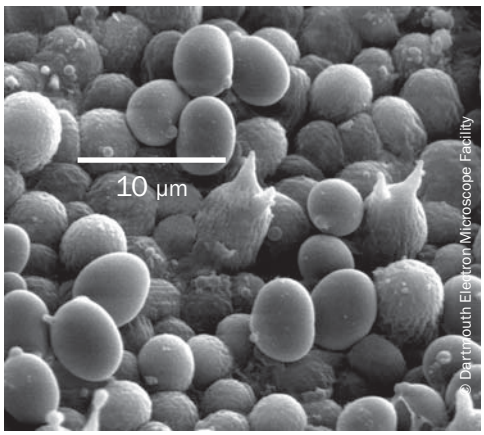


Figure 1.9 – Spores de l'Agaric

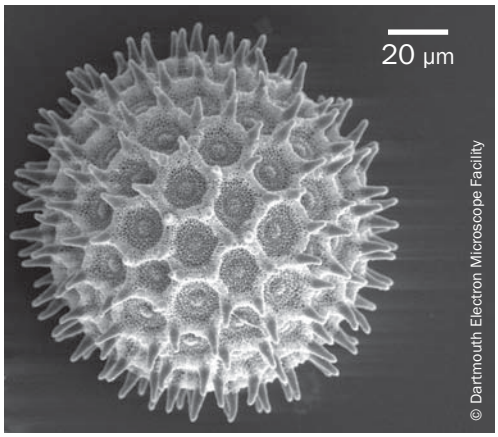


Figure 1.10 – Grain de pollen du tournesol

- Les particules isomètriques : elles ont sensiblement les mêmes dimensions selon les trois directions. Les particules sphériques (figures 1.1) en sont évidemment des exemples. Cette classe inclut également des particules qui approchent la forme de polyèdres réguliers. De telles formes sont souvent produites par l'évaporation des gouttes des solutions salines dont les géométries des résidus secs dépendent de la structure cristalline du sel (figure 1.2).
- Les platelets : il s'agit des particules dont deux dimensions sont grandes par comparaison à la troisième : figures 1.3 et 1.4. Des exemples caractéristiques sont les fragments de feuilles ou certaines particules de pollen.
- Les fibres : il s'agit des particules dont une des dimensions est grande devant les deux autres (voir figure 1.6).

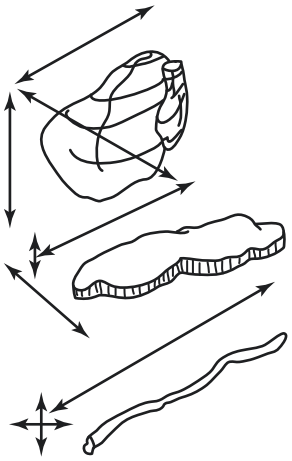


Figure 1.11 – Morphologies

Des exemples de particules aérosols du type fibres d'un intérêt tout particulier pour la santé résultent de la dégradation de produits comme la laine de verre ou l'amiante ou encore des éléments textiles émis par la coupe des tissus dans l'industrie du vêtement.

Caractéristiques de dimension

Cette variété morphologique que nous venons d'observer complique singulièrement la description d'un milieu aérosol. De surcroît, pour un même milieu, il est rare qu'une seule forme de particule soit rencontrée. Les particules peuvent encore présenter des dimensions sur 4 à 5 ordres de grandeur et être en nombres variables selon leur taille.

On distingue classiquement les trois classes ou modes granulométriques suivantes : particules ultrafines dites encore souvent nanoparticules $0,001\ \mu\text{m} \leq d_{\text{aero}} \leq 0,1\ \mu\text{m}$, particules fines $0,1\,\mu\text{m} \leq d_{\text{aero}} \leq 2,5\ \mu\text{m}$ et particules grossières $d_{\text{aero}} \geq 2,5\ \mu\text{m}$. Ces valeurs des diamètres sont à prendre comme des valeurs conventionnelles. La figure 1.13 illustre les importances relatives – en termes de nombre et de masse – des particules suspendues dans une unité de volume d'air.

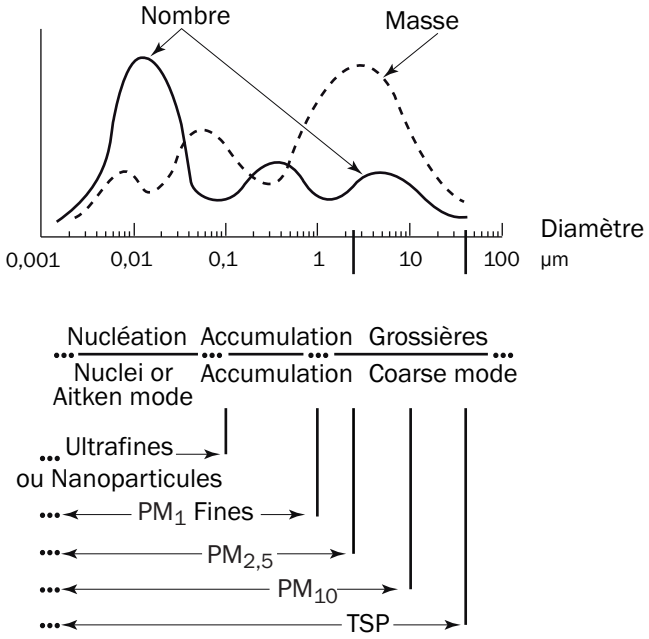


Figure 1.13 – Classes de particules

La taille de ces diverses particules est l'une de leurs caractéristiques importantes car elle détermine leur temps de séjour dans l'atmosphère qui dépend aussi de plusieurs autres facteurs comme réactivité chimique, solubilité, etc.

En raison de leur taille, les particules ultrafines se comportent presque comme des gaz. Elles pourraient résider très longtemps dans l'atmosphère à la différence des particules grossières qui du fait de leur masse se déposent relativement vite par la gravité. Cependant, ces particules ultrafines grossissent rapidement par collisions et agglomérations entres elles ou encore en servant de noyaux de condensation à des composants gazeux peu volatils.

En définitive, ce sont des particules comprises entre $0,1\,\mu\text{m}$ et $2,5\ \mu\text{m}$ – dite classe ou mode d'accumulation – qui ont les durées de vie les plus élevées dans l'atmosphère. Ce mode d'accumulation est constitué de particules ayant initialement cette taille, mais aussi de particules résultant de l'agglomération des particules ultrafines ou grossies par des condensations sur leur surface – et c'est l'origine du nom donné à ce mode. Leur durée de vie atteint parfois la semaine et elles peuvent ainsi transporter des composés dangereux pour la santé sur de très longues distances en présence de vents.

Cette distribution lognormale est très souvent utilisée comme expression de la distribution en nombre des aérosols. Il convient néanmoins de garder présent à l'esprit qu'elle ne constitue qu'une approximation, parfois assez éloignée, des distributions réelles. La figure 2.14 qui suit fournit une représentation des variations de cette distribution pour diverses valeurs de ses paramètres.

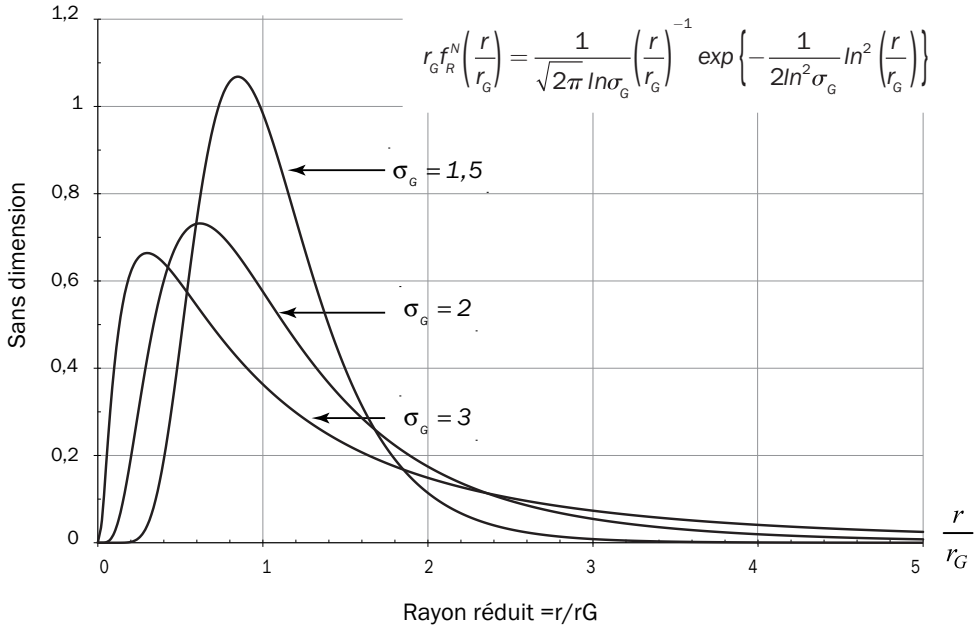


Figure 2.14 – Distributions lognormales

La distribution lognormale est telle que les divers rayons moyens et médians s'expriment avec les seules quantités r_G et σ_G. On aura soin de remarquer qu'elles ne sont pas la moyenne et l'écart type de la distribution en nombre lognormale : $r_G \neq \overline{r}^N$ et $\sigma_G \neq \overline{\sigma}^N$. Les significations statistiques de ces deux quantités sont fournies plus loin dans ce chapitre.

2.4.2. Propriétés de la distribution lognormale

Considérons des intégrales du type :

$$M^{k,N}(R) = \int_0^R r^k f^N(r) dr, \tag{2.9}$$

où la fonction f^N est la distribution lognormale :

$$f^N(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ln\ \sigma_G}\frac{1}{r}\ \exp\left\{-\frac{1}{2\ln^2\sigma_G} Ln^2\left(\frac{r}{r_G}\right)\right\}.$$

Remarquons que si un milieu s'écoule entre des parois et autour d'un certain nombre d'obstacles, il est possible de considérer ces parois et obstacles comme une phase particulière dont le mouvement est connu (éventuellement nul). En particulier, cette approche peut être appliquée à l'écoulement d'un aérosol dans un milieu poreux, dans un média filtrant, ou au travers d'un couvert végétal comme des champs de cultures ou les canopées de domaines boisés. Ce sont ces types de représentation que nous utiliserons dans les chapitres 7 et 8.

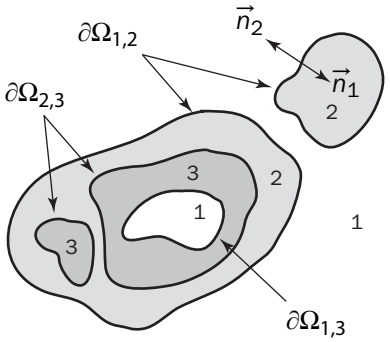


Figure 3.2 – Interfaces

Puisqu'une phase occupe seule son domaine, il est possible d'y définir des grandeurs $g_k(\vec{M},t)$ qui en chacun des points occupés à un instant t par cette phase k fournissent les diverses propriétés physiques par unité de masse (par exemple la quantité de mouvement, l'énergie totale). Les fonctions $g_k(\vec{M},t)$ sont définies dans $\Omega_k(t)$ seulement. La description de chacune des phases est obtenue par un ensemble de telles grandeurs.

Les milieux poly-phasiques peuvent avoir des caractéristiques aléatoires. C'est le cas, en particulier, des milieux aérosols. A la différence du cas déterministe examiné ci-dessus pour lequel on connaît l'état du milieu grâce à la donnée d'une unique série de fonctions Ω_k, f_k, g_k fournissant ses propriétés, un milieu ayant un caractère aléatoire peut, en général, présenter une infinité d'états possibles, chacun étant appelé à une réalisation possible du milieu.

Pour les décrire, la représentation déterministe ci-dessus est étendue de façon simple, dans son principe tout au moins, à l'aide de la notation de Norbert Wiener[1] utilisant une variable index λ continue pour identifier une réalisation du milieu.

Pour chaque phase k, on a ainsi non pas une donnée unique $f_k(\vec{M},t)$ et $g_k(\vec{M},t)$ mais un ensemble de telles quantités : $f_k(\vec{M},t;\lambda)$, $g_k(\vec{M},t;\lambda)$, $\lambda \in \Lambda$; chacun des éléments de l'ensemble étant appelé une réalisation du milieu.

L'ensemble $\Lambda \equiv \{\lambda\}$ est l'ensemble des réalisations (appelé aussi ensemble des occurrences ou espace des observables) dont pour chaque élément λ est associé une certaine configuration du milieu.

Cette notation peut être vue comme une extension de ce qui est habituellement fait pour une quantité aléatoire discrète dont le nombre N des valeurs possibles est soit fini, soit dénombrable. Nous n'aurons pas besoin de beaucoup plus que ces notions dans cette section. Le lecteur qui souhaiterait approfondir ces techniques trouvera un exposé de détail de cette méthode en annexe B paragraphe B3 ainsi que des compléments qui lui permettront de les appliquer à d'autres milieux poly-phasiques aléatoires que les milieux aérosols traités ici.

Si les informations locales et instantanées dont on dispose dans un milieu poly-phasique sont trop nombreuses et complexes pour pouvoir être appréhendées et permettre d'obtenir une vue synthétique, il faut en déduire une description plus globale,

1 N. Wiener, *Non Linear Problems in Random Theory*, M.I.T. Press, 1958.

phénomènes d'agglomération ou, a contrario, en des fragmentations de particules. Ces différents mécanismes affectant le bilan du nombre de particules dans une classe sont illustrés sur la figure ci-dessous :

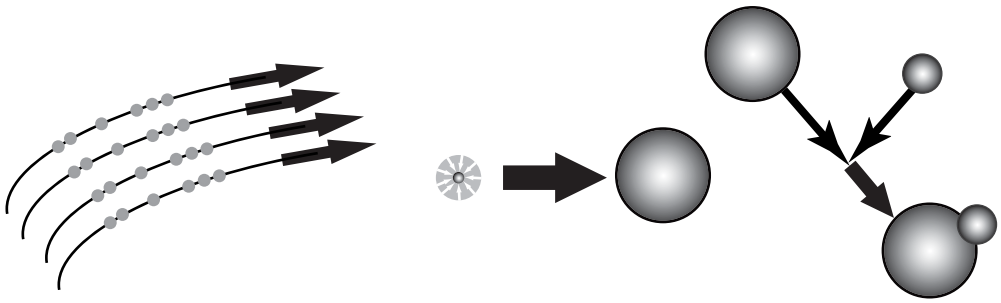


Figure 3.4 – Phénomènes aérosols

Venons en maintenant à l'établissement d'une équation de bilan de masse pour une classe de taille r, Δr. Nous utilisons à nouveau l'équation de bilan générale (3.8) avec son expression appliquée à la conservation de la masse, soit $g_k = 1$. La fonction indicatrice de la classe de taille r, Δr et la vitesse des particules sont respectivement. $\alpha_k \equiv \alpha(\vec{M}, t, r, \Delta r; \lambda)$; $\vec{u}_k = \vec{u}_P(\vec{M}, t, r, \Delta r; \lambda)$.

En général, il existe un flux de particules de la classe de taille , $r, \Delta r$ induit par des effets moléculaires tel, par exemple, le mouvement brownien produit par les molécules de gaz sur les particules aérosols que nous notons $\vec{j}_{gk} = \vec{j}_P(\vec{M}, t, r, \Delta r; \lambda)$.

Par ailleurs, il peut exister dans une unité de volume du milieu aérosol des mécanismes qui produisent l'apparition où la disparition de particules de la classe de taille considérée soit : $\Gamma_M(\vec{M}, t, r, \Delta r; \lambda)$ le taux volumique de production de masse correspondant. Hormis ce mécanisme, il peut exister encore deux autres types d'échanges de matière.

Il s'agit, d'une part, des échanges entre les surfaces des particules et la phase gazeuse, par évaporation ou par condensation. Et, d'autre part, des échanges de masse au travers des surfaces que produisent les agglomérations des particules et leurs fragmentations. Ces deux mécanismes qui se produisent par l'intermédiaire des interfaces entre phases présentes dans l'unité de volume du milieu conduisent à un taux volumique $\Gamma_M^{sV}(\vec{M}, t, r, \Delta r; \lambda)$. Ces éléments portés dans le bilan général (3.8) avec son expression spécifique à la conservation de la masse fournit :

$$\frac{\partial}{\partial t}\langle \alpha \rho_P \rangle + \vec{\nabla}.\langle \alpha \rho_P \vec{u}_P \rangle + \vec{\nabla}.\langle \alpha \vec{j}_P \rangle - \langle \alpha \Gamma_M \rangle - \langle \Gamma_M^{sV} \rangle = 0.$$

Classiquement, le bilan aérosols s'exprime comme une équation de bilan de la densité de la concentration numérique. Pour l'obtenir, il suffit de diviser les termes de la relation précédente par $\rho_P \upsilon(r) \Delta r$ et d'en prendre la limite quand l'intervalle de rayon tend vers zéro. Les relations (3.2) et (3.3) de la section 3.2.2 plus haut fournissent le bilan recherché :

$$\frac{\partial}{\partial t}\gamma^N(r) + \vec{\nabla}.\left[\gamma^N \vec{u}_a(r)\right] + \vec{\nabla}.\vec{j}_D(r) = S^N + \Gamma_{g-p}^N + \Gamma_{\text{Agglo}}^N + \Gamma_{\text{Frag}}^N. \tag{3.9}$$

position radiale $1,4\rho_0$ à l'issue d'un tour ce qui est plus intérieure, sa déviation par rapport à la ligne de courant fluide est donc plus petite. Ainsi, le dispositif de dépoussiérage par impaction des particules aérosols sur la paroi extérieure est d'autant plus efficace que les particules ont un grand diamètre puisque le nombre de Stokes varie comme le carré de leur diamètre. Ce type de dispositif sera en revanche à peu près sans efficacité pour des particules de diamètre inférieur au micromètre.

La figure ci-dessous illustre l'évolution du rayon vecteur dans le cyclone.

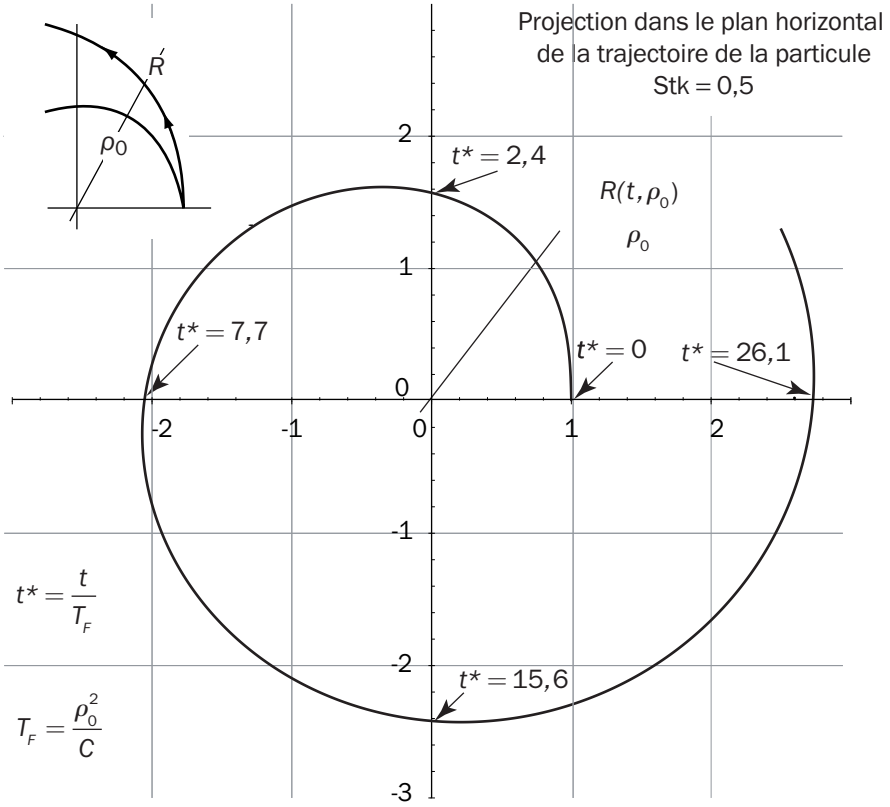


Figure 4.4 – Trajectoire dans un cyclone Stokes $= 0,5$

Une analyse simplifiée du mouvement des particules est possible si le nombre de Stokes est suffisamment petit. Dans ce cas, la durée pendant lequel la dérivée seconde du déplacement radiale est importante – c'est-à-dire la phase d'accélération – est petite devant la durée du mouvement de la particule. Après quoi la vitesse radiale de la particule est celle qui produit une traînée qui équilibre exactement la force centrifuge induite par le mouvement azimutal :

$$\frac{1}{\tau}\frac{dR}{dt} \cong \frac{V_{p\theta}^2}{R}.$$

lequel, la particule solide se transforme en une goutte de solution saline avec une concentration correspondant à la saturation.

Ceci est illustré sur la figure 5.2 relative au sel NaCl. On y a porté la fraction molaire d'eau x_e dans une particule de sel en fonction du taux d'humidité de l'atmosphère qui l'environne.

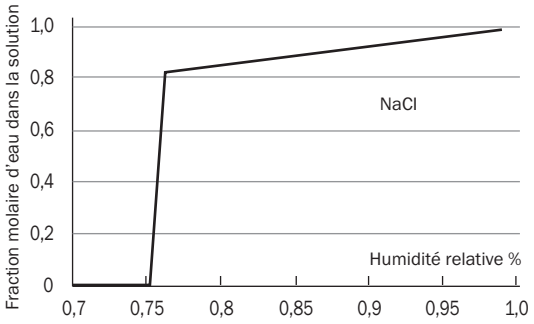


Figure 5.2 – Déliquescence du NaCl

Quand ce taux est inférieur à 75%, la particule de sel n'absorbe pas de molécules d'eau et la fraction molaire d'eau x_e est nulle. Dans cet état, la particule est dite anhydre. Quand l'humidité relative de l'atmosphère devient supérieure à 75%, le sel NaCl commence à absorber des molécules d'eau. On est en présence d'un sel hydraté qui se présente néanmoins encore comme une particule solide. Quand l'humidité de l'atmosphère excède une valeur caractéristique, 75,3% dans le cas du NaCl, l'absorption d'eau se poursuit, et la particule de sel hydraté se transforme rapidement en une goutte de solution.

Dans cette situation, la concentration dans la goutte est la limite de solubilité du NaCl dans l'eau. La solution est dite saturée. Pour NaCl la limite de solubilité à 25°C est de 359,07 g dans 1000 g d'eau. La masse molaire de NaCl étant 58,44 g, la molalité à saturation est donc de 6,144. La fraction molaire d'eau correspondante est 0,819 (voir la table en annexe). Si l'on continue à augmenter le taux d'humidité de l'atmosphère une condensation de vapeur se produit à la surface de la goutte, produisant une dilution de la solution.

Le *point de déliquescence* d'un matériau hygroscopique est la valeur de l'humidité relative de l'atmosphère pour laquelle une particule solide de ce matériau se transforme en une solution aqueuse saturée. La figure 5.2 nous indique que pour le sel NaCl le point de déliquescence est voisin de 75% (en fait 75,3%).

Nous allons déterminer la taille d'équilibre d'une particule d'un matériau hygroscopique placée dans une atmosphère dont la température T et l'humidité relative ε sont connues. A l'équilibre les transferts d'énergie et de masse sont nuls. On en déduit que la température T de la goutte de solution est celle du milieu gazeux et que la pression de vapeur P_{Ve} à sa surface est égale à la pression partielle de vapeur $P_{V\infty}$ dans l'atmosphère. Ainsi, à l'équilibre, les humidités relatives à la surface de la goutte et dans l'atmosphère sont égales. Cette condition est celle que nous mettons à profit ci-dessous pour déterminer la taille de la goutte.

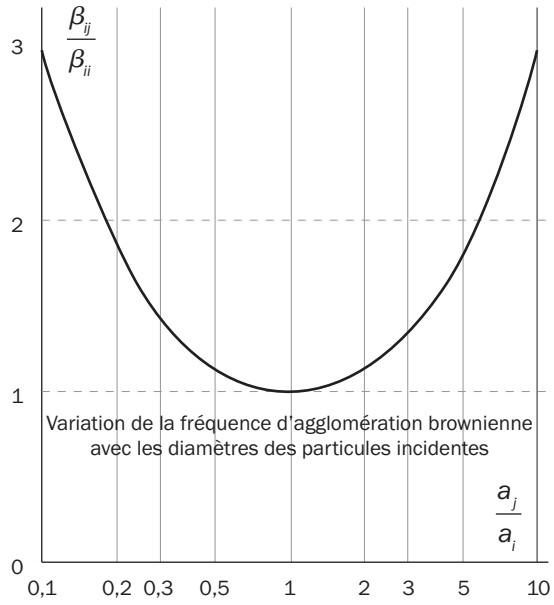


Figure 6.2 – Noyau d'agglomération $\beta_{ii} \sim 0,740\ \mu\mathrm{m}^3\mathrm{s}^{-1}$

Ces mouvements tourbillonnaires entraînent les particules aérosols et produisent les agglomérations selon deux mécanismes distincts.

Nous avons déjà rencontré le premier mécanisme baptisé échappement turbulent (cf. chapitre 4). Il résulte de ce que certaines particules, de par leur masse, ne peuvent pas toujours suivre les tourbillons de certaines tailles. Un effet d'inertie conduit ces particules à une succession de passages d'un tourbillon au tourbillon voisin où elles rencontrent d'autres particules et s'y agglomèrent.

Le second mécanisme existe même en l'absence d'effet d'inertie et affecte des particules qui suivent les plus petits mouvements tourbillonnaires de l'écoulement turbulent. Il s'agit de l'agglomération produite par la diffusion turbulente. Considérons des tourbillons qui sont presque sphériques et qui se déforment en ellipsoïdes. Des particules aérosols, initialement à une certaine distance, se trouvent rapprochées et se rencontrent pour s'agglomérer. Inversement, à l'occasion des déformations tourbillonnaires, elles peuvent s'éloigner à l'intérieur d'un même tourbillon ou se trouver emportées par des tourbillons de tailles inférieures qui résultent de la fragmentation du tourbillon. Nous sommes donc en présence d'un mécanisme de diffusion que nous appellerons diffusion turbulente. Examinons quelles en sont les caractéristiques.

Les particules ont des tailles rarement au delà de quelques dizaines de microns tandis que l'échelle de Kolmogorov est souvent de plusieurs centaines de microns même pour des taux de dissipation de l'énergie importants. Considérons, au titre d'exemple, la couche atmosphérique au dessus du sol. Le taux de dissipation ε de l'énergie mécanique par unité de masse du fluide peut être estimé par : $\varepsilon \sim u^3/L$. Dans cette expression u est une valeur caractéristique des fluctuations de la vitesse, disons 10% de la vitesse moyenne locale, et L est l'échelle intégrale de la turbulence qui est associée à la taille des gros tourbillons soit quelques mètres. Nous en déduisons comme ordres de

Tableau 7.1 : Zones d'effets des diffusion brownienne et turbulente

d, μm	N_{sc}	y_B^+	y_T^+
$0,01$	$2,87\,10^2$	$1,02$	$4,7$
$0,1$	$2,22\,10^4$	$0,24$	$1,1$
1	$5,42\,10^5$	$0,08$	$0,4$

Nous constatons que pour des distances à la paroi supérieures à $y^+ = 5$; c'est-à-dire au-delà de la sous-couche visqueuse, seule la diffusion turbulente est importante.

Nous avons déjà examiné au chapitre 4.2 le mécanisme de dépôt dit par impaction turbulente de particules ayant acquis de – par la turbulence du gaz porteur – une vitesse d'échappement suffisante pour traverser toute la sous-couche et impacter la paroi. A contrario, nous considérons ici des particules dont la vitesse d'échappement est négligeable.

Le mécanisme du dépôt en régime turbulent consiste alors en deux étapes. Un apport, par le transport turbulent, de particules dans la sous-couche visqueuse, depuis le cœur turbulent à travers la zone de transition. Puis, le transfert de ces particules à la paroi par l'agitation brownienne du gaz. Ce mécanisme en deux étapes est résumé sur la figure 7.9 ci-contre. Le gradient de la concentration des particules dans le gaz n'est donc très important que dans la sous-couche visqueuse.

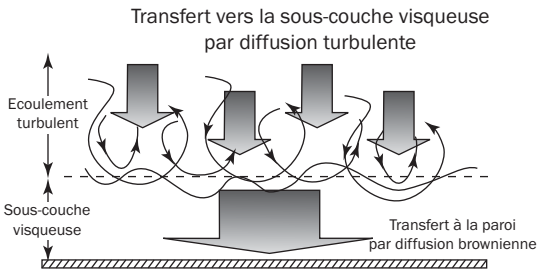


Figure 7.9 – Depot par diffusion, turbulente et brownienne

Cette circonstance nous permet de restreindre la recherche du profil de concentration à une zone au voisinage de la paroi, d'épaisseur faible devant le rayon de la conduite, en pratique la sous-couche visqueuse. On peut, de plus, supposer qu'au delà de cette couche le nombre de particules n'augmente plus, ayant atteint la valeur qu'il a dans le cœur turbulent.

L'équation (7.27) peut être transformée par le changement de variable $r = a - y$ en notant que l'effet de courbure de la paroi disparaît pour $y \ll a$. On obtient ainsi l'équation de transport dans la sous-couche visqueuse et ses conditions aux limites :

$$u_g(r)\frac{\partial \bar{\gamma}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left\{\left[D_T(y) + D_B(\upsilon)\right]\frac{\partial \bar{\gamma}}{\partial y}\right\},$$
$$\bar{\gamma}(\upsilon, x, y = 0) = 0, \qquad \bar{\gamma}(\upsilon, x, y = \infty) = \langle\bar{\gamma}\rangle(\upsilon, x) \equiv \widetilde{\gamma}(\upsilon, x).$$

La figure ci-après illustre comment la distribution en nombre est modifiée par la sédimentation. Nous y avons porté les graphes de la fonction $r_{\max} f_R^N(r,t)$ pour différentes valeurs du temps réduit

$$\frac{t}{\tau_{\max}} = 0,\ 0,5,\ 1,\ 1,5,\ 2,\ 3.$$

La population suspendue est telle que la fraction des particules de grands rayons diminue avec le temps. Ceci conduit à un accroissement des valeurs de la distribution pour les petits rayons et une diminution des valeurs relatives aux grands rayons. Cet effet, naturellement, s'accusant avec le temps pendant lequel le milieu aérosol est soumis à la sédimentation.

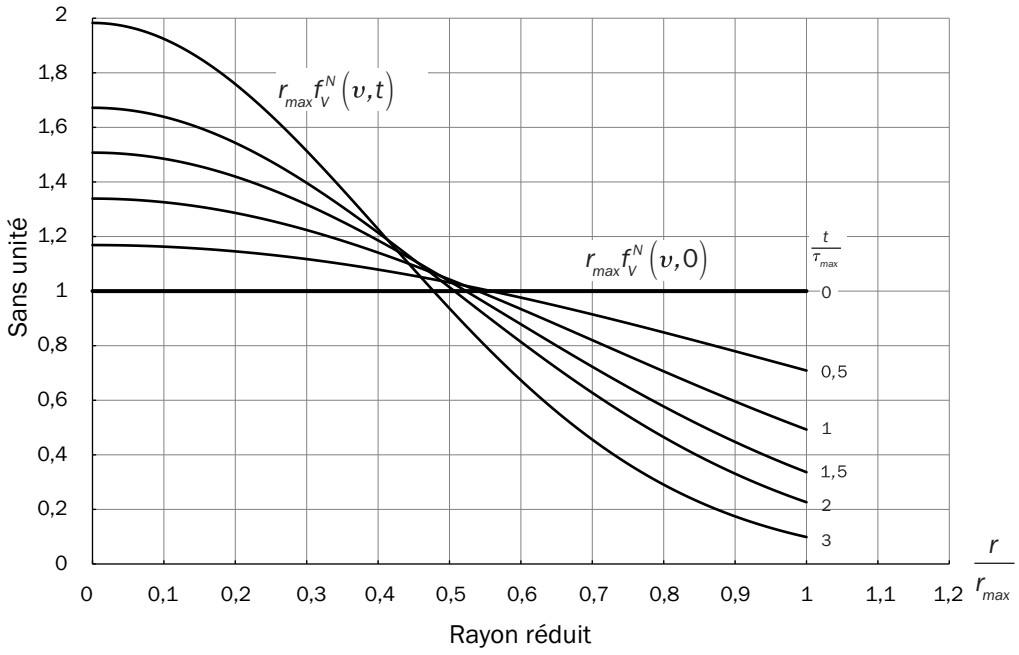


Figure 7.13 – Concentration dans une enceinte

7.5. Annexe

7.5.1. Ecoulement turbulent en conduite

Ayant maintenant vu comment se fait le transport dans un écoulement turbulent, nous allons examiner quantitativement le champ de vitesse dans une conduite cylindrique.

La vitesse débitante dans la conduite est définie à partir de la vitesse moyenne :

$$\pi a^2 U = \int_0^a 2\pi r u(r) dr.$$

On notera encore dans ce chapitre que les quantités construites à partir d'un filtre n'ont pas reçu d'appellation spécifique et l'on rencontrera dans ce chapitre le qualificatif filtré, pondéré, global ou macroscopique, voire collectif.

8.2. Aérosols et couverts végétaux

Abordons la modélisation du transport d'un milieu aérosol dans un couvert végétal c'est-à-dire une surface recouverte de prairies, de cultures ou de forêts, au dessus et au travers desquelles s'écoule de l'air chargé de particules solides ou liquides. En général, l'objectif de la modélisation est d'estimer la quantité des particules retenues sur les surfaces des végétaux. Cette question intéresse de nombreux domaines de recherches sur l'environnement, par exemple, les dépôts à l'occasion d'accidents industriels produisant des émissions particulaires importantes, ou le transfert d'espèces végétales dû à la dispersion des pollens entre parcelles cultivées, etc.

Le type de grandeur globale recherchée est typiquement la quantité de particules retenues dans un mètre cube d'un couvert forestier pendant une durée de quelques minutes.

Le caractère global ou collectif de la grandeur est manifeste puisqu'il résulte de centaines de feuilles présentes dans le volume considéré et de leurs mouvements sur la captation des particules suspendues dans l'écoulement d'air durant le laps de temps considéré. Les échelles de temps et de dimensions que nous utilisons pour définir le filtre pour le traitement du couvert végétal sont bien plus grandes que celles mises en œuvre aux chapitres 3.2.1 et 3.2.2. Pour le milieu gazeux l'échelle caractéristique était le centième de centimètre, pour le milieu aérosol il s'agissait du centimètre.



Figure 8.1 – Couvert végétal

Pour le couvert, selon sa nature, nous utilisons une échelle de quelques dizaines de centimètres, voire du mètre.

Le couvert dans lequel passe un milieu aérosol constitue un milieu poly-phasique. On y rencontre l'air qui transporte les particules aérosols, les phases particulaires définies par des classes de taille et des végétaux en mouvement. Nous désignons par milieu aérosol l'ensemble phase gazeuse et phases particulaires. A l'échelle, disons du mètre, qui est l'échelle caractéristique que nous utiliserons pour construire les quantités globales de ce milieu poly-phasique, le milieu aérosol – l'air et les phases particulaires – est considéré comme un milieu continu décrit par des quantités telles que masse volumique et vitesse pour l'air, densité de la concentration numérique et vitesse des classes de particules. Ces quantités ont été définies pour l'air au paragraphe 3.2.1 et en 3.2.2 pour les phases particulaires. Elles sont continues par morceaux et définies en tous les points où les végétaux ne se trouvent pas. Les végétaux – feuilles, branches, troncs – qu'ici, par commodité, nous assimilons à des feuilles, constituent