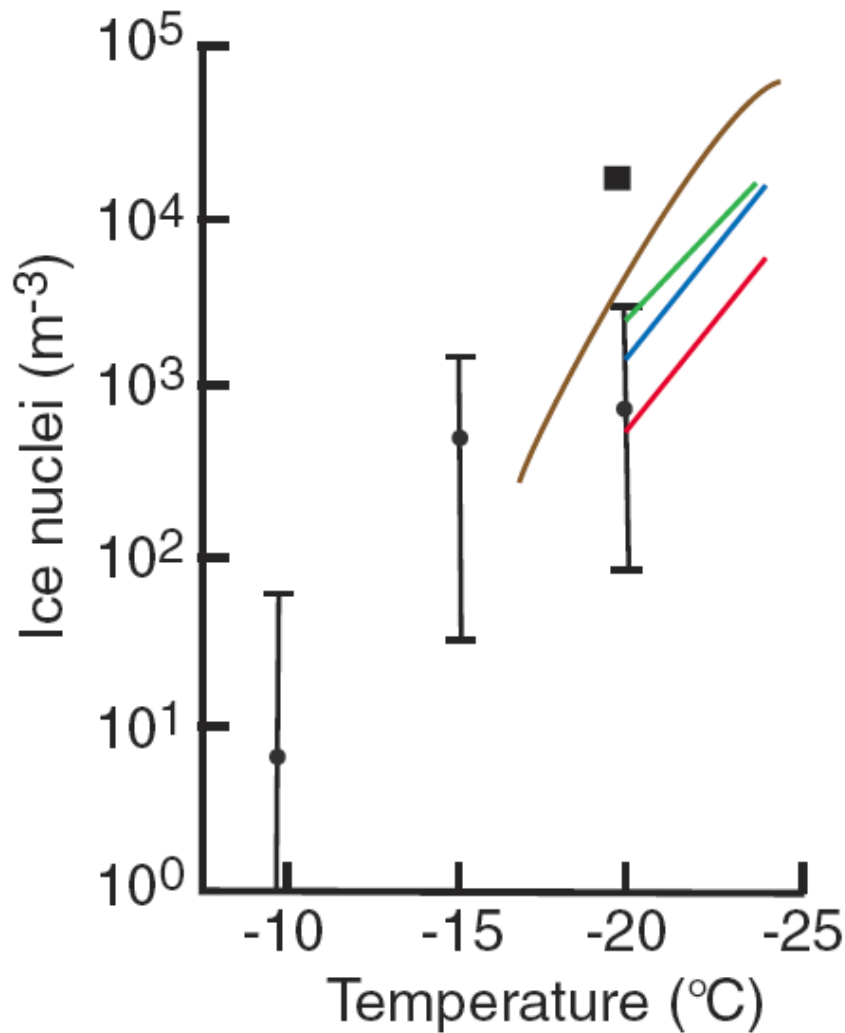
- Il est cependant difficile de distinguer les noyaux de congélation des noyaux de condensation solide. Pour cela, on préfère parler des façons inclusives de noyaux glaçogènes.

Noyaux glaçogènes communs et leurs températures d'activation

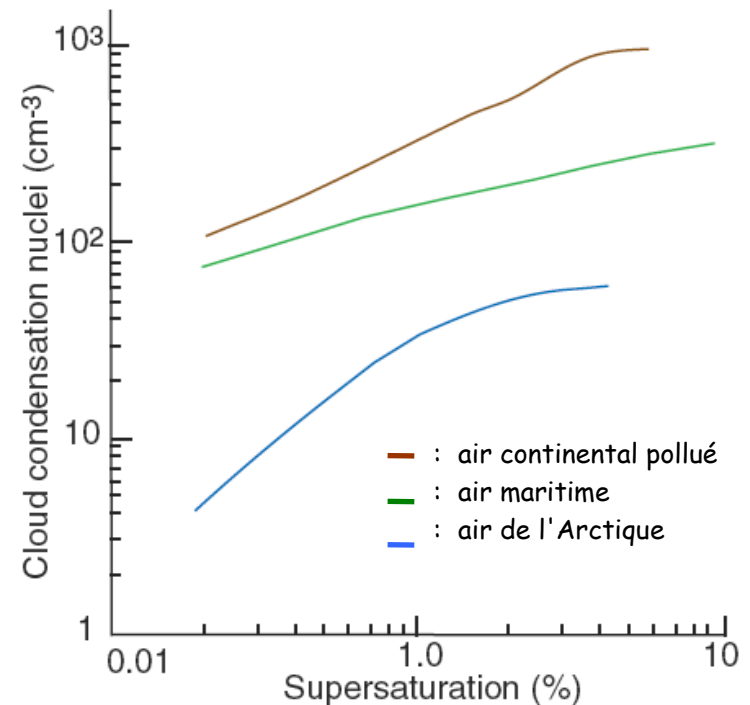


Matière	Température d'activation (°C)	Provenance
Bactéries des feuilles (pseudomonas syringae)	-3	Trouvées dans les feuilles en décomposition, possiblement la source dominante de noyaux
Iodure d'argent	-4	Pour l'ensemencement artificiel des nuages
Sulfure de cuivre (CuS)	-7	Polluant
Chlorure de sodium	-8	Eau de mer
Kaolin	-9	Mineral commun d'argile
Cendres volcaniques	-13	Aérosols ordinaires
Vermiculite	-15	Mineral commun d'argile

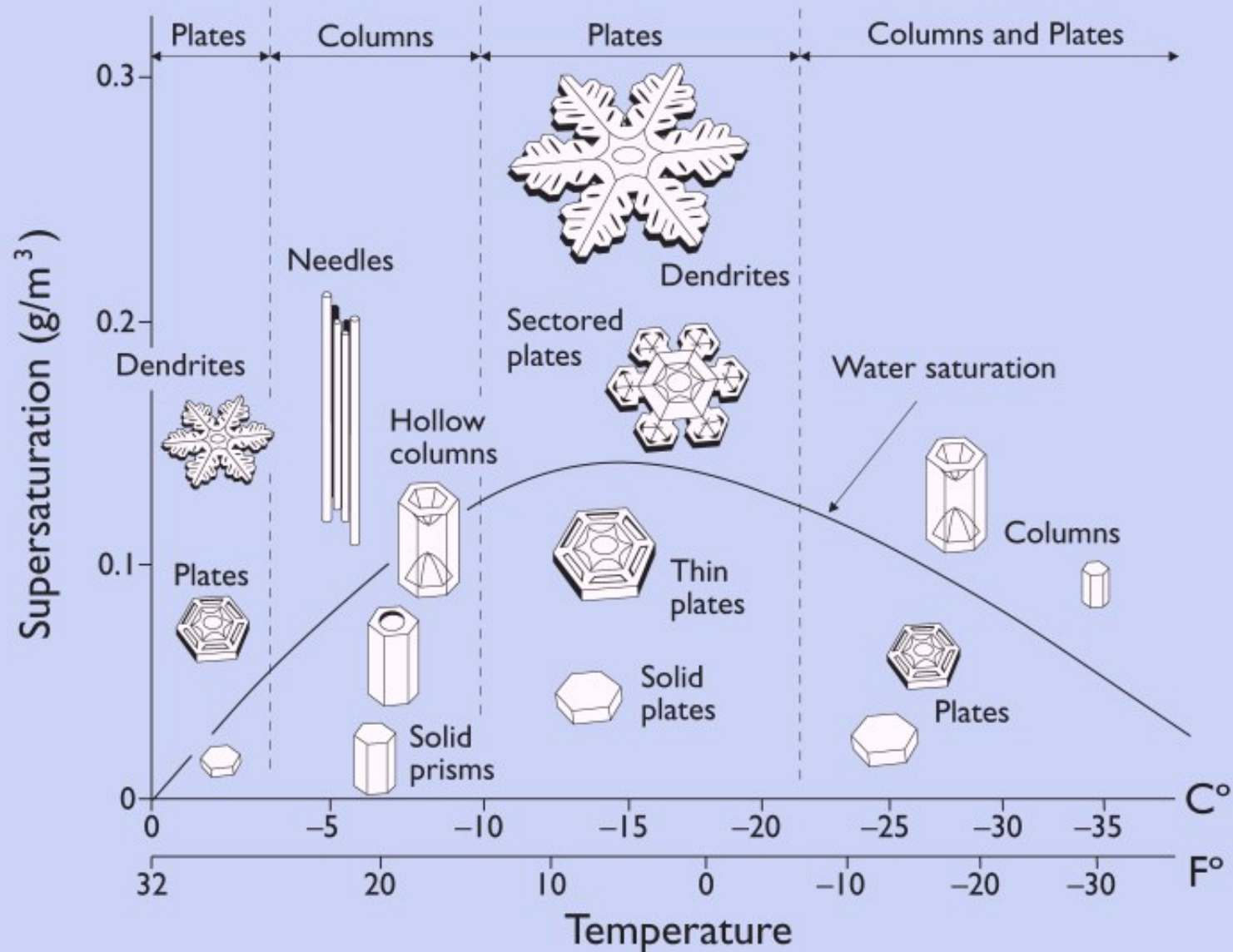
Concentration des noyaux glaçogènes ★★ 6-34



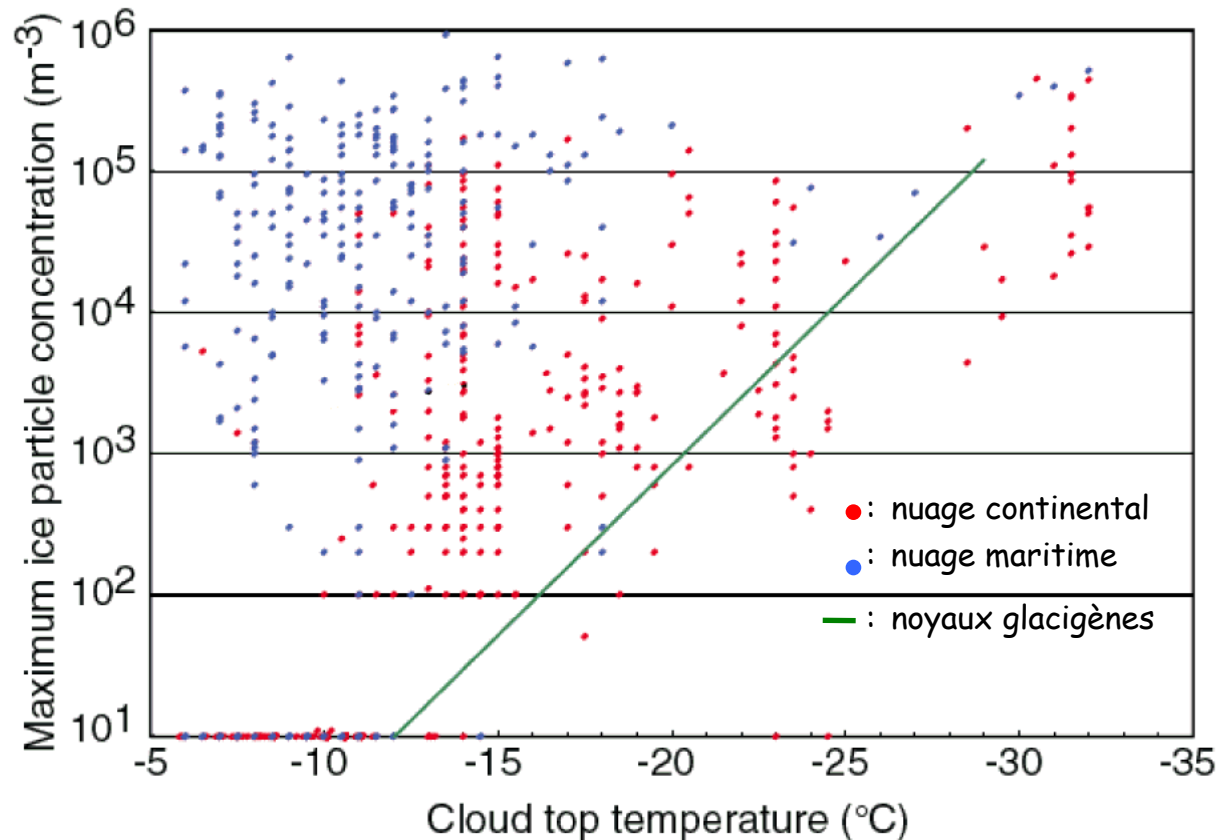
➤ Les noyaux glaçogènes dans l'atmosphère sont environ 1 million de fois moins nombreux que les noyaux de condensation



Morphologie des cristaux de glace



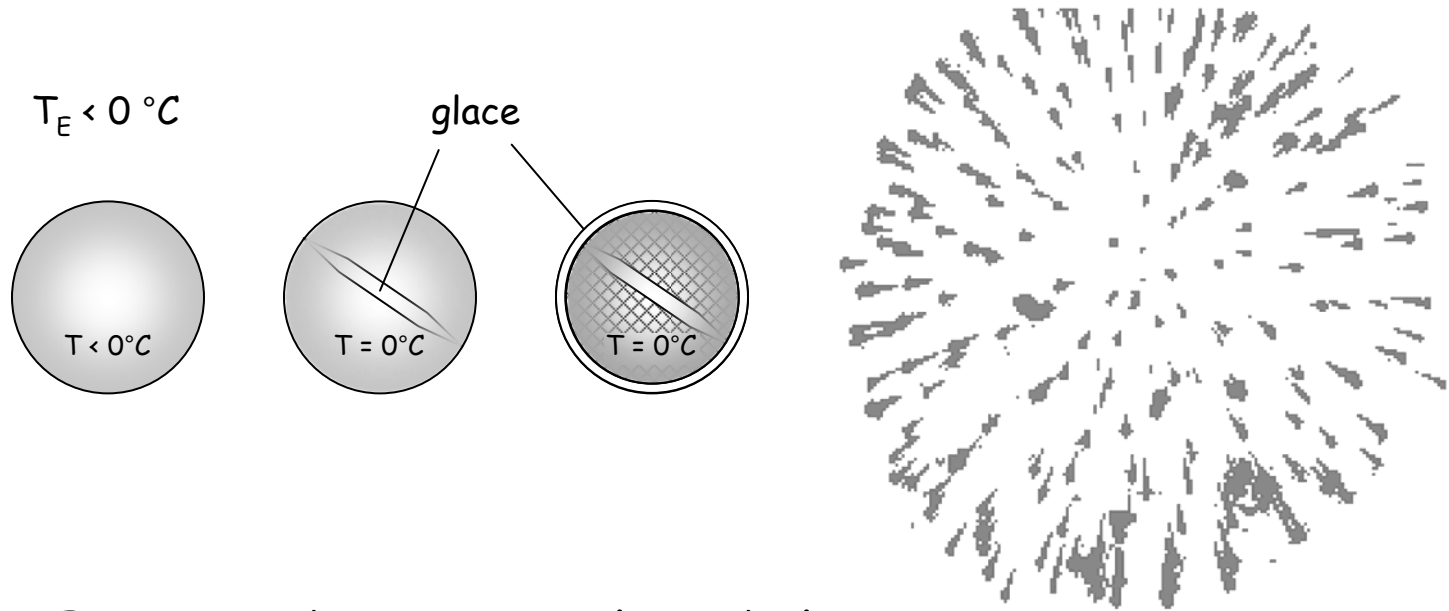
Concentration des particules de glace



Il y a beaucoup plus de particules de glace dans les nuages que de noyaux glaçogènes, mais encore 1000 fois moins nombreux des noyaux de condensation.

Multiplication des particules de glace

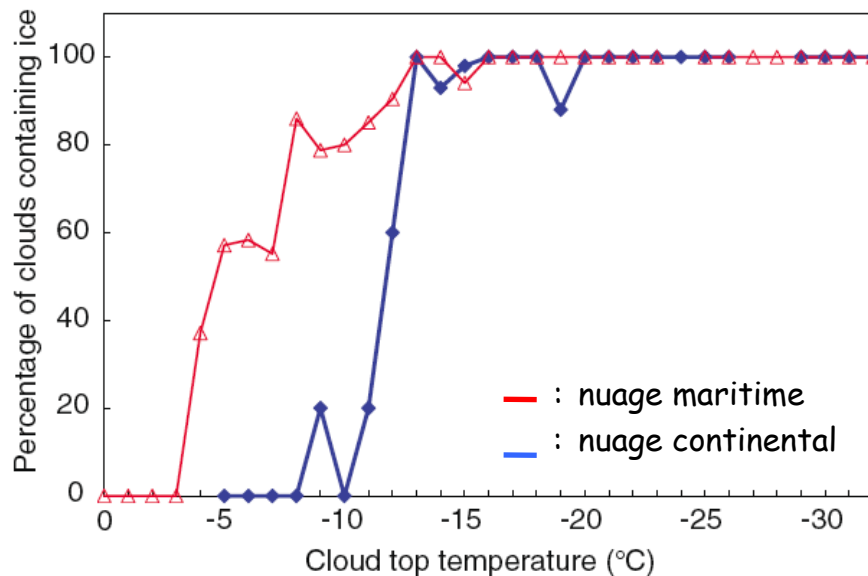
- Éclatement des gouttes lors de la congélation



- Fracture des cristaux lors de la collision avec d'autres hydrométéores
- Les techniques de mesure des noyaux glaçogènes pourraient être inadéquates

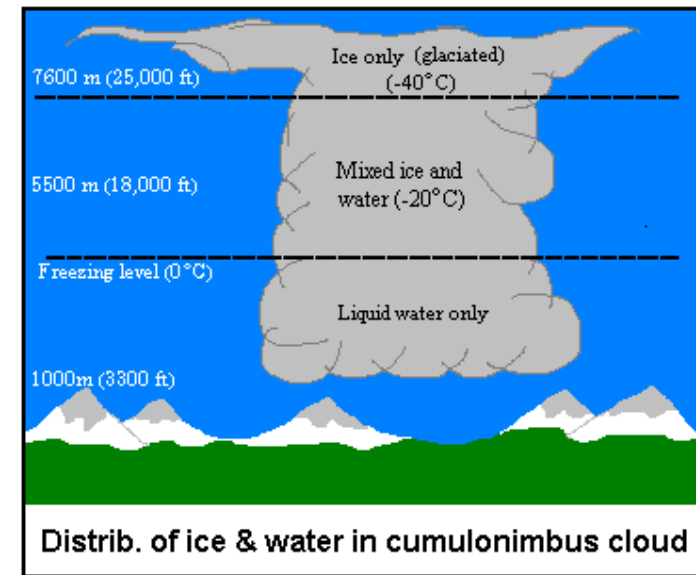
Nuages froids

- Un nuage froid peut donc contenir des
 - gouttelettes d'eau surfondue et des
 - particules de glace.



- S'il est constitué seulement de glace on dira qu'il est glacé (cirrus...)

- Répartition spatiale des particules dans un nuage



Vitesse terminale de chute des cristaux de glace

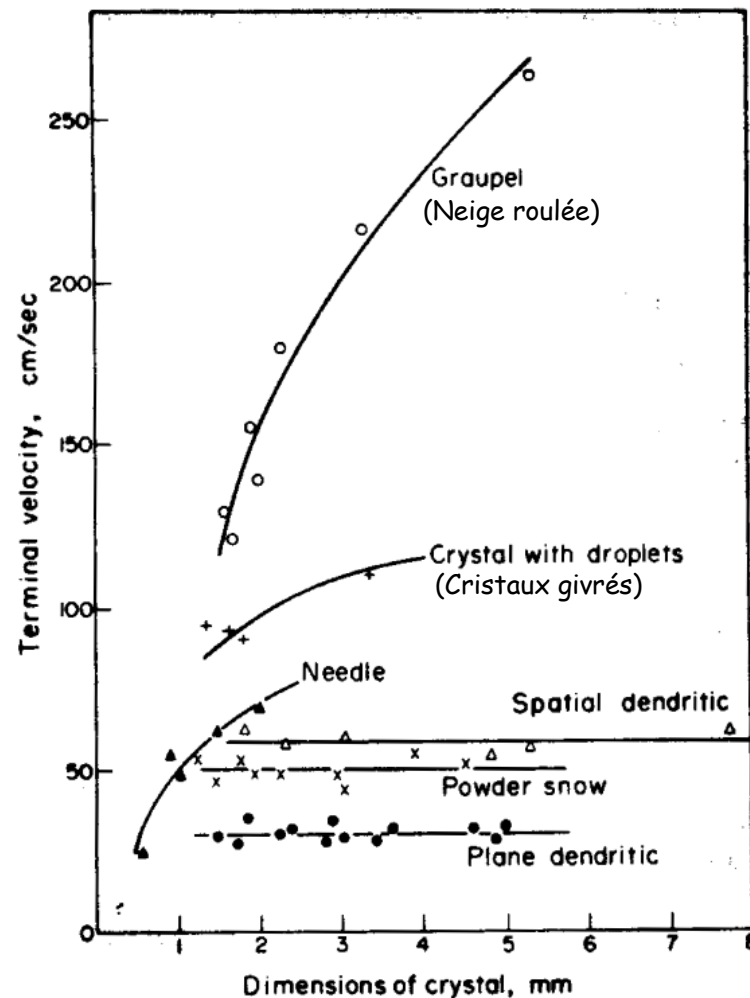
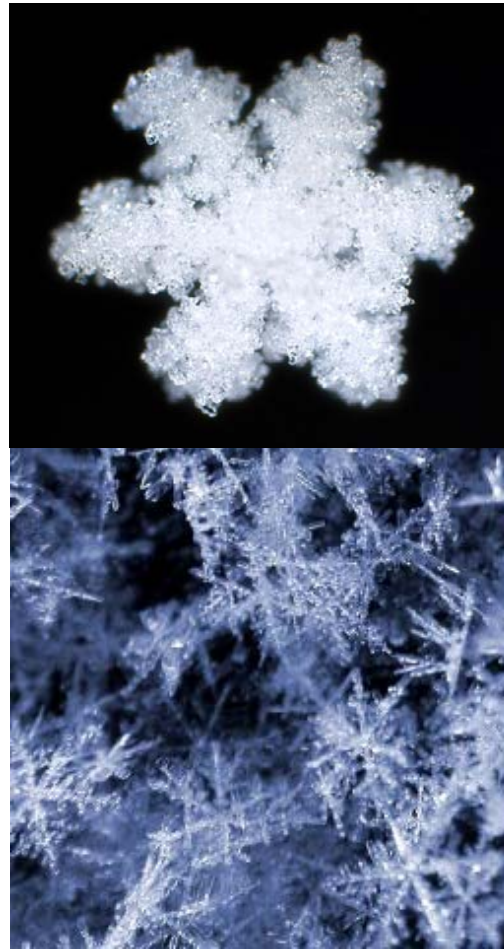
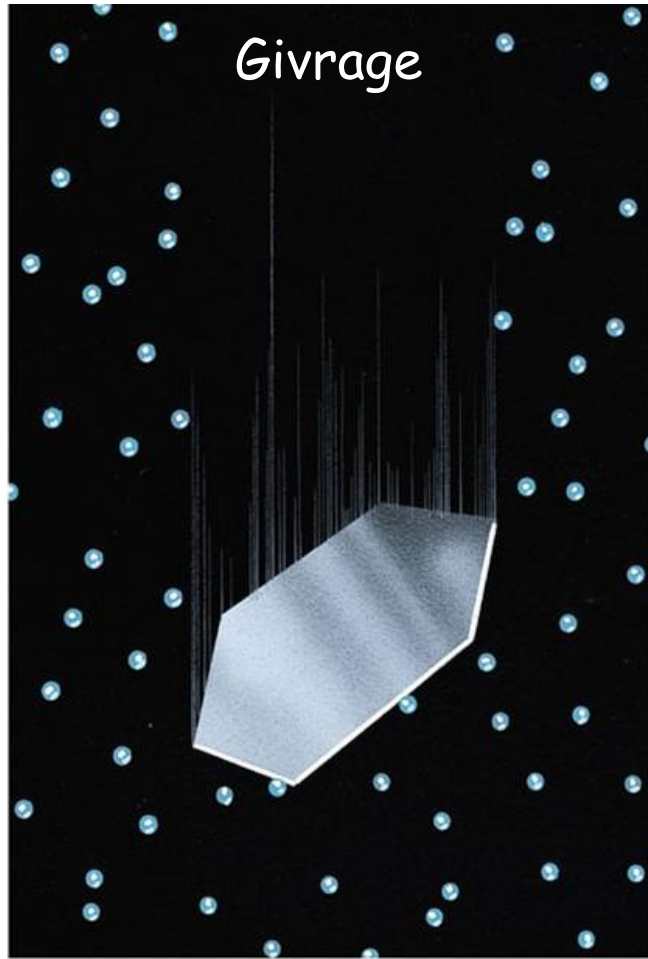


FIG. 9.7. Nakaya and Terada's measured terminal velocities of ice crystals.
(From Fletcher, 1962.)

Croissance par givrage et agrégation des cristaux de glace

Givrage



Agrégation



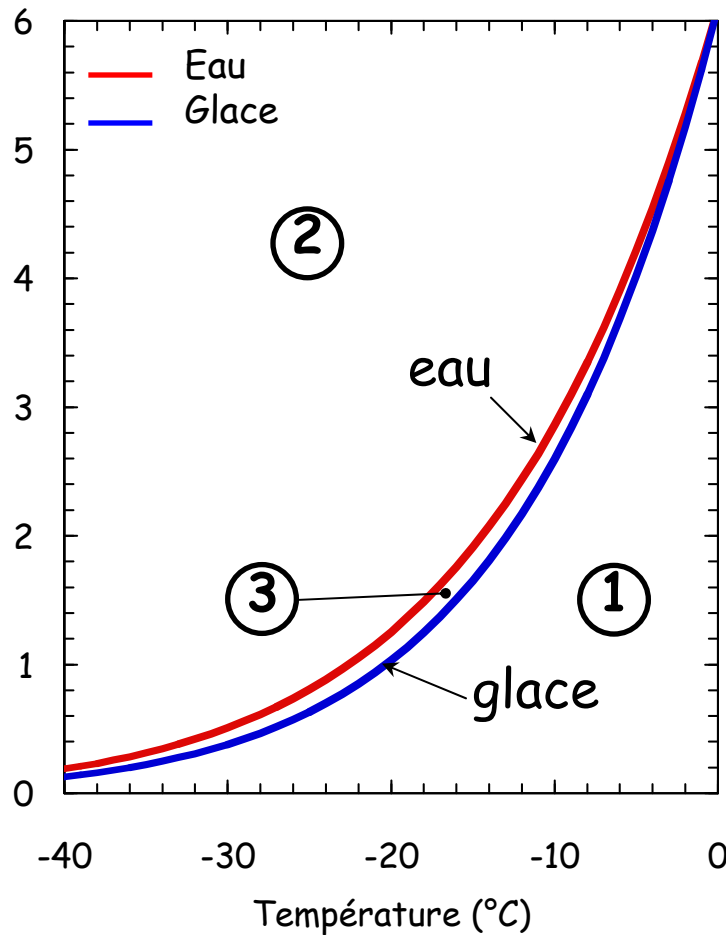
Neige

(a) Falling ice crystals may freeze supercooled droplets on contact (accretion), producing larger ice particles.

(c) Falling ice crystals may collide and stick to other ice crystals (aggregation), producing snowflakes.

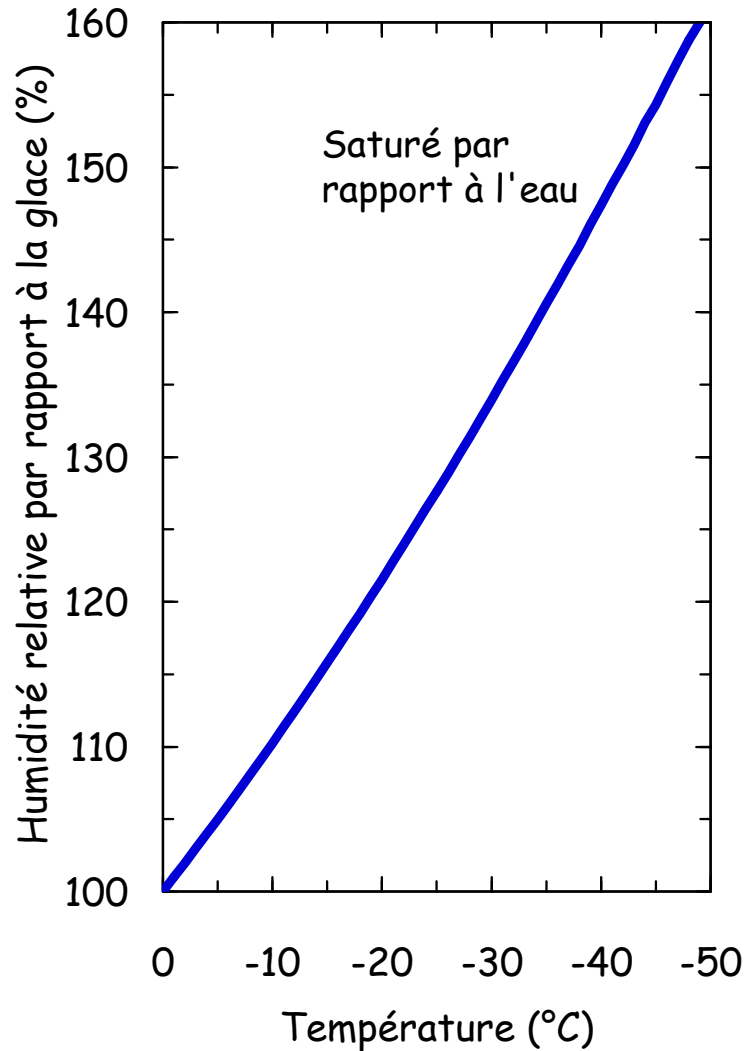
Le processus de Bergeron

Relation entre e_{sw} , e_{si} et la température

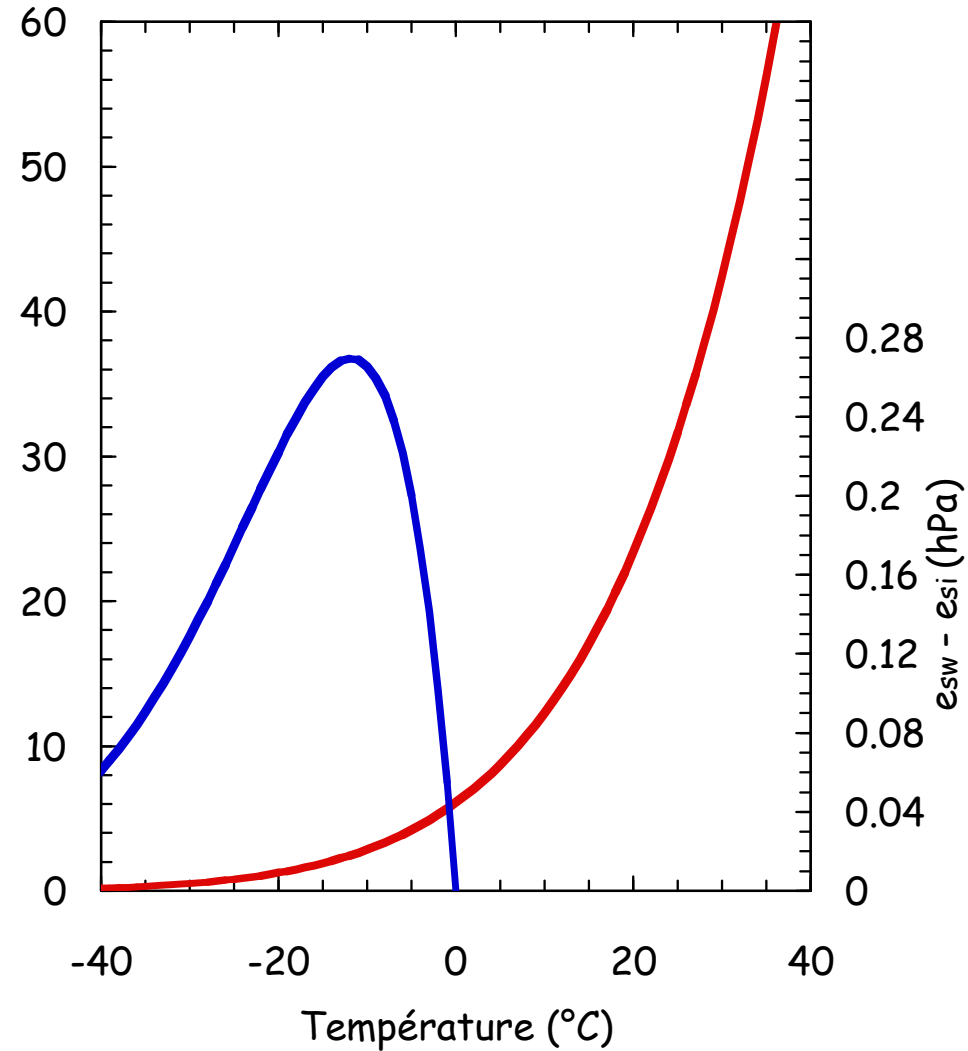


1. $e < e_{si} \rightarrow$ sublimation des cristaux et évaporation des gouttelettes
2. $e > e_{sw} \rightarrow$ condensation sur les gouttelettes et les cristaux
3. $e_{si} < e < e_{sw} \rightarrow$ évaporation des gouttelettes et condensation solide sur les cristaux de glace

Relation entre e_{sw} , e_{si} et la température ★★ 6-43

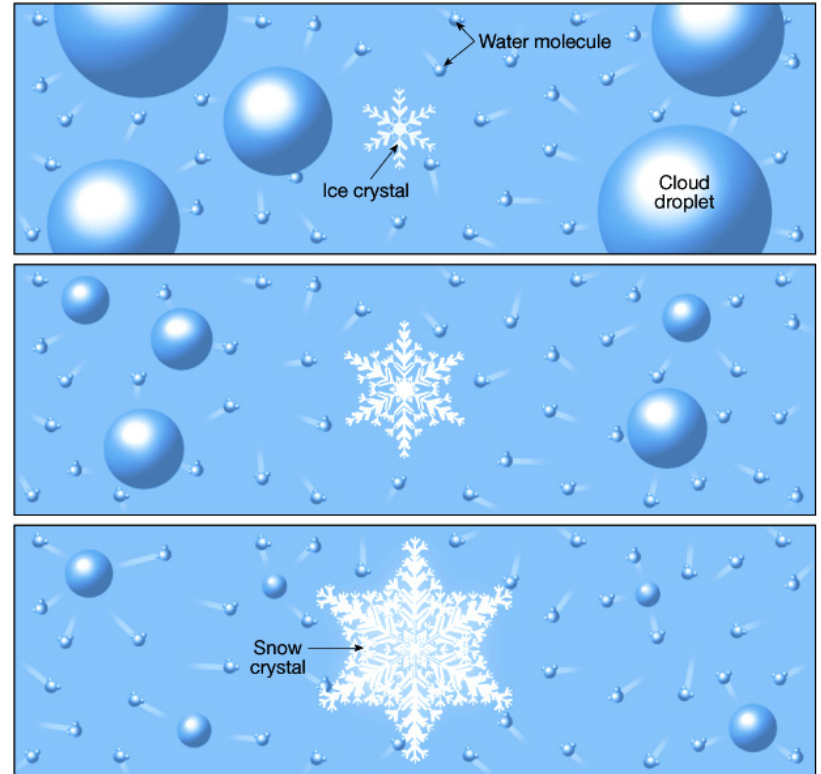
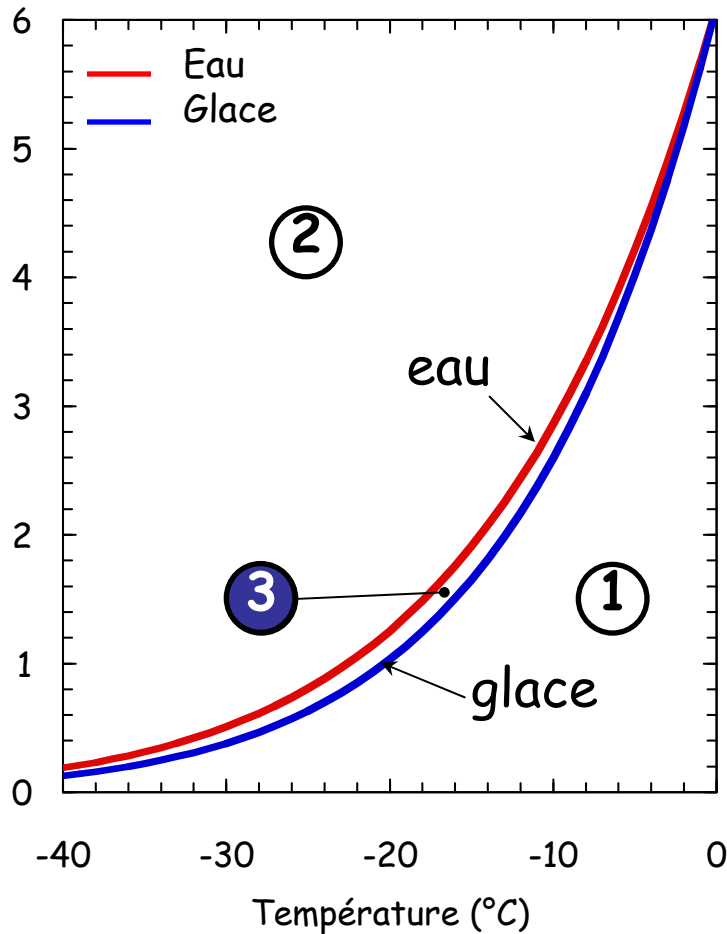


- La sursaturation est très forte!



- La différence ($e_{sw} - e_{si}$) est maximale à des températures entre -10 et -15 °C

Processus de Bergeron



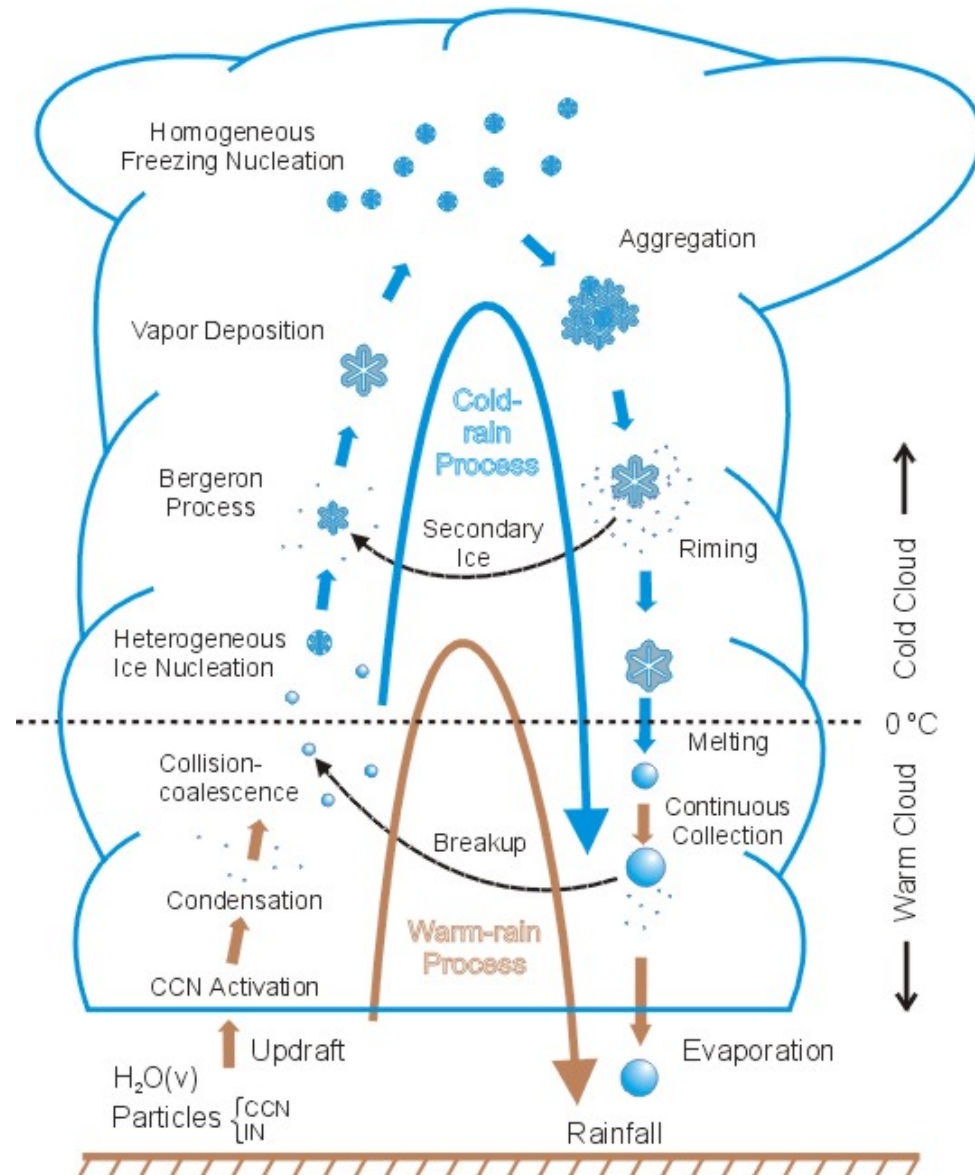
- ③ Si $e_{si} < e < e_{sw} \rightarrow$ Les gouttelettes d'eau s'évaporent et cette vapeur d'eau se dépose sur les cristaux de glace permettant à ces derniers de croître rapidement.

Processus de Bergeron

- $e_{si} < e < e_{sw} \rightarrow$ Évaporation des gouttelettes et condensation solide sur les cristaux de glace.
- Transfert d'eau vers la glace.
- Grossissement rapide des cristaux, car ils sont peu nombreux et la sursaturation par rapport à la glace est forte.
- Cette situation perdure tant et aussi longtemps qu'il y a des gouttelettes dans le nuage.
- On explique ainsi la formation de la précipitation dans les nuages minces.
- Au moins une partie du nuage doit cependant être à une température inférieure à 0°C .
- Ce processus est plus efficace à des températures entre -10 et -15°C .

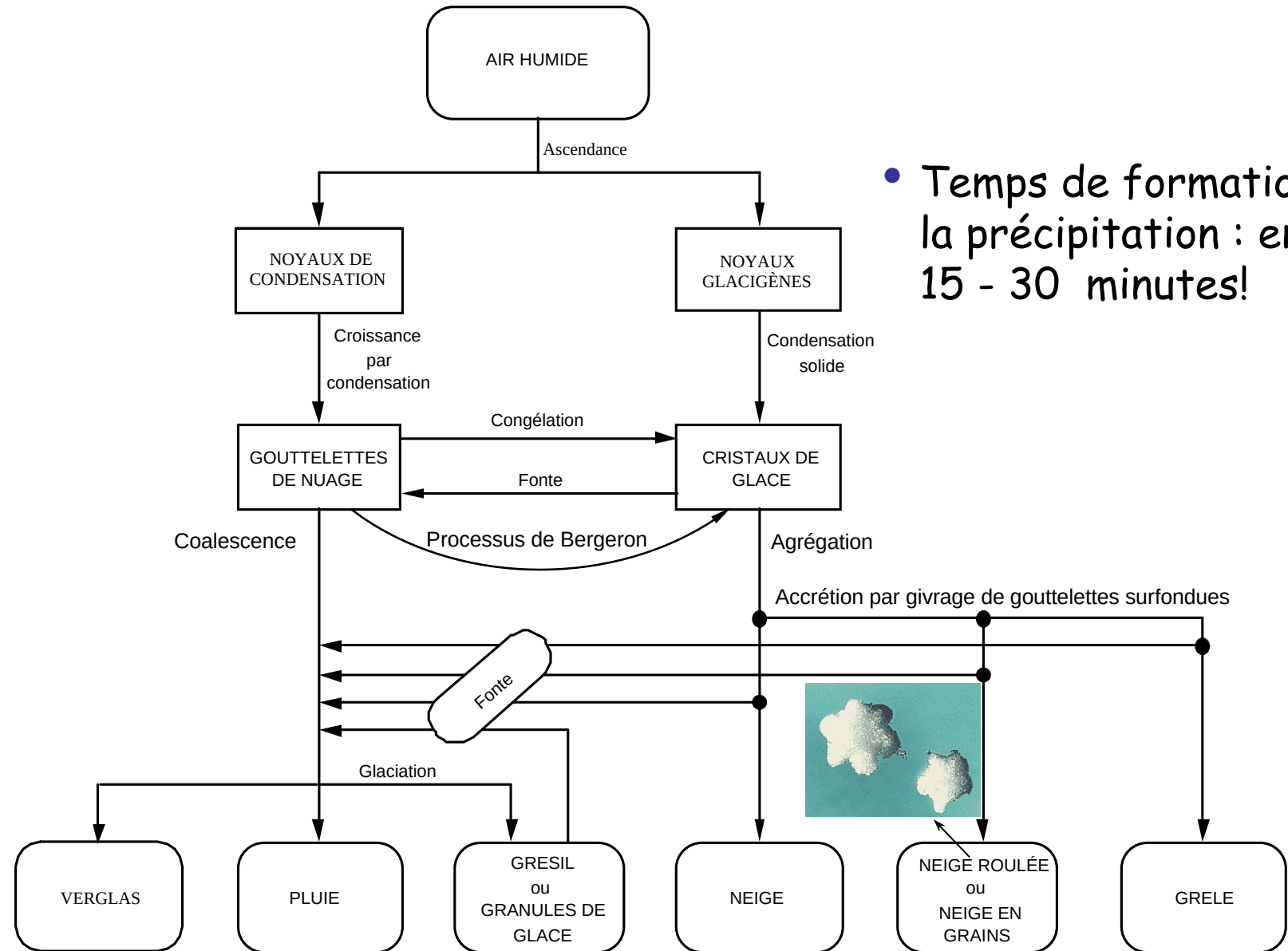
La formation de la pluie

PRECIPITATION MECHANISMS



Pluie, neige, grésil et verglas

Formation des précipitations



- Temps de formation de la précipitation : environ 15 - 30 minutes!

Pluie

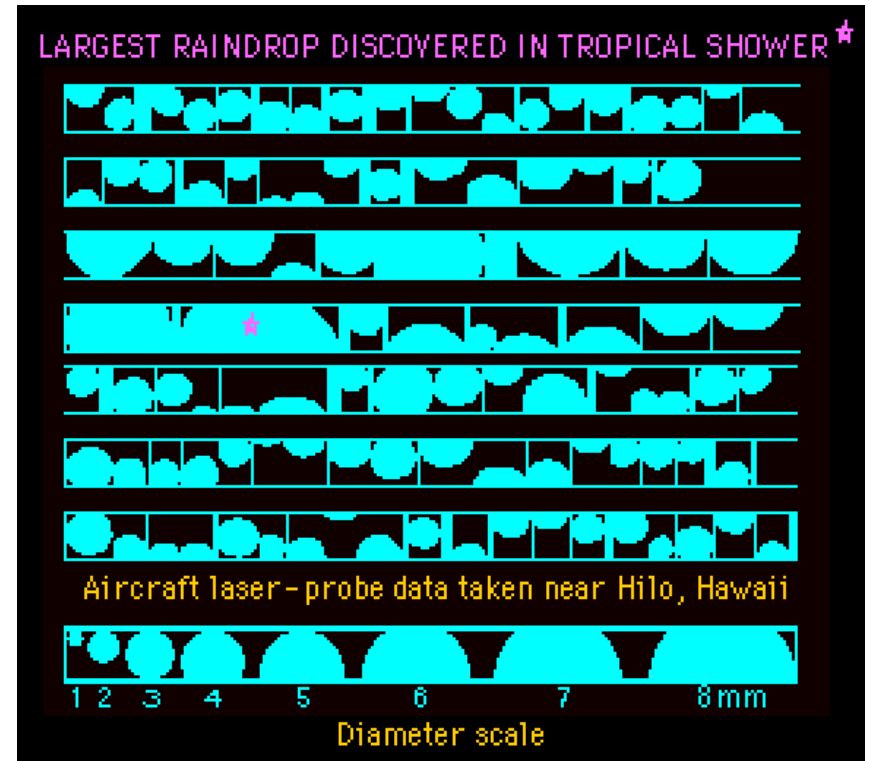
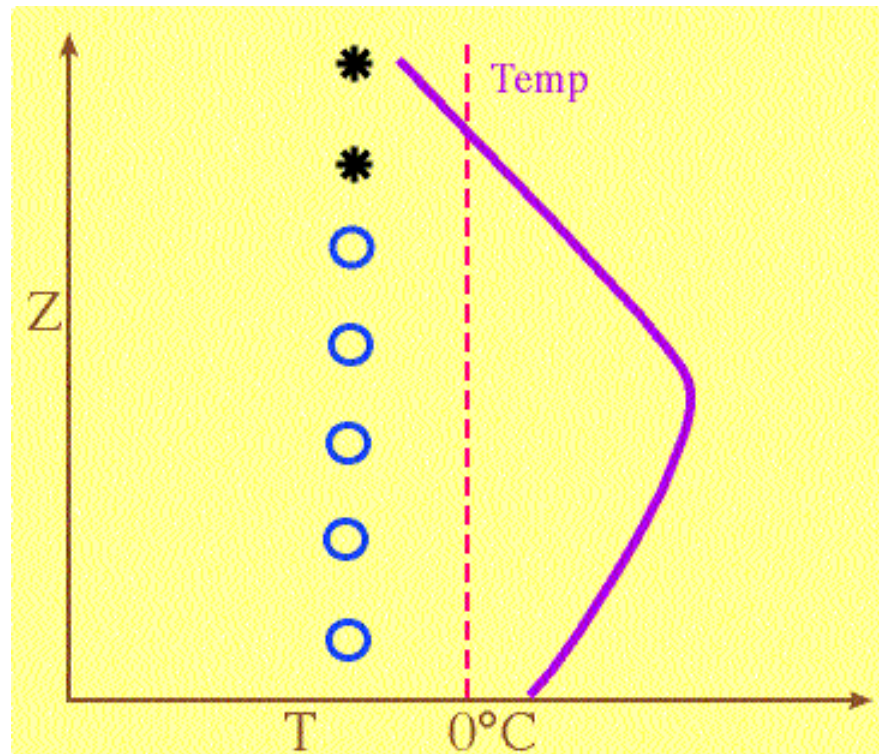
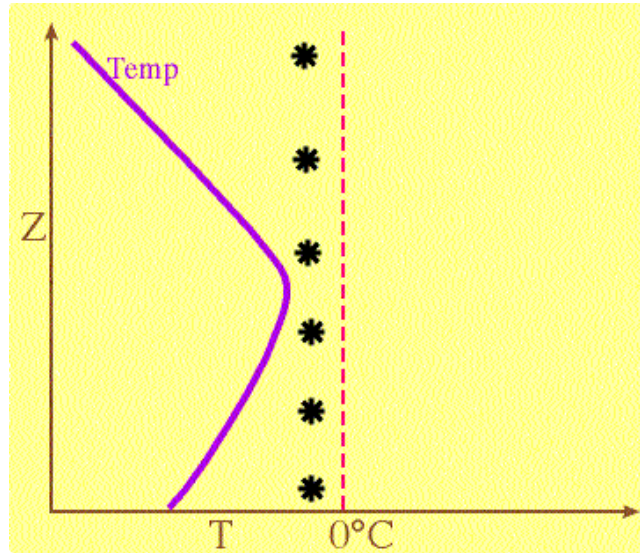


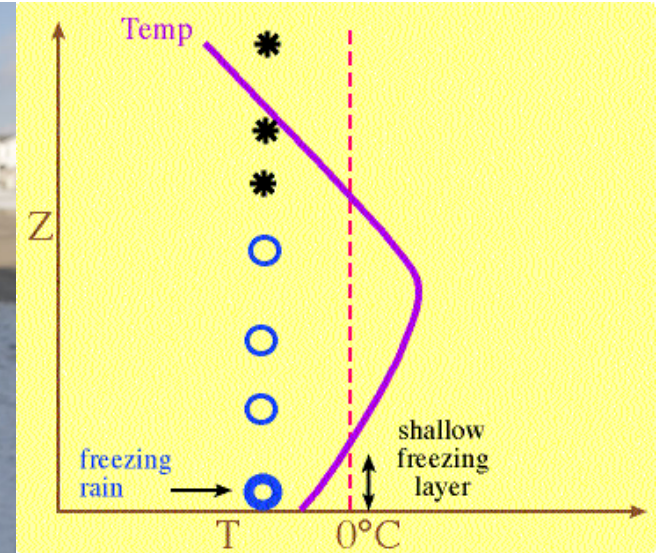
Figure 2.2. Typical shapes of rain drops falling at terminal velocity. From Pruppacher and Beard (1970).

Neige

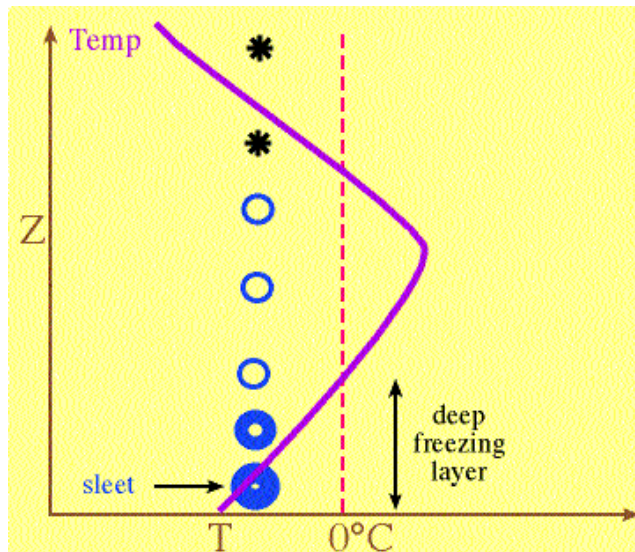


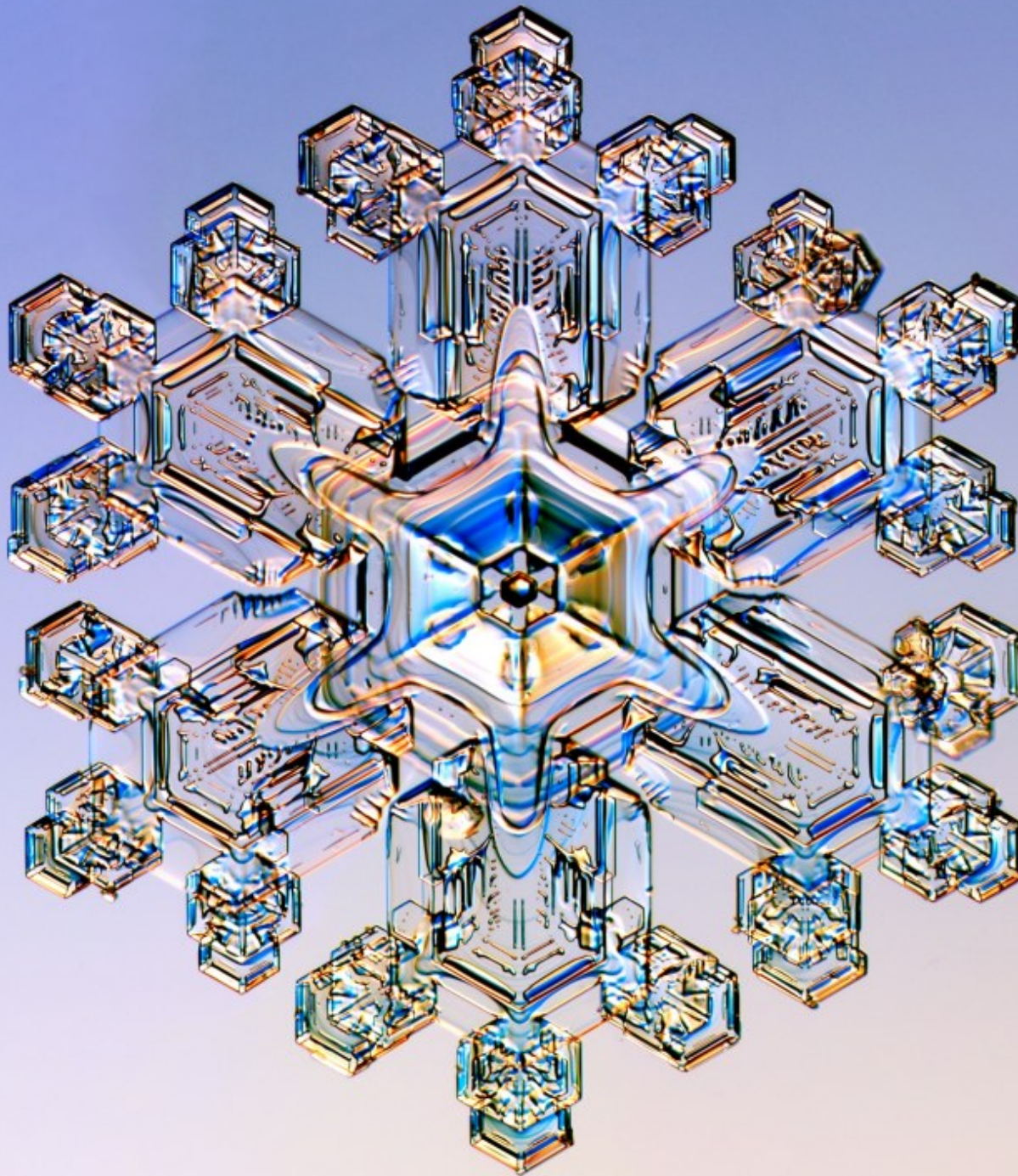
Verglas

★★★ 6-50



Grésil





Cristaux de glace
recueilli au sol.

(<http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/photos/photos.htm>)