

Microphysique des nuages

La précipitation

- ❑ Nuages chauds
 - ❑ Croissance par condensation
 - ❑ Croissance par collision-coalescence
- ❑ Nuages froids
 - ❑ Effet de Bergeron
 - ❑ Collision : accrétion ou givrage; agglomération

Table de matières

Les précipitations

- De la suspension à la précipitation
 - Formation des cristaux et gouttelettes de nuage
 - La croissance par condensation
 - Formation de la précipitation
 - Nuages chauds
 - Croissance par condensation
 - Croissance par collision et coalescence
 - Nuages froids
 - Processus de Bergeron
 - Accrétion
 - Agglomération

Objectif

Maintenant que vous connaissez les concepts de la thermodynamique et des changements de phase de l'eau, la nucléation incluse, nous sommes prêts à regarder les fondements de la microphysique des nuages et le développement des précipitations.

Pour comprendre complètement la physique des nuages, il faudra une compréhension de la dynamique atmosphérique et de la turbulence, qui sont introduites plus tard dans votre baccalauréat.

Définition

Précipitations : Apports d'eau parvenant au sol sous forme liquide (pluie ou rosée) ou solide (neige ou grêle) en provenance directe ou indirecte de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Les **précipitations** (pluie ou neige) sont mesurées à la surface de la terre en millimètres.

Source : https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire__environnement/

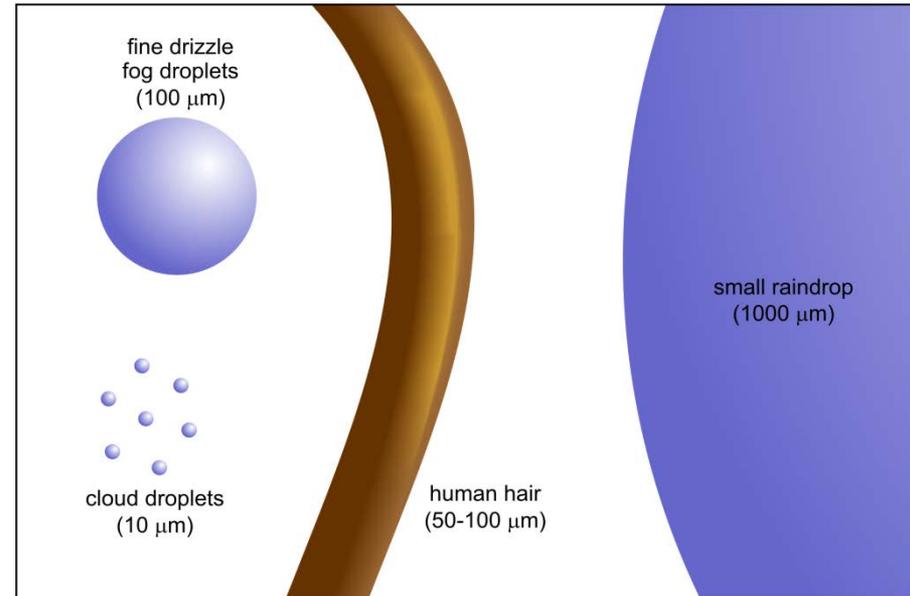
Questions

- Pourquoi certaines nuages passent sans qu'aucune précipitation nous tombe dessus?
 - Quels sont les processus qui permettent à des gouttelettes ou des cristaux nucléés au début de la formation des nuages de grossir jusqu'à que soit possible qu'ils arrivent à la surface sans s'évaporer?

- Qu'est-ce que détermine le type de précipitation?

Gouttes de pluie, gouttelettes de nuage et aérosols

- Rappelons-nous des tailles moyennes (diamètres) des particules de pluie, nuage et noyaux de condensation.
 - *Pluie* : $1000 \mu\text{m} = 1 \text{ mm}$
 - Vitesse de chute : $4\text{-}5 \text{ ms}^{-1}$
 - *Nuage* : $10 \mu\text{m} = 0.01 \text{ mm}$
 - Restent en suspension dans l'air
 - *Noyaux de condensation (CNN)* : $0.1 \mu\text{m} = 0.0001 \text{ mm}$
 - Restent en suspension dans l'air
 - Pour qu'une gouttelette de nuage atteigne la taille d'une goutte de bruine ($100 \mu\text{m}$) sa taille doit être multipliée par 10 :
 - $100 \mu\text{m}/10 \mu\text{m} = 10$. Le processus de condensation est lent. Il faut plus 12 h pour attendre la taille moyenne de la précipitation la plus faible.
 - Dans un orage il prend 30 minutes pour que la précipitation de gouttes dont la taille moyenne est 10 fois supérieure ait lieu!
 - Comment c'est possible?

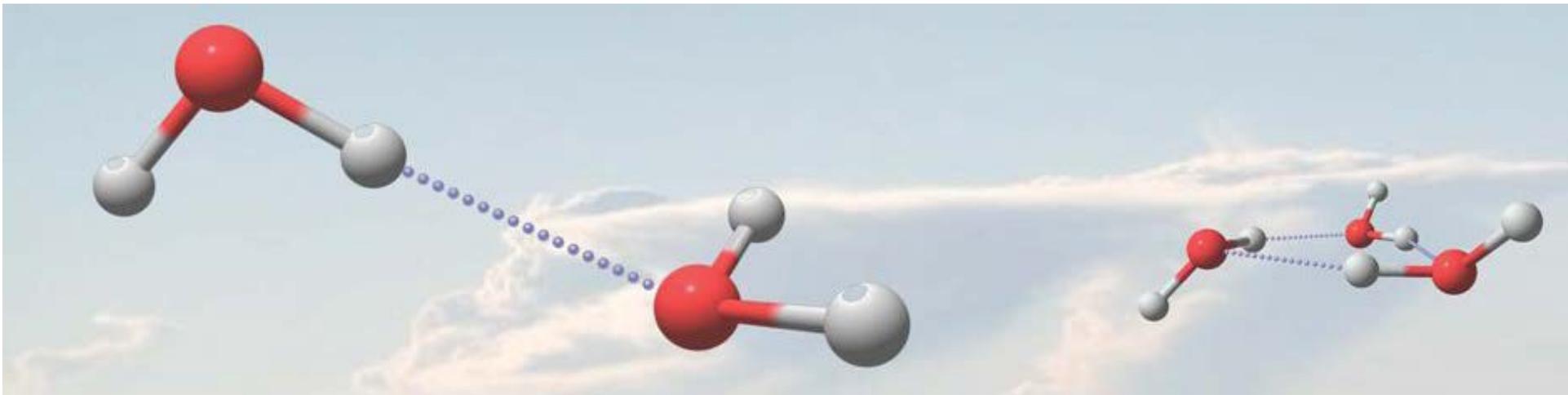


De la suspension à la précipitation

Au commencement il a la condensation...

...qui commence par la formation d'un amas de molécules d'eau stable, la nucléation.

La **nucléation** est un phénomène d'amorçage d'un processus spontané d'auto-assemblage à partir d'un noyau ou «germe».



<https://www.univ-rennes1.fr/actualites/18052016/observation-des-premieres-etapes-de-la-nucleation-de-leau>

La croissance de la gouttelette se poursuit par diffusion des molécules d'eau présentes en forme de vapeur dans l'air tant que la pression de vapeur d'eau de l'environnement est supérieure à la pression d'équilibre e_{wr} : la **condensation** se poursuit.

Nucléation hétérogène. Les faits.

- 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

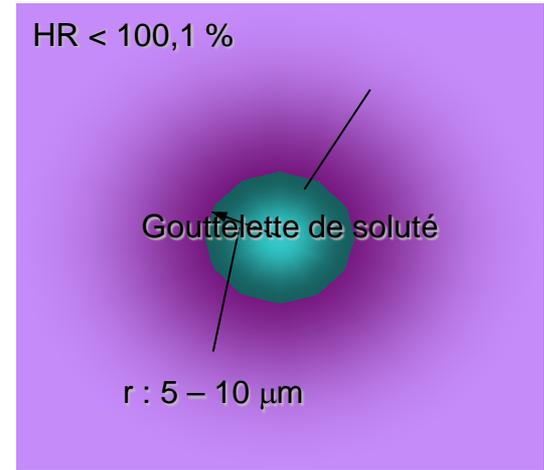
Taux de croissance par condensation sur des noyaux de NaCl
(HR = 100,05 %, p = 900 hPa et T = 0 °C)

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	130,0	7,0	0,61
4	1000	320	62
10	2700	1800	870
20	8500	7400	5900
30	17500	16000	14500
50	44500	43500	41500

- Pour un noyaux de condensation donné, e taux de croissance par condensation est inversement proportionnelle à la taille de l'hydrométéore.
→ Il diminue donc en fonction de la taille au fur et à mesure que la goutte grossit.
- Ce processus devient peu efficace pour des tailles plus grandes que 5 - 10 μm
- Et pourtant 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).



Explication physique:

Le rayon de goutte de nuage nucléée augmente assez rapidement au début, mais en quelques minutes ralentit en raison de l'augmentation de la surface de la goutte.

- Ainsi, les gouttes de nuage peuvent croître à 10-20 μm en 15 minutes ou plus, mais ensuite elles vont grandir beaucoup plus lentement.
- Comme un nuage typique ne dure que quelques dizaines de minutes, il n'est pas possible pour les gouttes de nuage de se développer en gouttes de pluie par condensation seulement.
- La nucléation hétérogène suivie de condensation peut faire des nuages, mais il ne peut pas faire pleuvoir.
- La condensation solide sur les cristaux nucléés est plus rapide que la condensation sur les gouttes liquides mais n'explique pas à elle toute seule la formation de la précipitation (solide ou liquide)

Conclusion:

Nous avons besoin d'autres procédés pour obtenir des gouttes de nuages suffisamment grandes pour former des précipitations, soit liquides ou solides.

QUESTION

Saviez-vous que la plupart des précipitations proviennent de la **collision-coalescence**?

Il existe deux types de processus de croissance amenant à la formation de gouttes assez grosses pour précipiter : les processus de nuage chaud et les processus de nuage froid.

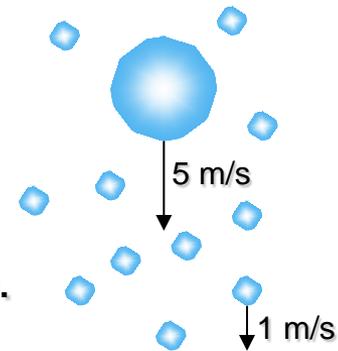
Dans les nuages chauds, les processus impliquent uniquement des gouttes de liquide.

Dans les nuages froids, les processus peuvent impliquer seulement des particules solides, mais aussi les deux phases (à la fois liquide surfondu et glace).

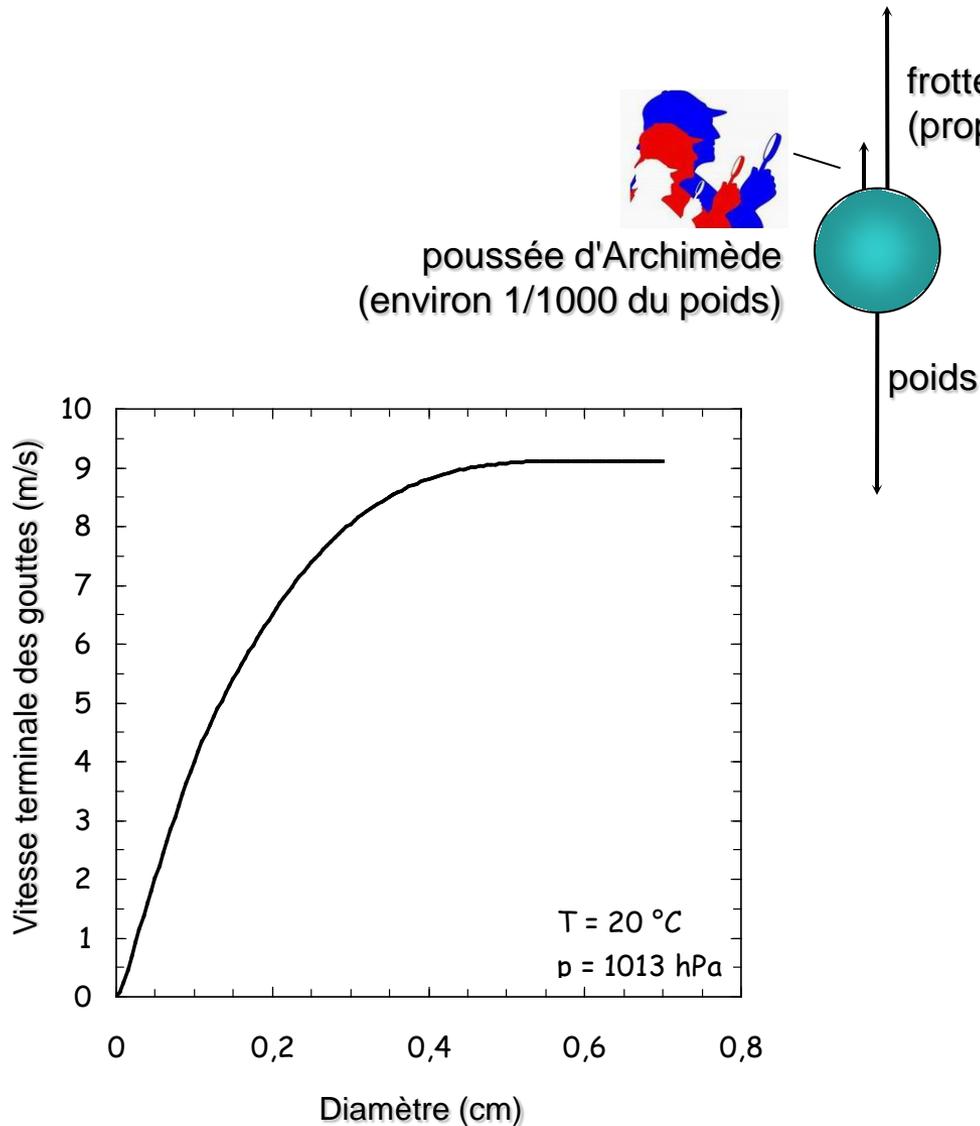
Certains des processus les plus importants impliquent des collisions entre les gouttes, qu'elles soient liquides ou solides.

Croissance par collision-coalescence

- C'est le processus dominant dans la formation de précipitation dans les nuages chauds (dont la température du sommet du nuage est supérieure à 0°C). Ils sont formés entièrement de gouttelettes d'eau liquide.
- Quelques gouttelettes du nuage grandissent plus que d'autres.
- Comme la vitesse d'équilibre des gouttes augmente avec la taille des gouttes, les plus grosses gouttes collectent les plus petites et grossissent au dépens de celles-ci.
- La vitesse d'équilibre d'une goutte est appelée **vitesse terminale**.
- Pour que le processus de collection fonctionne, il faut la coexistence, dans le nuage, de gouttes de taille différente.



Vitesse terminale de chute des gouttes



- $r < 40\mu\text{m}$

$$V_T = 1,19 \cdot 10^6 (\text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}) \cdot r^2$$
- $40\mu\text{m} \leq r < 0,6\text{mm}$

$$V_T = 8 \cdot 10^3 (\text{s}^{-1}) \cdot r$$
- $0,6\text{mm} \leq r < 2\text{mm}, \rho_0 = 1,2\text{kg m}^{-3}$

$$V_T = 2,01 \cdot 10^3 (\text{cm}^{1/2}\text{s}^{-1}) \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_a}\right)^{1/2} \cdot r^{1/2}$$
- $0,6\text{mm} \leq r < 2\text{mm}, \rho_0 = 1,2\text{kg m}^{-3}$

$$V_T \cong 9(\text{m/s}) \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_a}\right)^{1/2}$$

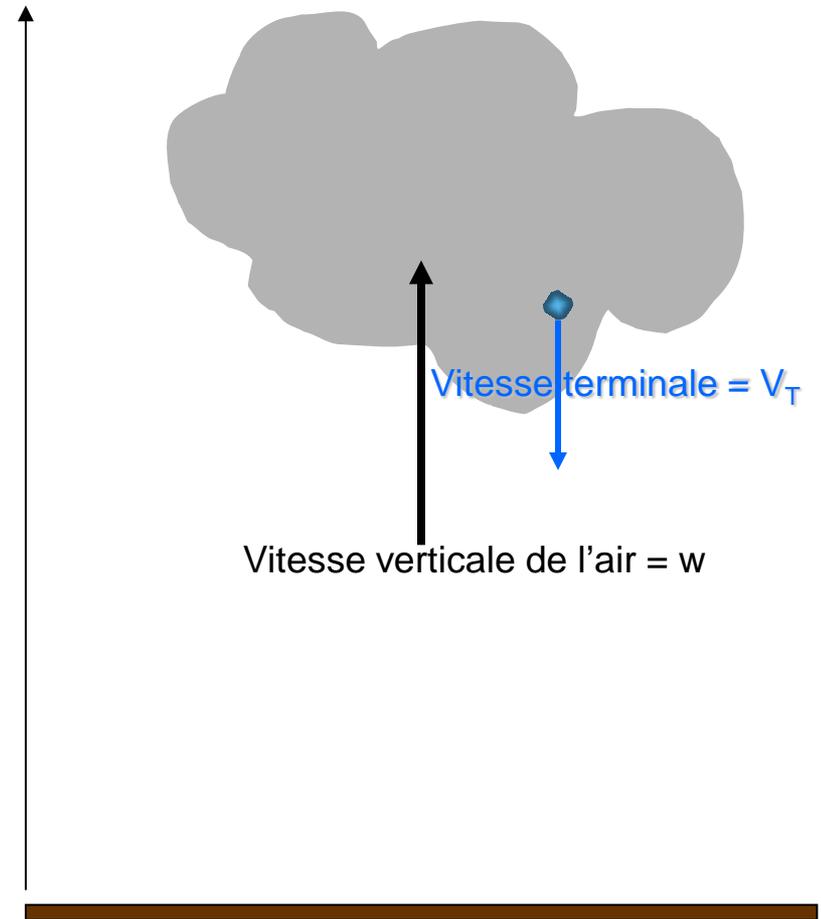
Détermination de la vitesse de chute par rapport à la surface.

- Que détermine la vitesse de chute de la goutte relativement à la surface?

R: La taille de la goutte et la vitesse du courant ascendant.

- Soit un cumulus en développement dont la vitesse ascendante est de 4 m/s. Quelle sera la vitesse relative par rapport à la surface (vitesse de chute) des gouttes dont les vitesses terminales sont les suivantes :

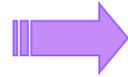
- -2 m/s?
- -4 m/s?
- -6 m/s?



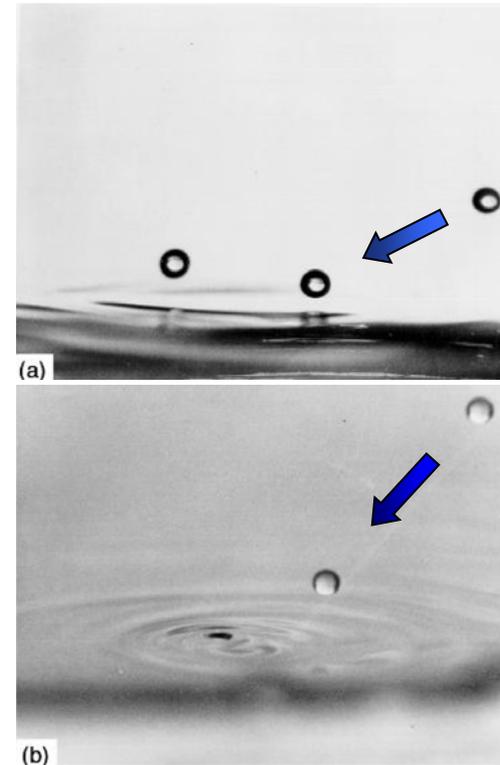
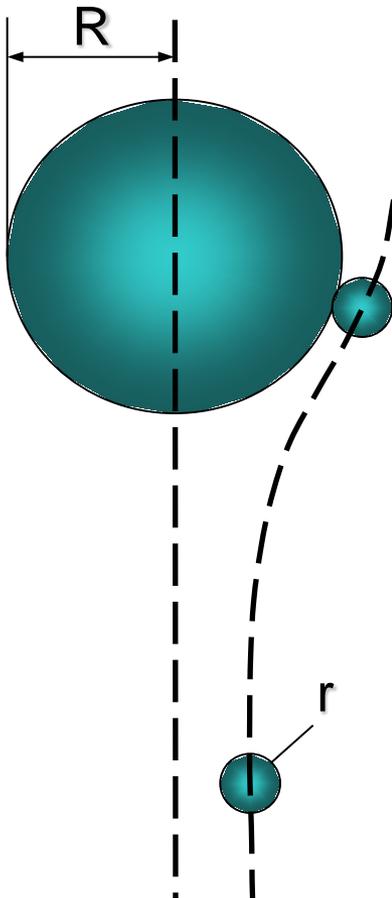
Vitesse relative de la goutte par rapport à la surface = $w + V_T$

Croissance par collision - coalescence

La collision



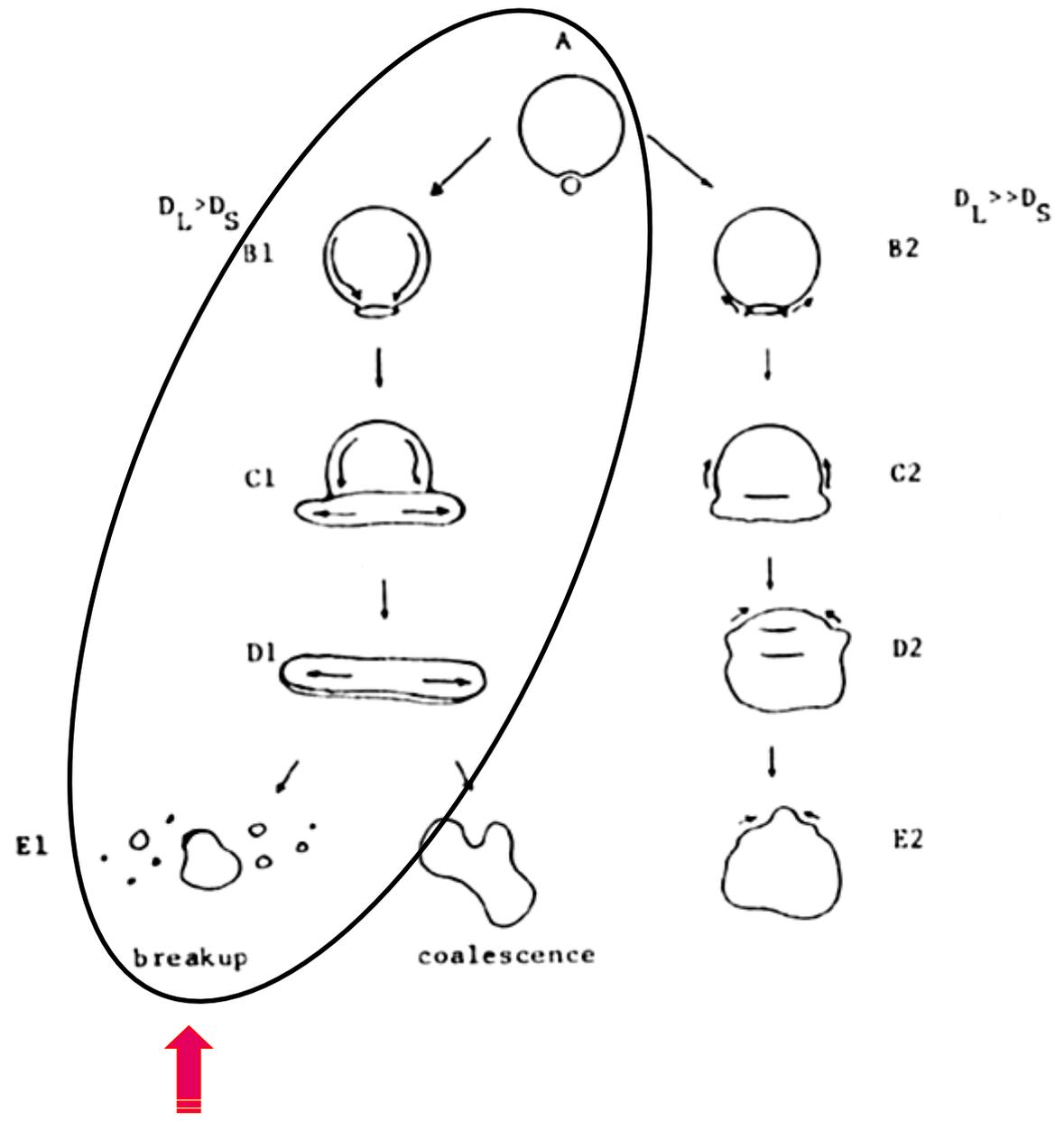
la coalescence



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

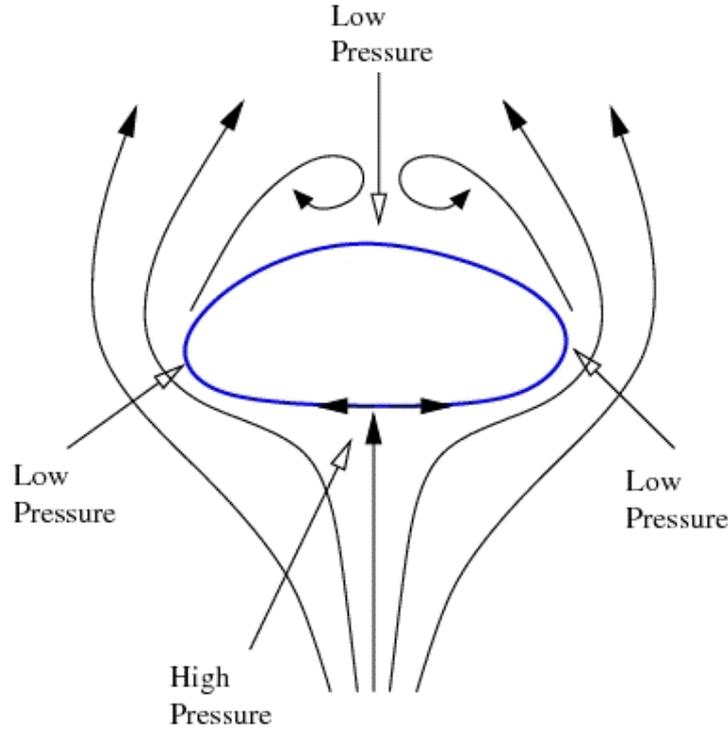
- a) rebondissement,
- b) coalescence

... ou l'éclaboussement



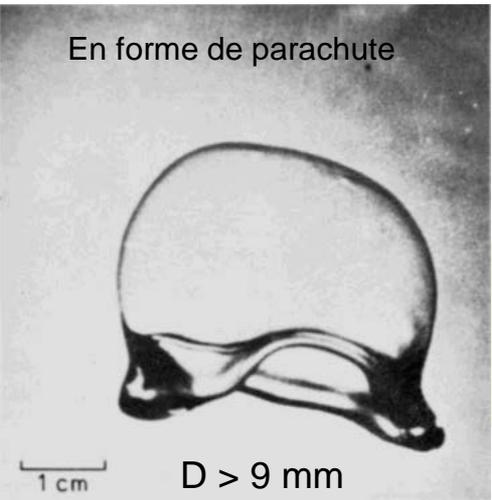


Forme des gouttes de pluie



HOW THE MONSTER RAINDROP MEASURES UP

			
Match head	Eyed Ladybird	Monster raindrop	English Daisy
0.3cm	0.6mm	1cm	2cm



D : Diamètre d'une sphère d'égale masse

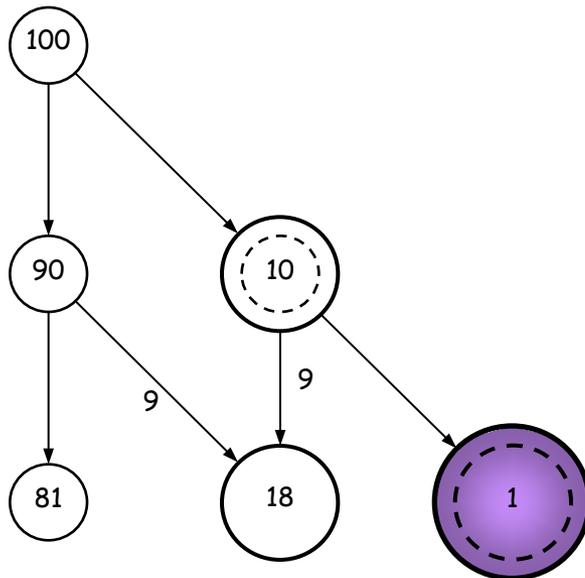
La forme des gouttes de pluie



Gracieuseté : George Huard et Joe Mayer

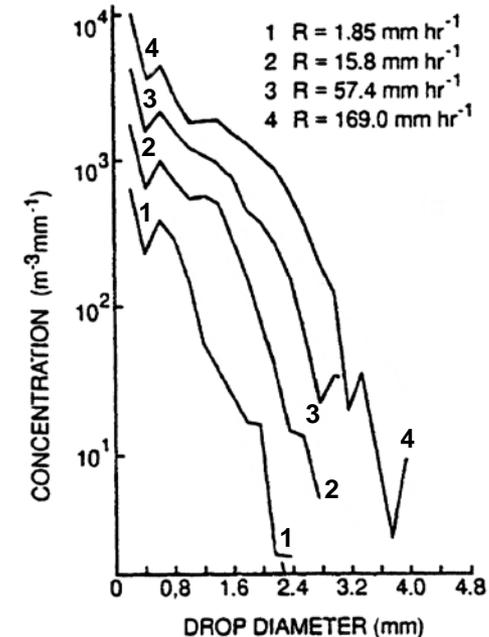
Croissance stochastique (ou statistique)

- 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.



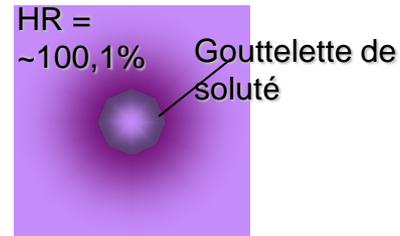
Exemple : Supposons que la probabilité de collision et coalescence de 10%

La pluie



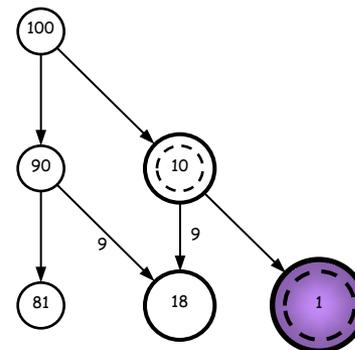
Formation de la pluie : Nuages chauds

- 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

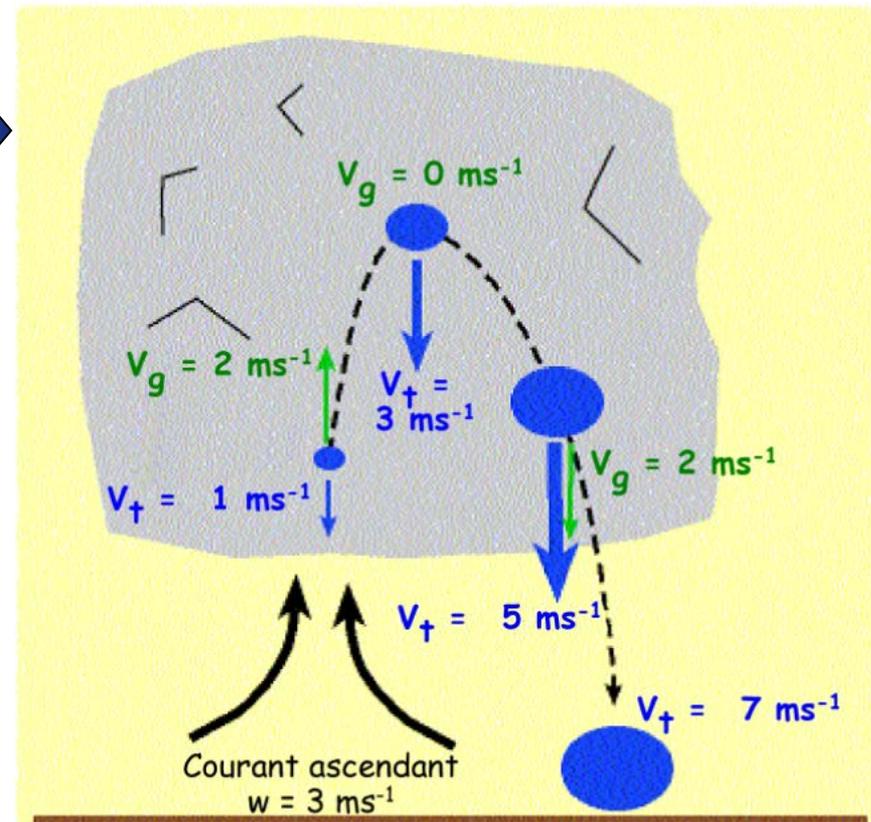
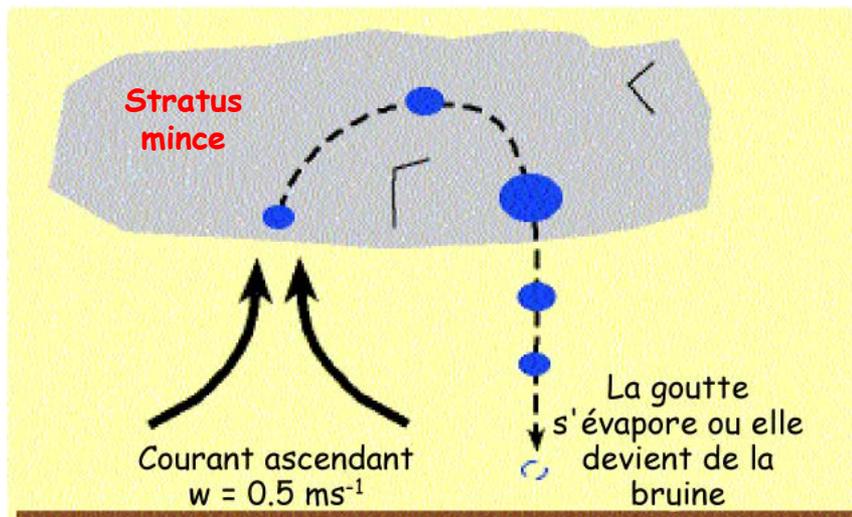


gouttes de pluie :
100 par litre

La formation de la pluie

Nuages chauds

- La croissance par collection est efficace si le nuage est épais (grande extension verticale et grand contenu en eau liquide) et que le mouvement vertical ascendant dans le nuage est fort. 



QUESTION

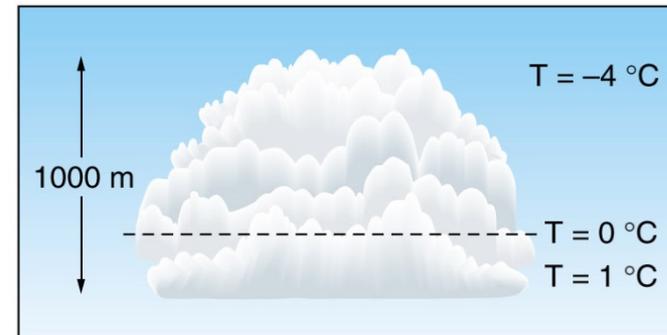
Comment expliquer alors que certains nuages de **faible extension verticale** produisent de la précipitation ?

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.

Nuages froids

- Sont définis comme les nuages dont la température du sommet est inférieure à 0°C .
- Peuvent être formés de :
 - Eau
 - Eau surfondue (eau liquide à des températures inférieures à 0°C)
 - Glace
- À noter que l'eau surfondue se trouve quand la température est dans l'intervalle $-40^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$.
- À des températures inférieures à -40°C on trouve seulement des particules de glace.

QUESTION

Alors comment se forme la neige et d'autre précipitation solide dans les nuages?

Types de cristaux de neige et leur vitesse terminale

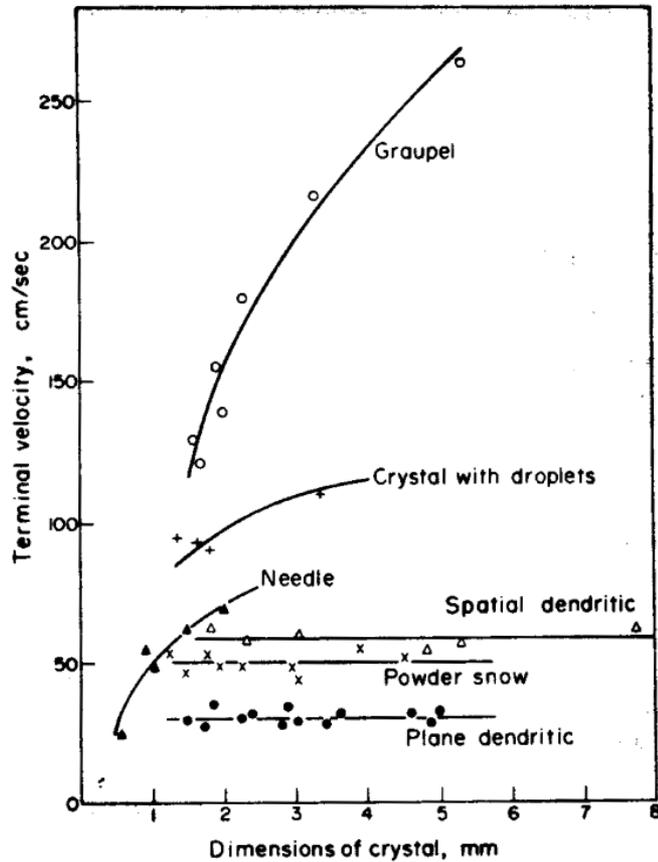
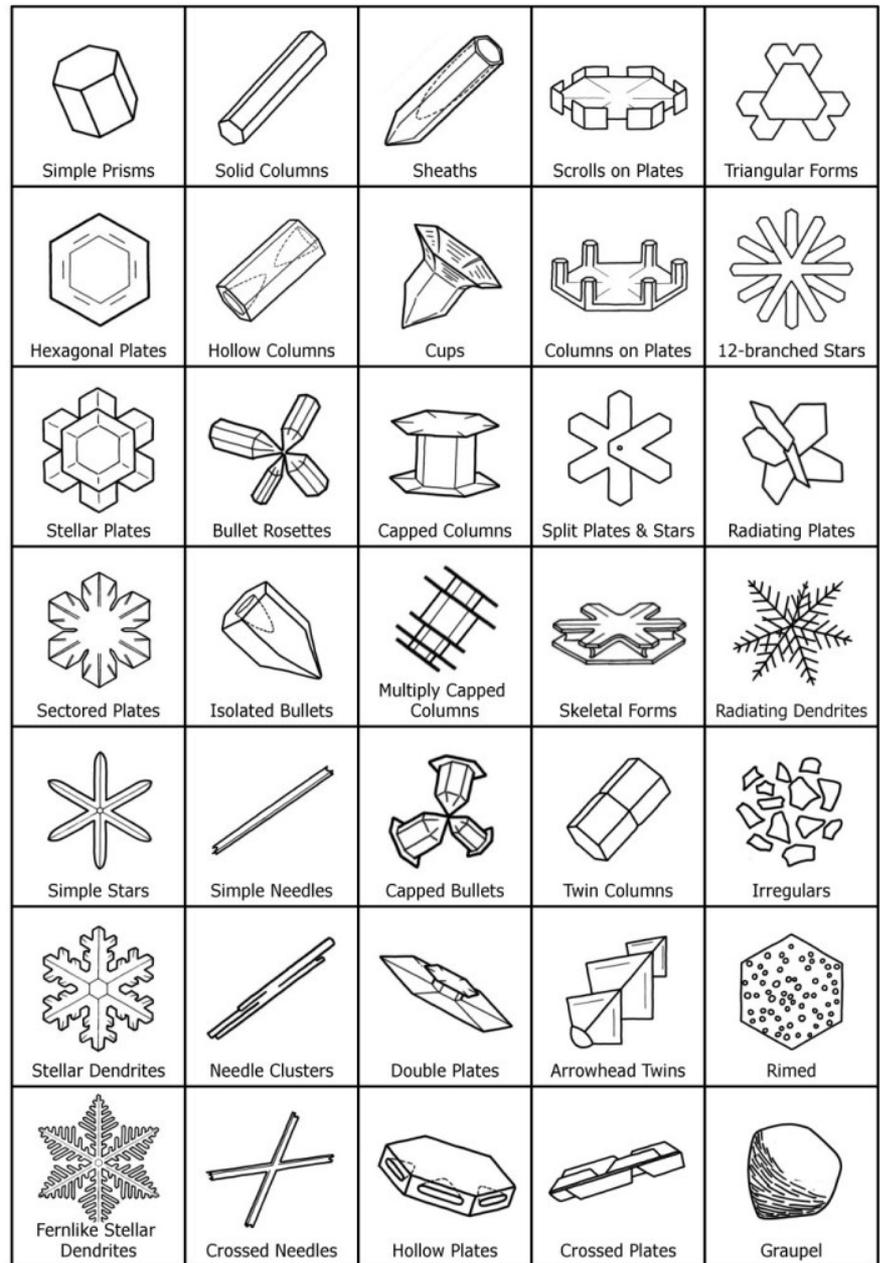
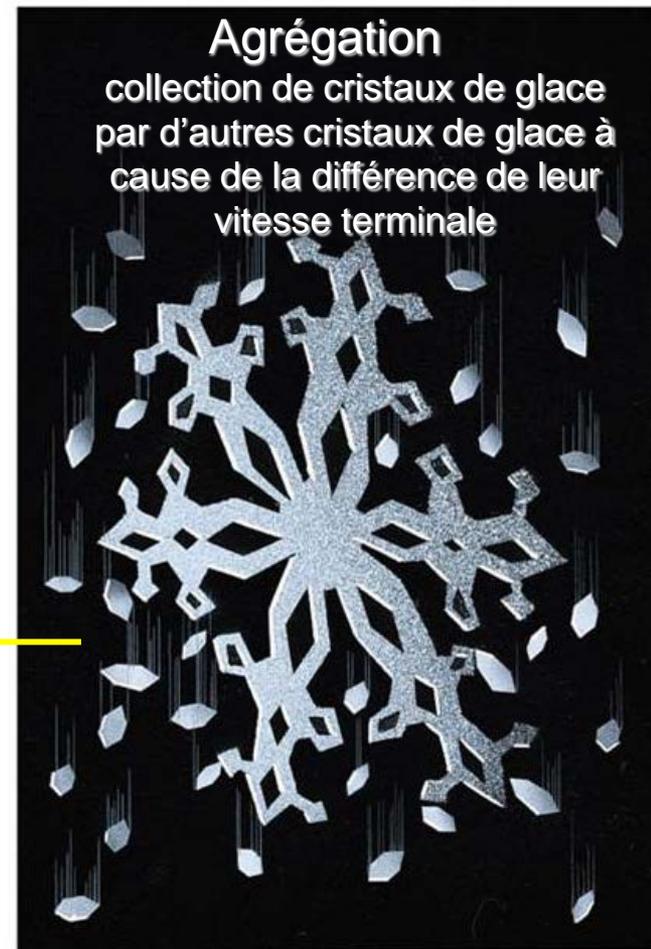
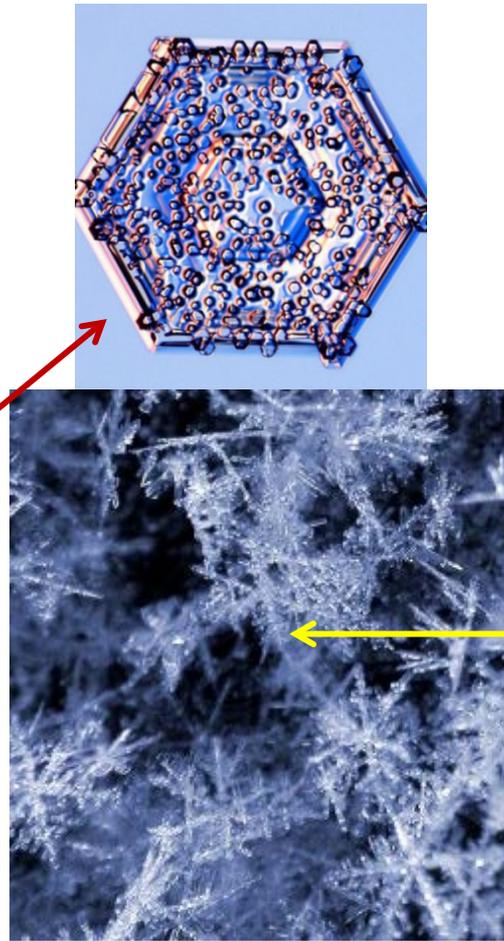


FIG. 9.7. Nakaya and Terada's measured terminal velocities of ice crystals. (From Fletcher, 1962.)



Nuage glacé : Croissance par givrage et agrégation des cristaux de glace



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

Neige

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

Formation de particules de glace dans les nuages

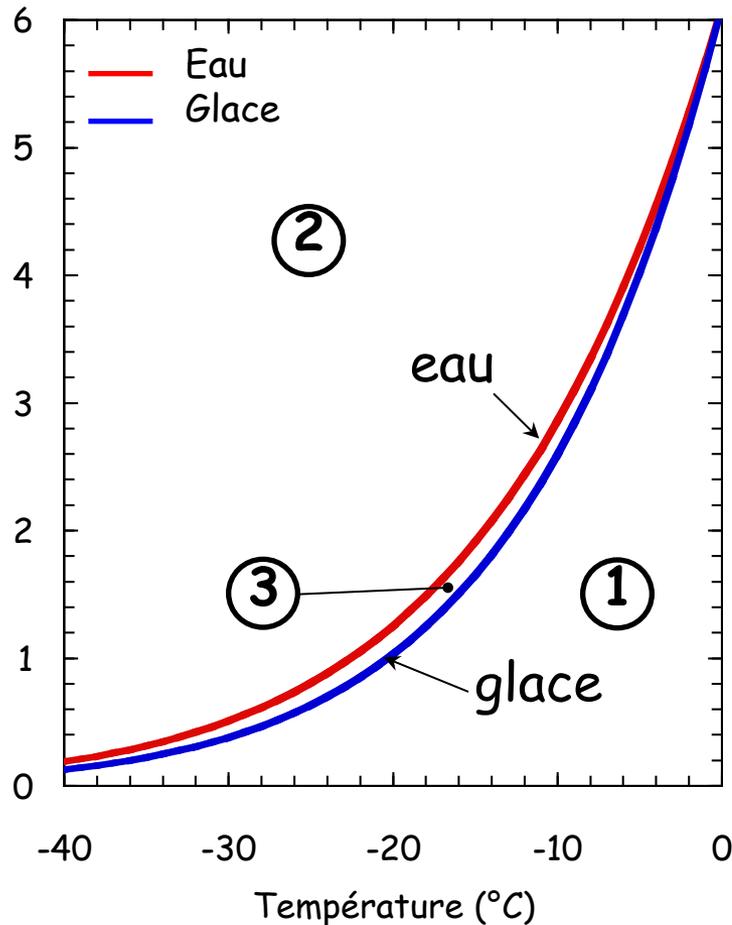
- Tous les processus décrits jusqu'à maintenant sont présents dans un nuage froid pour former des particules de glace.
 - Solidification homogène ($T < -40^{\circ}\text{C}$)
 - Dépôt
 - Solidification par contact
 - Givrage
 - Agrégation

QUESTION

Soit un nuage mixte, contenant des particules d'eau et de glace, quel type de particule grossira plus rapidement et pourquoi?

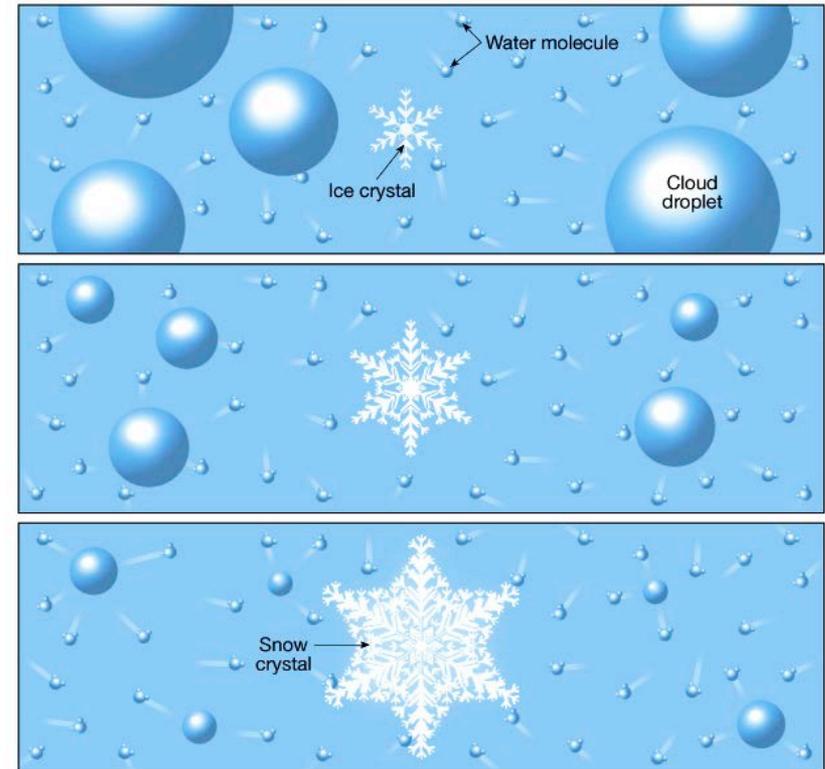
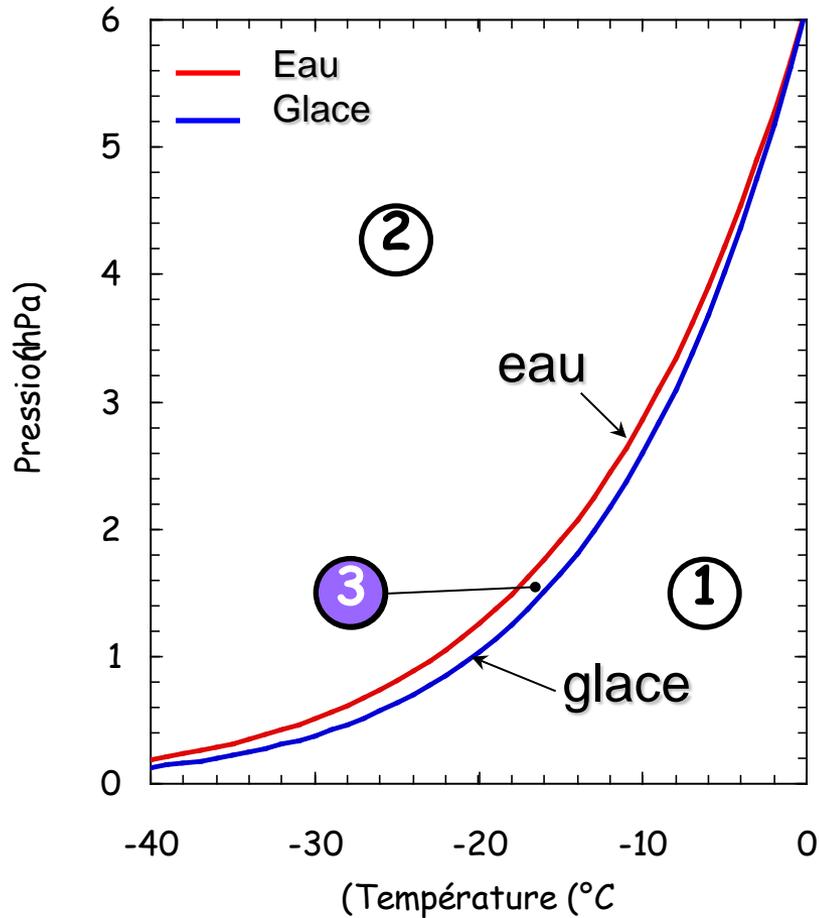
Relation entre e_w , e_i et la température

Dans le cas où les particules condensées sont assez grandes pour que les effets de courbure et de solution soient négligeables l'équilibre entre les diverses phases est donnée par les courbes de Clapeyron (surfaces planes d'eau pure).



1. $e < e_i \rightarrow$ sublimation des cristaux et évaporation des gouttelettes;
2. $e > e_w \rightarrow$ condensation sur les gouttelettes et les cristaux;
3. $e_i < e < e_w \rightarrow$ évaporation des gouttelettes et condensation solide sur les cristaux de glace.

Processus de Bergeron

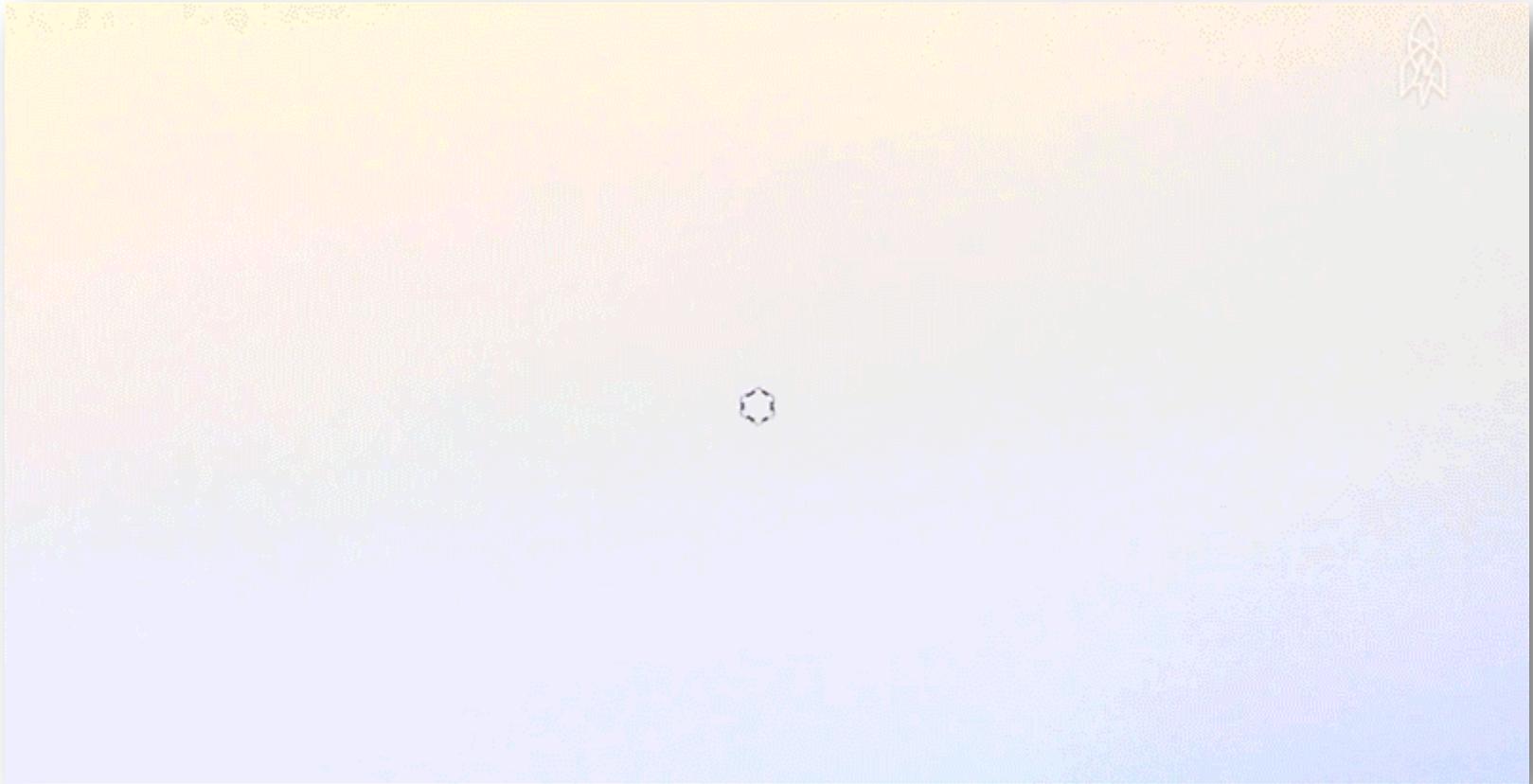


- ③ Si $e_i < e < e_w \rightarrow$ Les gouttelettes d'eau s'évaporent et cette vapeur d'eau se dépose sur les cristaux de glace permettant à ces derniers de croître rapidement.

Processus de Bergeron

- $e_i < e < e_w \rightarrow$ 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 .

Croissance d'un cristal de neige



<https://www.megacurioso.com.br/fisica-e-quimica/98675-ciencia-e-arte-fisico-mostra-que-criar-flocos-de-neve-e-incrivel.htm>

Exemple

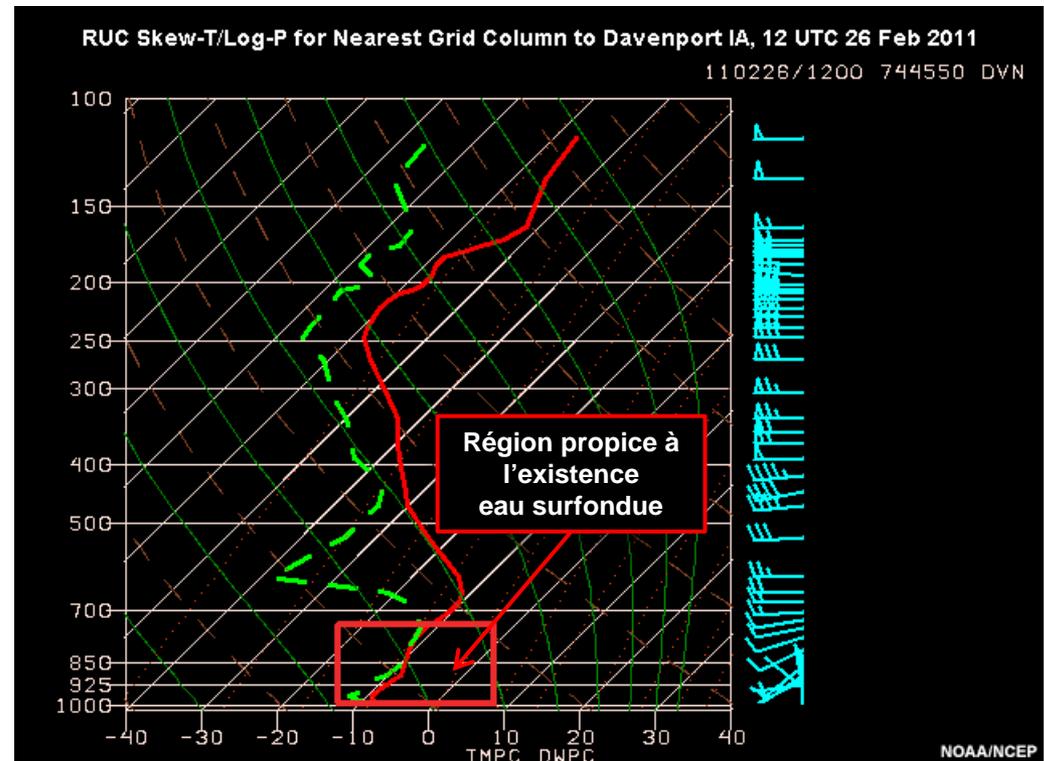
Considérer les trois situations suivantes :

- Un nuage hypothétique dont la température est telle que $e_w = 5 \text{ hPa}$ et $e_i = 2 \text{ hPa}$. Si :
 - La pression de la vapeur dans le nuage est $e = 6 \text{ hPa}$. Quelles particules (eau et / ou glace) grandissent dans cet environnement?
 - La pression de la vapeur dans le nuage est $e = 4 \text{ hPa}$. Quelles particules (eau et / ou glace) grandissent dans cet environnement?
 - La pression de la vapeur dans le nuage est $e = 1 \text{ hPa}$. Quelles particules (eau et / ou glace) grandissent dans cet environnement?

Exemple

Le sondage de la figure 1 montre la simulation de RUC à Davenport IA(DVN), pour le 26 février 2011, 12 UTC.

1. Encadrez la couche atmosphérique où l'existence d'un nuage d'eau surfondue est probable. Justifiez votre choix.
2. Les pilotes d'avion seront averties du risque de givrage. Expliquez le processus de givrage observé au passage de l'avion dans un nuage formé de gouttelettes d'eau surfondue.



Ensemencement des nuages

- Souvent les nuages ne précipitent pas pour deux raisons :

- Le nuage n'a pas assez de noyaux glaçogènes.
- Il n'y a pas assez d'humidité dans le nuage (e est bas)

- D'où l'idée de l'ensemencement :

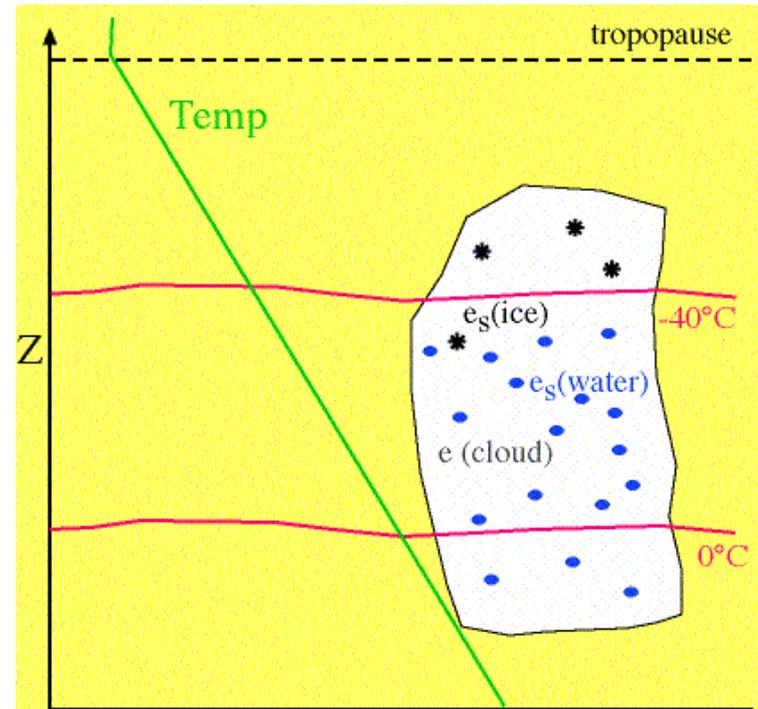
- Considérez le nuage de la figure

- $e_w = 5 \text{ mb}$

- $e_i = 2 \text{ mb}$

- $e \text{ (nuage)} = 3 \text{ mb}$

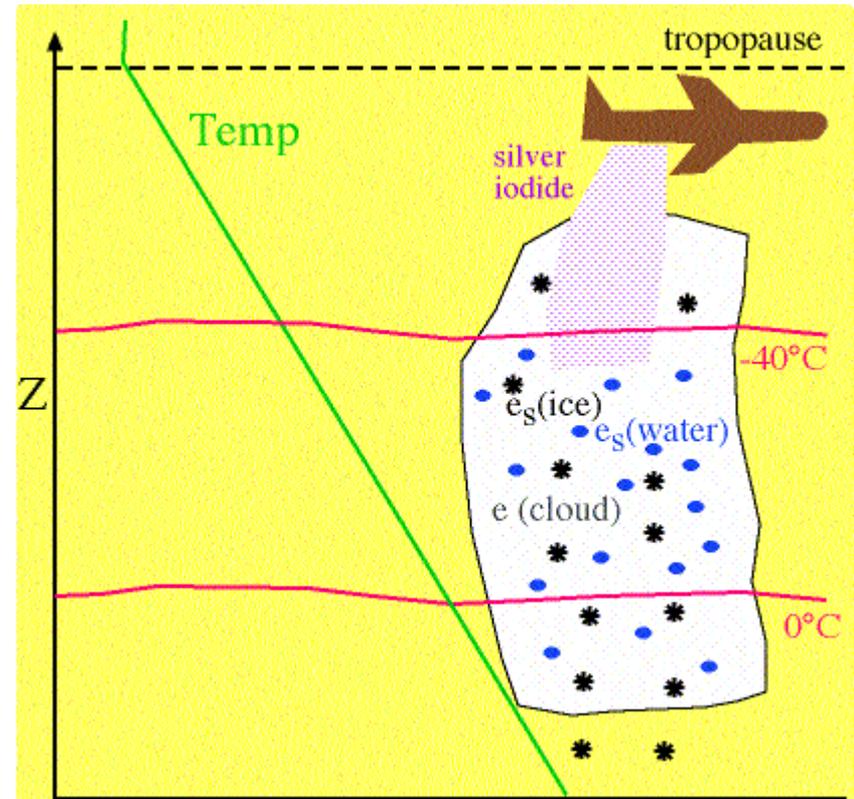
- Il y a de la sursaturation par rapport à la glace, mais il n'y a pas assez de noyaux de condensation. Quoi faire?
- L'addition de noyaux de glaciation permet la formation de cristaux de glace ce qui peut faciliter la précipitation.



Ensemencement des nuages

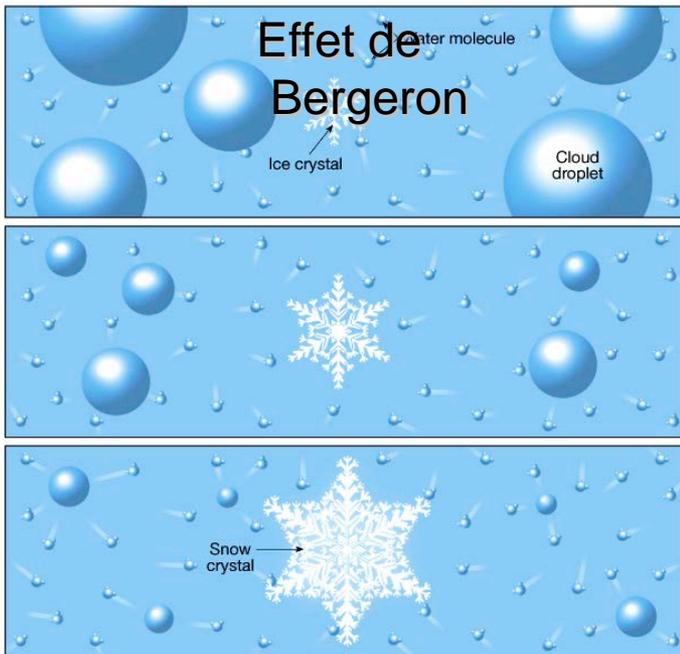
- Pour additionner des noyaux glaçogènes au nuage il suffit d'introduire par avion dans le courant ascendant :
 - De l'iodure d'argent
 - De la neige carbonique (glace sèche)

- Si le nombre de noyaux glaçogène est excessif :
 - Il y aura trop de petits cristaux en compétition pour la vapeur d'eau disponible;
 - Il n'aura pas assez de vapeur d'eau pour que les cristaux grandissent jusqu'à précipiter. On finira avec un nuage plein de petits cristaux (un beau cirrus).
 - Puisque les cristaux ne grandissent pas assez, on supprime la précipitation.



Questions

- Supposez qu'un nimbostratus est formé de gouttelettes d'eau et de cristaux de glace de tailles équivalentes. Quelle seront les processus de formation de précipitation le plus important dans ce nuage? Pourquoi?



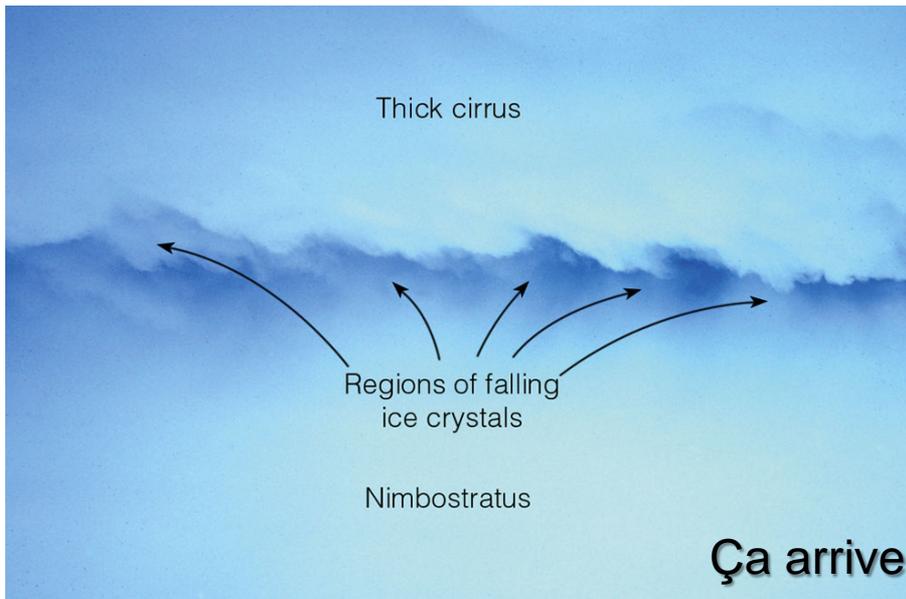
(a) Falling ice crystals may freeze supercooled droplets on contact (accretion), producing larger ice particles.



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

Questions

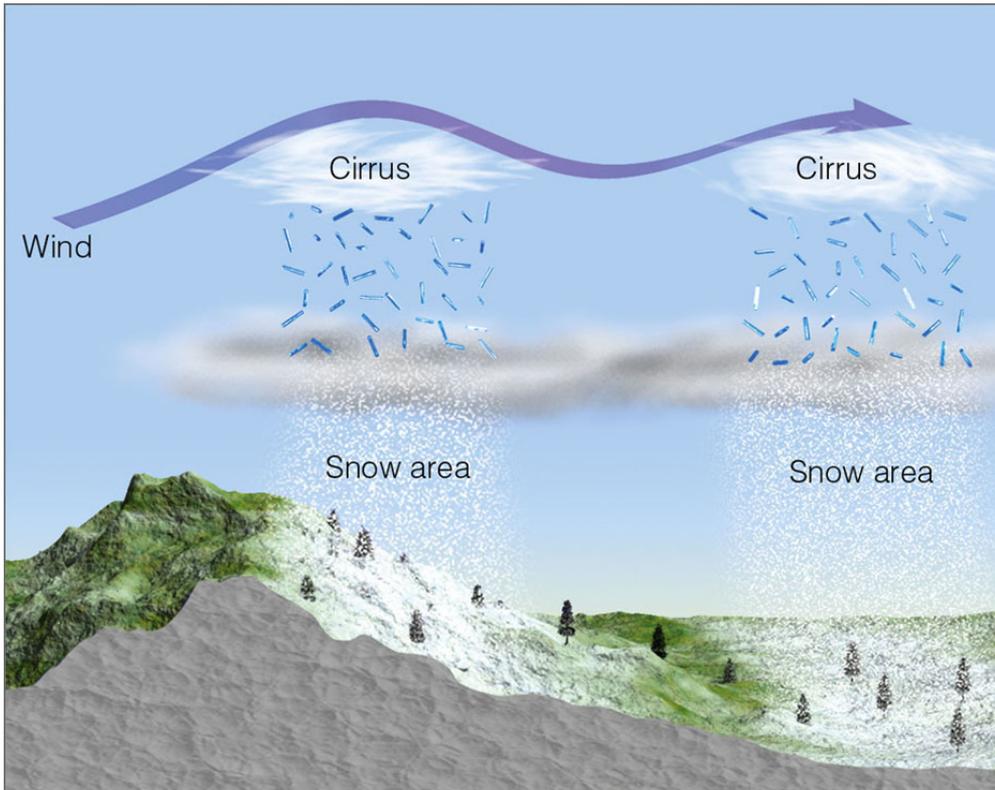
■ Quand on observe des cirrus au-dessus d'une couche de altocumulus, il apparaît occasionnellement des «trous» dans la couche d'altocumulus. Décrivez un phénomène naturel qui peut expliquer ces «trous»?



Ça arrive aussi dans les nimbostratus...

Questions

- Pendant une tempête de neige, Denver, CO, reçut 7 cm de neige. 60 km à l'est de Denver une ville n'a pas que reçut pratiquement de la neige, pendant qu'à 150 km à l'est de Denver une autre ville a reçu 10 cm de neige. Denver se situe à l'est des Rocheuses, et les vents en altitude venait d'ouest. Donner une explication plausible de cette distribution spatiale de la neige.

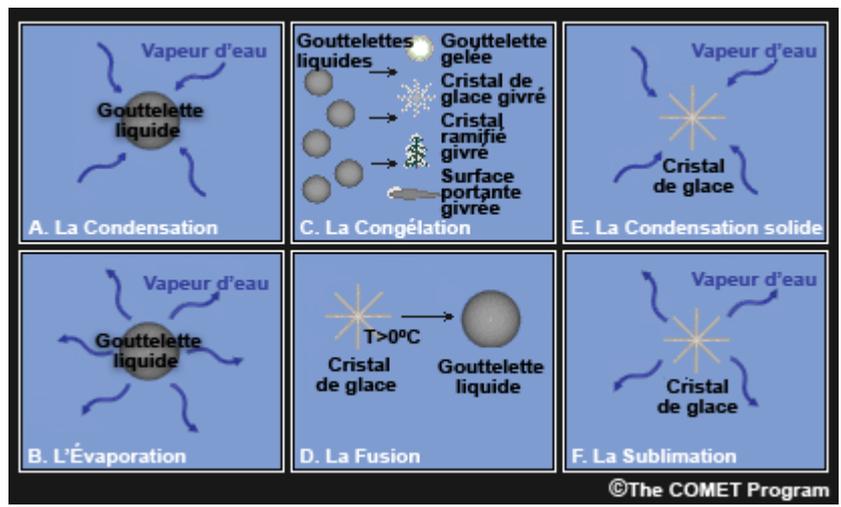


© Brooks/Cole, Cengage Learning

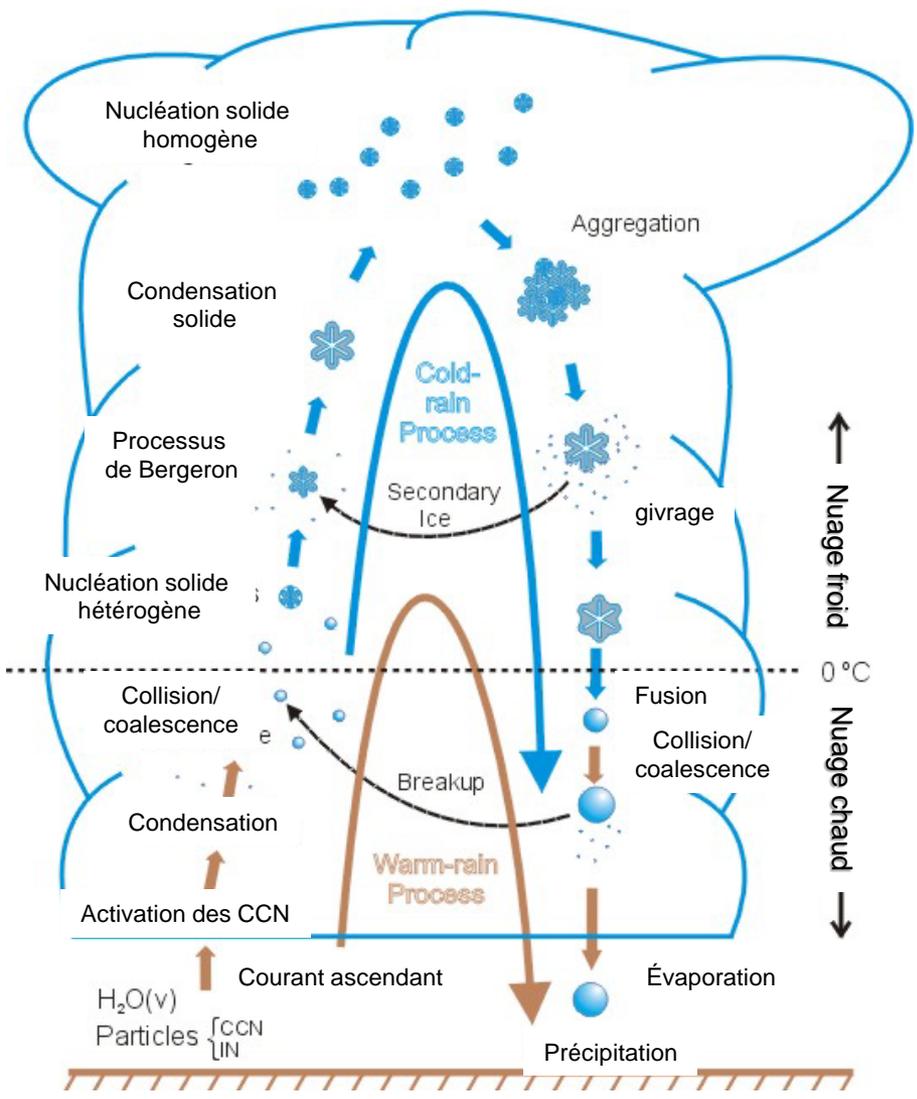
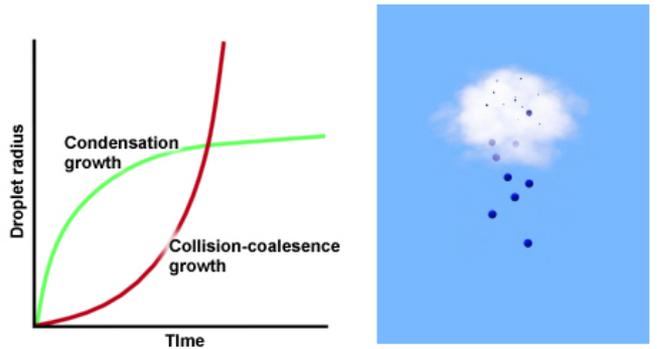


Résumé :

Modèle conceptuel des processus de formation de la précipitation à l'intérieur d'un cumulonimbus



Growth of Cloud Droplets by Condensation and Collision-Coalescence



CCN – noyaux de condensation
 IN – Noyaux de glaciation