

Formation des nuages : un début

Physique des nuages :

4. Micro-physique des nuages chauds

Jean-Yves GRANDPEIX ; Rémy ROCA

Laboratoire de Météorologie Dynamique

Idée centrale

Un nuage chaud est fait de gouttelettes d'eau liquide.

Si on connaît le spectre des tailles des gouttelettes, alors on peut déterminer l'épaisseur optique et l'albedo du nuage, c'est-à-dire les variables affectant le bilan radiatif terrestre.

Le principe du cours est donc de montrer comment déterminer les spectres de tailles des gouttelettes, puis d'établir le lien avec les propriétés radiatives des nuages.

Micro-physique des nuages : plan du cours

- I - Micro-physique :
 1. Généralités
 2. Mise en évidence expérimentale des processus nuageux
 3. Aérosols - Noyaux de condensation (CCN) - Gouttelettes
 4. Croissance des gouttelettes
- II - Rôle de la dynamique nuageuse :
 1. Nuage adiabatique
 2. Entraînement
- III - Effet radiatif des nuages chauds

I - Micro-physique

I-Micro-physique des nuages : generalites

Micro-physique des nuages : généralités (1)

Qu'est-ce-que la micro-physique des nuages ?

Différentes micro-échelles :

- $< 1\mu m$: aérosols, noyaux de condensation.
- quelques μm : gouttelettes
- mm : gouttes.
- cm : micro-hétérogénéités.
- $> 1cm$, jusqu'à la dizaine de mètres : turbulence, entraînement.

Micro-physique des nuages : généralités (2)

Qu'est-ce-que la micro-physique des nuages chauds ?

Il s'agit des **nuages sans glace**.

La glace joue un rôle très important dans les processus nuageux et surtout dans les processus de précipitation (toutes les pluies un peu fortes impliquent des processus glacés : effet Bergeron). Mais ces processus à 3 phases sont complexes et très mal connus.

On se contente ici d'aborder de façon simple les **processus nuageux à 2 phases** (et c'est bien assez compliqué comme cela).

Micro-physique : historique

Travaux fondateurs de **John Aitken** (1880) :

"The conclusion which may be drawn from these experiments are

- 1st, that when water vapour condenses in the atmosphere, it always does so on some solid nucleus ;
- 2d, that the dust particles in the air form the nuclei on which it condenses ;
- 3d, if there was no dust in the air there would be no fogs, no clouds, no mists, and probably no rain."

Les observations d'Aitken ont été théorisées par Köhler (1921).

Ne pas oublier : C.T.R. Wilson a montré ensuite (1895) que même lorsqu'il n'y a plus aucun noyau de condensation, des gouttelettes peuvent se former lorsque la sursaturation devient suffisante. D'où un nouveau détecteur de particules ;

Wilson cloud chamber, 1912.

Voir par exemple :

http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/physicists/physicists_wilson.htm

Mise en évidence expérimentale des processus nuageux

L'expérience de la bouteille permet de montrer :

- la formation de gouttelettes sous l'action d'une détente adiabatique.
- la structure très hétérogène du milieu nuageux (double diffusion gouttelettes - vapeur d'eau).
- la vitesse de chute des gouttelettes, d'autant plus grande que les gouttelettes sont plus grosses.
- le rôle des aérosols.

II-Aerosols, noyaux de condensation,
gouttelettes

Equilibre liquide-vapeur

Pressions

e = pression partielle de vapeur d'eau.

$e_s(T)$ = pression saturante sur interface plane d'équilibre liquide-vapeur
(interface = passage continu d'une phase à l'autre)

Equilibre sur interface courbe

(il s'agit d'une méthode pour retrouver les formules, non d'une démonstration, laquelle passerait par les potentiels chimiques)

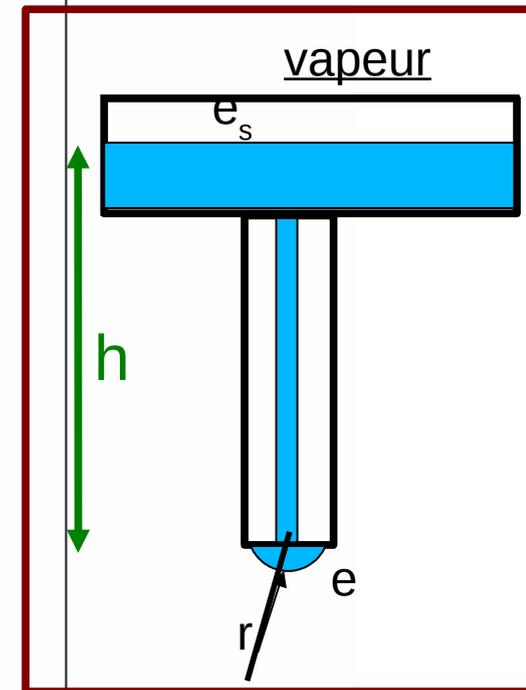
Système liquide-vapeur supposé à l'équilibre ; l'interface supérieure est plane (pression e_s) ; l'interface inférieure est courbe ; les forces de capillarité assurent l'équilibre.

Soit e la pression dans la vapeur au voisinage du ménisque. L'équilibre du gaz isotherme donne :

$$e = e_s \exp\left(\frac{gh}{R_v T}\right)$$

L'équilibre de la colonne liquide donne :

$$e + \frac{2\sigma}{r} = e_s + \rho_l gh$$



Gouttelette d'eau pure

D'où :

$$\frac{e}{e_s} = \exp\left(\frac{e - e_s + \frac{2\sigma}{r}}{\rho_l R_v T}\right)$$

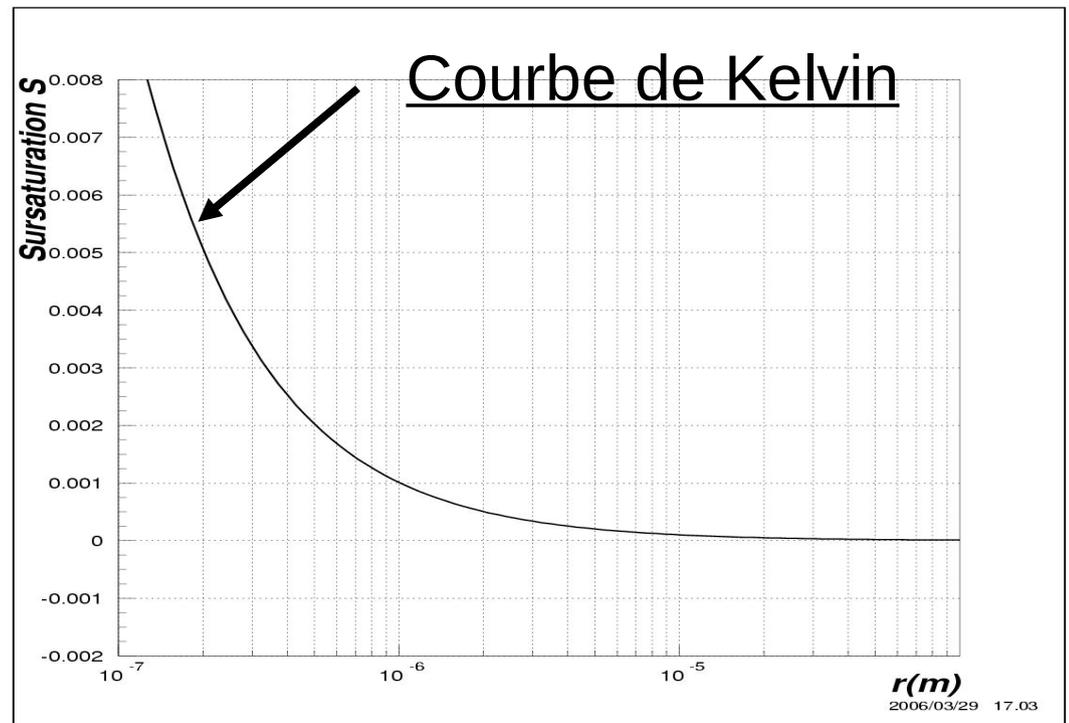
Approximation :

$$\frac{e}{e_s} = \exp\left(\frac{2\sigma}{r \rho_l R_v T}\right) \quad \text{Loi de Kelvin}$$

Définition : Sursaturation $S = \frac{e}{e_s} - 1$

Les valeurs de sursaturation nécessaires à l'apparition d'une gouttelette selon la loi de Kelvin sont inaccessible dans les milieux naturels.

C'est là que vont entrer en jeux les aérosols.



Les aérosols

Origines

- Bulles éclatant à la surface des océans.
- Soulèvement de poussières.
- Activités humaines.
- Feux de forêts.
- Conversion gaz \longrightarrow particule : SO_2 .

Types

Tailles : 0.1 à 1 μm .

Composition : sels, composés organiques, quelques minéraux (mais nucléation, c'est-à-dire le "mouillage" initial, difficile). Élément principal : les sulfates.

Aérosols sulfatés

La présence d'un soluté modifie la pression de vapeur saturante :

pour N_s moles de soluté et N_w moles d'eau, la pression de vapeur est diminuée d'un facteur $\frac{N_w}{N_w + N_s} \simeq (1 - \frac{N_s}{N_w})$ (Loi de Raoult) :

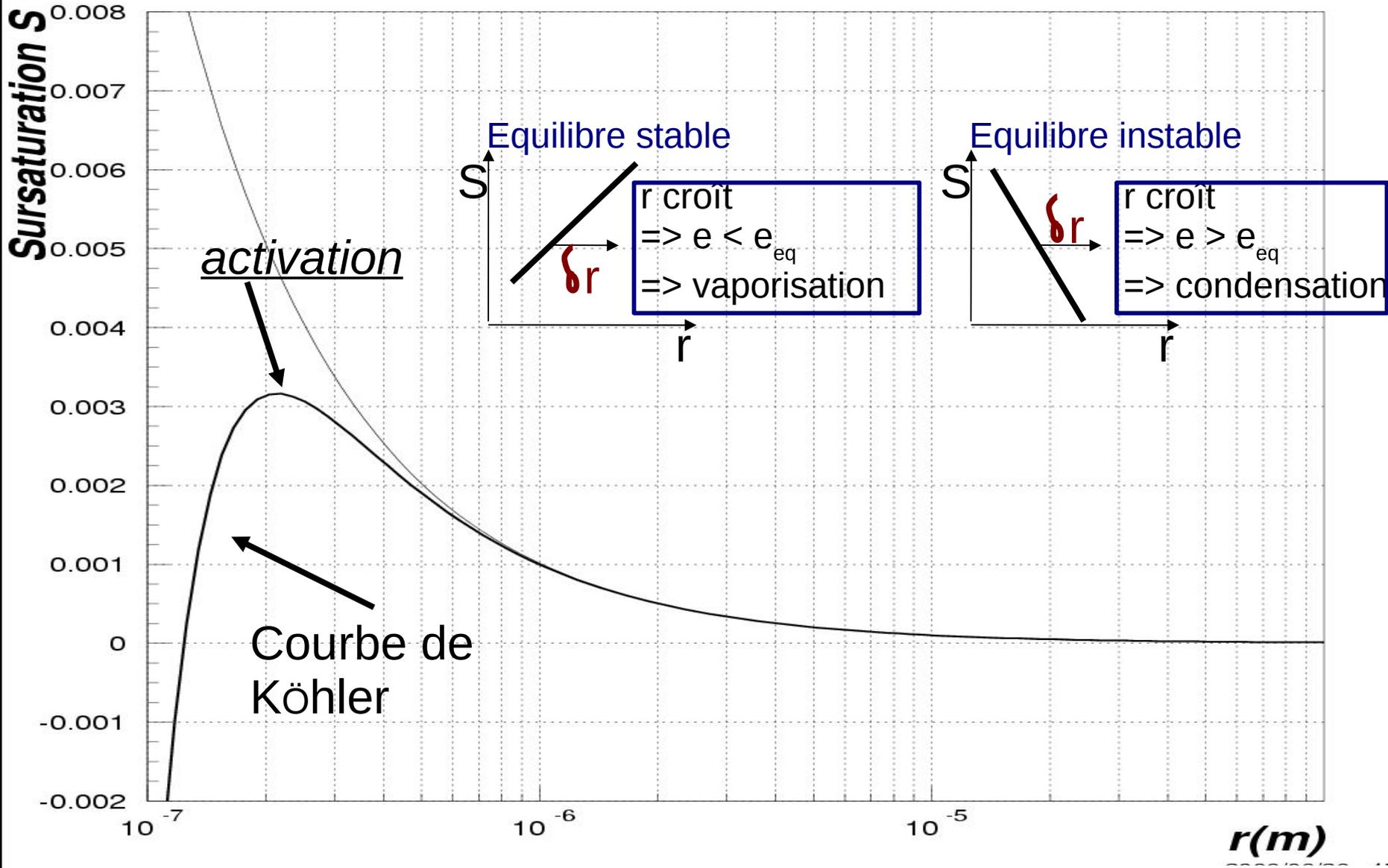
$$\frac{e}{e_s} = (1 - \frac{N_s}{N_w}) \exp(\frac{2\sigma}{r\rho_l R_v T})$$

Au premier ordre :

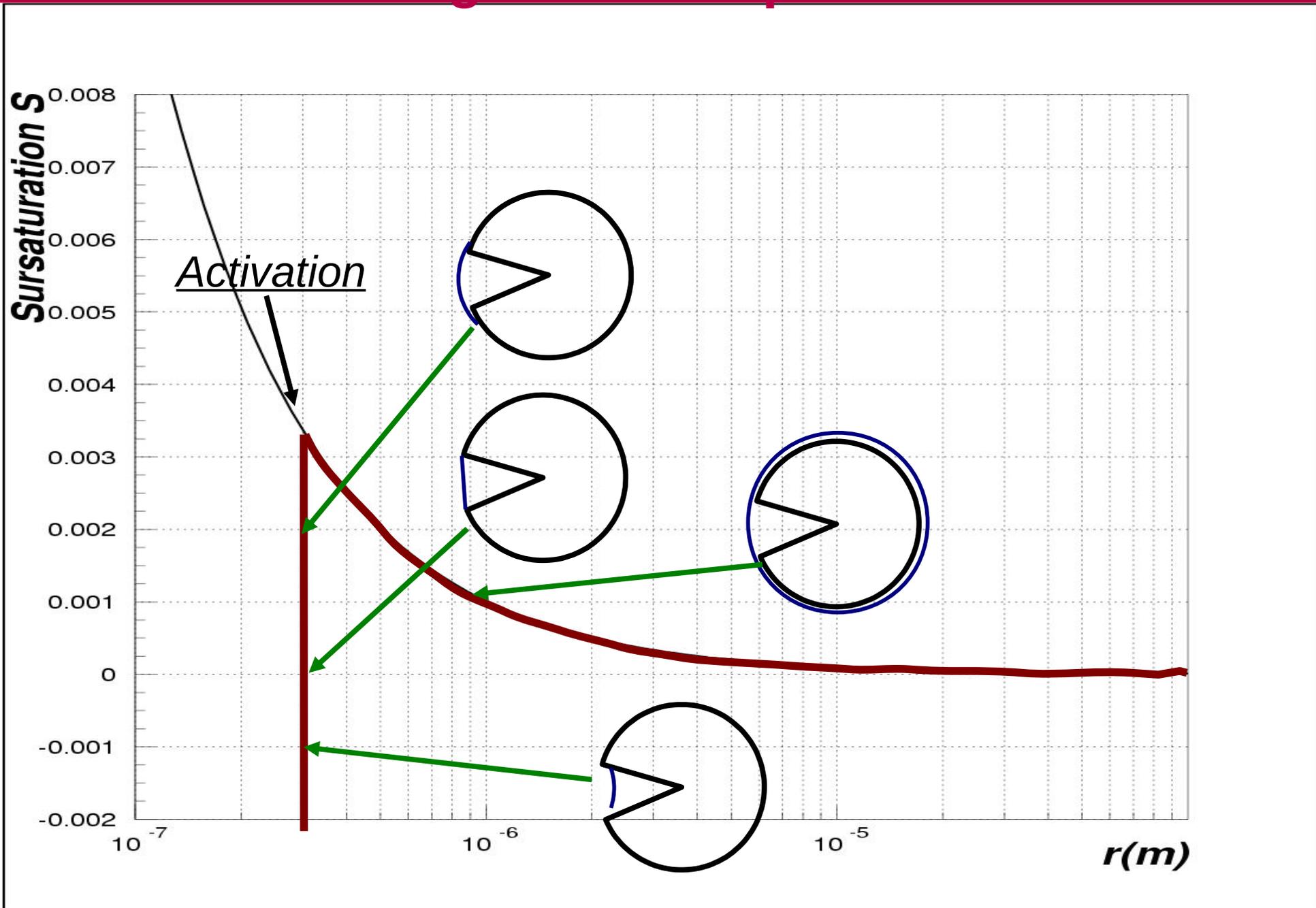
$$S = \frac{A}{r} - \frac{B}{r^3} \quad \text{Loi de Köhler}$$

avec : $A = \frac{2\sigma}{\rho_l R_v T}$ et $B = N_s \frac{3M_v}{4\pi\rho_l}$.

Activation d'une gouttelette par un aérosol sulfaté



Activation d'une gouttelette par un aérosol minéral



Récapitulation aérosols, noyaux de condensation, gouttelettes

- Noyaux de condensation (ou CCN) = aérosols hydratés.
- **nucléation** = passage des aérosols de l'état sec à l'état hydraté.
- existence des noyaux de condensation permise par la baisse de la pression de vapeur d'équilibre induite par la solubilité de l'aérosol ou par les enfractuosités d'un aérosol insoluble.
- **activation** = franchissement d'un rayon critique au-dessus duquel la gouttelette est dans un état instable et croît.