

# Chapitre 1

## *Interactions entre un solide et un fluide en mouvement*

Il existe de nombreuses techniques qui permettent de séparer les particules d'un milieu diphasique solide-fluide. Ces opérations peuvent se classer en fonction de la force motrice utilisée pour effectuer la séparation. En effet, elles peuvent se faire sous l'influence d'une force :

- de *pesanteur* lors de la décantation ou du tamisage en milieu humide. La filtration gravitaire est très peu utilisée industriellement mais correspond aussi à ce critère ;
- de *pression* lors d'une filtration sous vide ou sous pression ou les séparations membranaires ;
- *centrifuge* lors des opérations centrifuges de décantation (solide-liquide ou liquide-liquide), de filtration (ou essorage) par passage par un milieu filtrant ou de dépeussierage dans un cyclone.

L'écoulement d'un ou plusieurs fluides à travers un milieu poreux, fixe ou mobile, est souvent à l'origine de nombreux problèmes rencontrés par les ingénieurs (ou les pharmaciens) travaillant dans les industries chimiques, pharmaceutiques, cosmétiques ou agroalimentaires. Le mouvement relatif des espèces dans un milieu polyphasique diffère selon les vitesses de déplacement respectives des constituants sous ces divers états. En effet :

- le fluide peut traverser un lit de solide au repos et plusieurs cas peuvent être envisagés. Soit le fluide :
  - traverse, en mouvement descendant, un milieu filtrant dans les pores pratiqués par le solide par gravimétrie ou sous l'influence d'une différence de pression entre l'amont et l'aval (filtration gravimétrique) ;
  - traverse un milieu filtrant horizontalement sous l'influence de la force centrifuge (filtration centrifuge) ;
  - s'écoule dans un mouvement ascendant entre le lit de particules de façon à les mettre en mouvement (fluidisation) ;
- le fluide peut traverser une membrane poreuse ou dense (séparations membranaires) ;
- le solide et le fluide peuvent être en mouvement simultanément (dépeussierage, transport fluide) ;
- le solide peut se déplacer dans un fluide immobile. Selon la masse volumique apparente du solide,  $\rho_s$ , et du fluide,  $\rho_f$ , il est réalisé une décantation (si  $\rho_s > \rho_f$ ) et le solide se dépose au fond de l'appareil ou une flottation ou une séparation par liqueur

dense (si  $\rho_s < \rho_f$ ) et le solide surnage (cf. **H. Fauduet**, (2011), *Mécanique des fluides & des solides appliquée à la chimie, Tec & Doc, Paris*).

Il est donc primordial d'étudier la vitesse relative entre le solide et le fluide, ainsi que les interactions entre ces deux espèces. En effet, l'échelle et l'intensité des turbulences peuvent être d'importants paramètres du procédé contribuant au choix du matériel destiné à faire la séparation.

Mais avant d'étudier ces différents cas, il est nécessaire d'énoncer quelques définitions sur ces opérations et de préciser les principales grandeurs et propriétés intervenant dans un milieu diphasique. Il est notamment important d'établir les relations qui existent entre :

- le débit d'un fluide et les propriétés caractéristiques du milieu poreux. Ce milieu poreux peut être dans un état relatif fixe ou mobile mais doit conserver ses propriétés de porosité dans des conditions optimales pour que l'opération puisse être mise en œuvre dans des conditions satisfaisantes (décantation, fluidisation) ;
- les pertes de charge nécessaires pour assurer un débit attendu du fluide et la nature du milieu poreux dans un état relatif fixe (filtration, procédés membranaires).

## 1. Diverses opérations mécaniques de séparation d'un milieu solide-fluide

Il est important de définir préalablement les différents termes qui vont permettre d'identifier l'opération unitaire mettant en jeu un système diphasique afin d'éviter toute confusion.

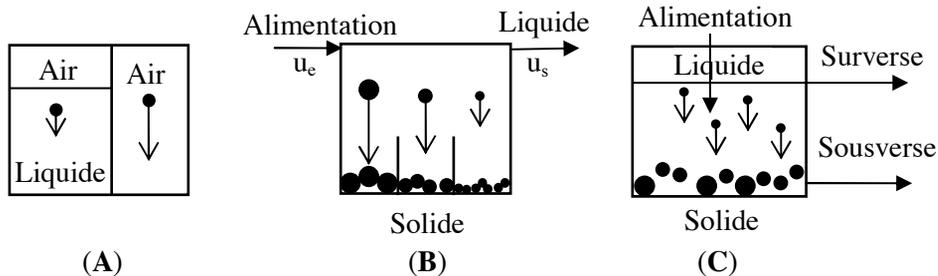
### 1.1. Sédimentation

La sédimentation (*sedimentation*) est un nom générique qui regroupe l'ensemble des opérations fondamentales de l'industrie chimique faisant intervenir le mouvement et le dépôt des particules solides dans les fluides (liquide et gaz) sous l'effet d'un champ de forces gravimétriques mais aussi centrifuges ou élastiques (cf. figure 1.1 A). Cette figure montre que la vitesse de dépôt du solide est beaucoup plus rapide dans l'air que dans le liquide en raison de la différence importante des masses volumiques de ces deux fluides. La sédimentation gravitaire est le moyen le plus simple et le plus économique, mais pas le plus rapide et le mieux adapté, pour éliminer les particules solides contenues dans un fluide. La littérature anglo-saxonne utilise souvent ce terme et ne fait pas de distinction entre le terme générique et l'opération de décantation.

### 1.2. Classification

La classification (*classification*) est la formation de dépôts solides à partir d'une suspension de particules solides dans un liquide ou un gaz pour obtenir plusieurs

catégories de solides de granulométries ou des natures différentes. Cette sédimentation peut se faire sous l'influence d'un champ de forces et peut donc être gravimétrique, centrifuge, magnétique ou électrique. Elle peut être réalisée pneumatiquement ou hydrauliquement. La figure 1.1 B montre un exemple de classification fluide de particules de même nature selon leur taille ( $u_e$  et  $u_s$  sont respectivement les vitesses d'entrée de la suspension et de sortie du liquide). Le tamisage peut être aussi considéré comme une opération de classification volumétrique directe qui est utilisée pour des particules présentant des tailles allant de 0,1 à quelques mm. Pour des particules plus fines, des classifications avec fluide auxiliaire sont obligatoirement utilisées pour améliorer l'efficacité et éviter le dégagement de poussières.



**Figure 1.1.** Opérations de séparation solide-fluide.

(A) Sédimentation de particules solides dans un fluide. (B) Classification des particules de même espèce selon leur grosseur. (C) Décantation des particules solides dans un liquide en mode continu.

### 1.3. Décantation

La décantation (*sedimentation, decantation*) est une opération de séparation par dépôt de particules solides dans un fluide au repos (suspension) ou de deux liquides non miscibles (émulsion) qui se séparent sous l'influence de la différence des masses volumiques (*cf.* figure 1.1 C). Si la décantation est réalisée sous l'influence de la force centrifuge, le terme de centrifugation est utilisé (*cf.* figure 1.2 C). L'opération peut aussi être précisée en utilisant un des termes suivants :

- épaissement (*thickening*) lorsque l'objectif est d'obtenir une boue concentrée à partir d'une suspension concentrée ;
- clarification (*clarification*) lorsque l'on veut obtenir un liquide clair à partir d'une suspension diluée.

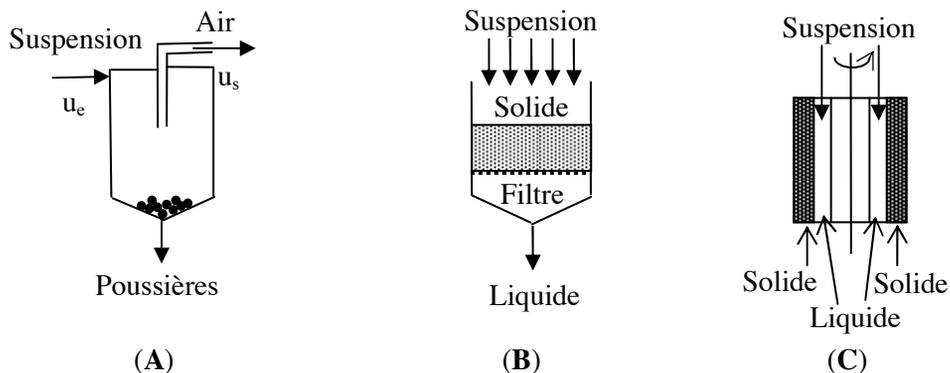
Lorsque le milieu diphasique à séparer est une émulsion, la décantation permet de séparer une phase dense d'une phase moins dense.

Ainsi, la décantation des particules solides ou liquides dans un fluide va dépendre de la différence entre la masse volumique du solide immergé (ou du liquide dense) et celle du fluide. On comprend aisément que la décantation d'un solide (de masse volumique et de grosseur déterminées) sera plus rapide dans un gaz que dans un liquide qui possède une masse volumique plus importante (de l'ordre de 1 000 fois).

De même, la décantation de liquides qui possèdent des masses volumiques peu différentes n'est pas toujours facile. La décantation gravimétrique ne doit être envisagée, en principe, que pour les suspensions diluées de fines particules solides dans un gaz. C'est le moyen le plus simple et le plus économique de les séparer.

#### 1.4. Dépoussiérage

L'air et les gaz véhiculés dans les installations industrielles sont rarement homogènes et contiennent souvent des particules solides ou liquides en suspension qui doivent être éliminées du gaz pour le purifier ou pour valoriser ces particules ou ces vésicules. Le dépoussiérage (*dust collection*) est la séparation des particules solides (poussières) en suspension dans un milieu gazeux sous l'influence de leur poids (*cf.* figure 1.2 A) ou d'une force centrifuge ou électrique. Le dévésiculage (*devesiculation*) concerne la séparation de globules liquides (vésicules) en suspension dans un milieu gazeux. Le dépoussiérage est au milieu gazeux ce que la décantation est au milieu liquide et peut aussi être réalisé par des techniques différentes. En effet, la séparation des particules solides et des vésicules de liquide peut se faire par dépôt en chute libre, par chocs sur une paroi, par la force centrifuge, par lavage à l'eau, par filtration à travers une membrane adaptée ou par intervention du courant électrique.



**Figure 1.2.** Opérations de séparation solide-fluide.

(A) Dépoussiérage d'un gaz dans un cyclone. (B) Filtration gravimétrique d'une suspension. (C) Décantation centrifuge d'une suspension solide-liquide.

#### 1.5. Filtration

La filtration (*filtration*) est une opération de séparation de particules solides (phase dispersée) en suspension dans une phase continue, liquide ou gazeuse, par passage à travers un milieu filtrant chargé d'arrêter les particules solides (*cf.* figure 1.2 B). Cette technique peut être gravimétrique ou réalisée sous pression, sous vide ou en utilisant la force centrifuge. Elle consiste à mettre la suspension (ou préfilt) dans un filtre constitué par un milieu filtrant (membrane ou plaque poreuse) capable de retenir physiquement les particules solides. Le liquide purifié récupéré après filtration est appelé le filtrat (eaux-mères) et l'ensemble des particules solides déposées est appelé

le gâteau (ou tourteau) qui constitue lui-même un nouveau milieu de filtration. Pour que la filtration se déroule à une vitesse correcte, il est nécessaire de l'activer en effectuant une surpression au niveau du gâteau ou d'une dépression au niveau du filtrat.

La filtration dépend d'autres lois puisqu'elle est réalisée en faisant passer une suspension solide-fluide à travers un support (filtration sur support, *cake filtration*), jouant le rôle de tamis. Celui-ci va retenir les particules dont la grosseur est supérieure à celle des orifices du support filtrant qui laissera passer le fluide (et aussi les particules dont la grosseur est inférieure à celle des pores). La membrane poreuse est parfois remplacée par un lit de particules (filtration en masse, *deep filtration*) qui va retenir le solide et laisser passer le liquide.

## 1.6. Centrifugation

La centrifugation (*centrifugation*) est une opération qui consiste à utiliser la force centrifuge pour accélérer la séparation de particules solides dans un liquide ou de deux liquides non miscibles. Cette opération peut se réaliser sans support filtrant (décantation centrifuge) (*cf.* figure 1.2 C) ou avec support filtrant (filtration centrifuge). Elle permet d'augmenter la vitesse de séparation par rapport à la décantation ou la filtration gravimétrique. Cette opération est utilisée de préférence aux techniques gravitaires lorsque certaines particules solides ne sédimentent pas facilement dans un liquide parce que leur masse, n'est pas assez importante. La décantation centrifuge (solide-liquide ou liquide-liquide) est basée sur des différences de masses volumiques des constituants soumis au champ centrifuge. Les particules les plus lourdes s'accumulent sur la paroi du bol alors que les plus légères restent au centre de la centrifugeuse. Dans la filtration centrifuge, la séparation est obtenue par passage de la phase liquide à travers un *medium* de filtration qui permet de retenir le solide. La centrifugation répond aux mêmes lois que la décantation, à la différence près que l'accélération de la gravité ( $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) est remplacée par l'accélération centrifuge ( $\gamma = \omega^2 r$ ). L'importance de l'accélération centrifuge dépend donc de la vitesse de rotation de la centrifugeuse,  $\omega$ , et du rayon du bol,  $r$ . La centrifugation est plus compliquée et demande d'utiliser un appareillage plus sophistiqué par rapport aux procédés gravitationnels, mais est plus rapide.

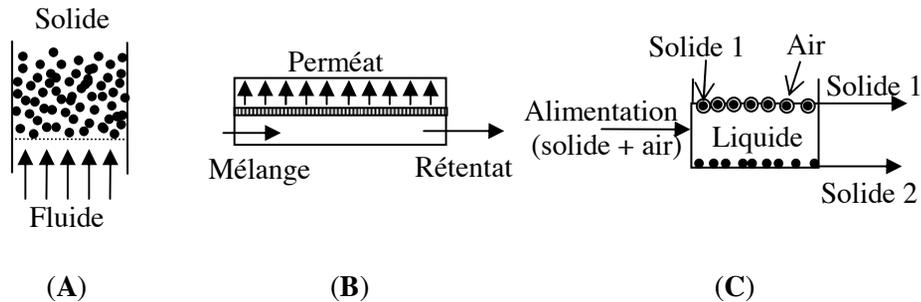
## 1.7. Fluidisation

La fluidisation (*fluidization*) est l'opération fondamentale qui consiste à la fois à disperser et à maintenir en suspension les fines particules solides dans un fluide en mouvement (*cf.* figure 1.3 A). Cette opération est réalisée en faisant passer le gaz (ou un liquide), de bas en haut, à travers un lit de particules supportées par une grille. Lorsque le débit du fluide est augmenté, la perte de charge augmente. Cela se traduit par une poussée exercée sur l'ensemble des particules constituant le lit. Lorsque la poussée devient suffisante, elle équilibre la pesanteur des particules. Si le débit est encore augmenté, les particules se soulèvent et peuvent même être entraînées si la vitesse est trop importante. Ce système diphasique solide-fluide possède alors les propriétés d'un fluide, d'où le nom de lit fluidisé. La fluidisation peut être considérée

comme une opération intermédiaire entre le mouvement d'un fluide à travers un lit de particules au repos et le transport des solides par un fluide. C'est aussi l'inverse de la chute freinée des particules dans un fluide.

## 1.8. Séparations membranaires

Les techniques séparatives à membrane (*membrane separation technologies*) sont des procédés de séparation physique qui ont pour but de purifier, concentrer ou fractionner des espèces dissoutes ou en suspension dans un solvant par passage au travers d'une membrane. Dans la plupart des cas, la solution à traiter circule tangentielle-ment à la membrane et la solution concentrée, composée des molécules ou des particules retenues par la membrane, est appelée le rétentat ou le concentrat (*retentate*). Le solvant et les molécules non retenues passent perpendiculairement à travers la membrane et l'ensemble est appelé le perméat (*permeate*) (cf. figure 1.3 B). Dans le cas de la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse, la force motrice opératoire est un gradient de pression. Les membranes utilisées sont dites permsélectives ou semi-perméables, et ont une porosité qui diminue lorsque l'on passe de la microfiltration à la nanofiltration. Les membranes sont dites denses en osmose inverse.



**Figure 1.3.** Opérations de séparation solide-fluide.

(A) Fluidisation de particules solides. (B) Séparation membranaire. (C) Flottation (séparation de particules de natures différentes).

## 1.9. Flottation

La flottation (*flotation*) est l'opération fondamentale qui permet de séparer et concentrer des particules solides d'espèces différentes en suspension dans un fluide (généralement l'eau). La séparation se fait par diminution physicochimique de la densité apparente de certaines espèces qui leur permet de flotter alors que les autres sédimentent (cf. figure 1.3 C). La modification de la masse volumique du solide se fait par accrochage physicochimique de bulles d'air sur la surface du solide permettant au système solide-gaz d'être moins dense que le liquide.

Cette séparation est basée sur le fait que certains corps sont mouillés par l'eau (ou les solutions aqueuses) et d'autres pas. Elle est obtenue en mettant les particules

solides finement divisées dans un milieu aqueux contenant un collecteur (agent qui facilite l'accrochage des bulles d'air sur le solide). Les particules solides sont isolées du milieu liquide par une pellicule gazeuse qui contribue à diminuer la masse volumique apparente. Cette opération est surtout utilisée dans la séparation d'un minerai de sa gangue et dans le traitement des eaux résiduaires. Pour effectuer une flottation différentielle, il doit être ajouté des activateurs ou des dépresseurs qui vont modifier les propriétés de surface du solide et favoriser la séparation d'espèces différentes. Cette opération a été décrite dans **H. Fauduet**, (2011), *Mécanique des fluides & des solides appliquée à la chimie, Tec & Doc*, Paris et ne sera pas reprise dans ce manuel.

## 2. Grandeurs utilisées dans les systèmes diphasiques

Les composés impliqués dans les systèmes diphasiques peuvent présenter individuellement des caractéristiques mécaniques très différentes et leur mise en mouvement est plus ou moins facile en raison de leurs masses volumiques, formes et viscosités respectives. De plus, l'association entre les diverses espèces induit une modification de comportement qu'il est nécessaire d'envisager avant d'étudier les opérations de séparation. Par ailleurs, il est important de définir aussi les grandeurs caractéristiques du déplacement d'une phase par rapport à l'autre. Certaines propriétés ont été détaillées dans un précédent manuel (cf. **H. Fauduet**, (2011), *Mécanique des fluides & des solides appliquée à la chimie, Tec & Doc*) et seront uniquement résumées dans ce chapitre.

### 2.1. Grandeurs relatives à la nature des constituants

#### 2.1.1. Porosité

La porosité (*porosity*) d'un lit de particules solides (ou d'un gâteau) représente le pourcentage de vide constitué par les cavités situées à l'intérieur des grains et entre les particules du lit solide. La fraction de vide entre les particules est appelée la porosité externe (ou interparticulaire). Elle représente la fraction de volume de vide de la couche de solide utilisable pour l'écoulement du fluide. De plus, la matière solide contenue dans un grain, n'occupe pas toujours intégralement l'ensemble du volume délimité par l'enveloppe particulaire. En effet, ces solides possèdent souvent un réseau de pores à l'intérieur de chaque grain (porosité interne ou intraparticulaire). La porosité est une grandeur adimensionnelle.

Les porosités interviennent chaque fois qu'un solide est associé à un fluide et, notamment, dans les opérations dans lesquelles il y a passage de fluide à travers un lit de particules ou d'éléments poreux (filtration, distillation, fluidisation, absorption, etc.) ou lorsqu'il y a diffusion à l'intérieur des grains (extraction solide-liquide, adsorption). Dans les premières opérations, c'est la porosité externe qui intervient alors que dans les secondes c'est la porosité interne qui est importante.

### 2.1.1.1. Porosité interne

La porosité interne d'un grain ou porosité intraparticulaire,  $\chi$ , (*particle porosity*) est définie comme le rapport entre le volume gazeux renfermé par le grain et son volume géométrique apparent,  $V_g$ . Si le volume réellement occupé par le solide est symbolisé par  $V_s$ , la porosité interne est définie par :

$$\chi = \frac{V_g - V_s}{V_g} = 1 - \frac{V_s}{V_g} \quad (1.1)$$

Elle dépend de la nature même du matériau mais aussi des traitements mécaniques, thermiques ou chimiques qu'il a subis préalablement. La porosité intraparticulaire se subdivise en porosité ouverte (accessible aux fluides) et en porosité fermée (inaccessible à tous les fluides), la porosité totale étant la somme de ces deux porosités. Selon la classification de l'IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), les pores sont classés en trois catégories. Les :

- micropores dont les tailles sont inférieures à 2 nm ;
- mésopores qui ont des tailles comprises entre 2 et 50 nm ;
- macropores dont les tailles sont supérieures à 50 nm.

### 2.1.1.2. Porosité externe

La porosité externe ou interparticulaire,  $\varepsilon$ , (*bed porosity*) se rapporte à une couche constituée de l'ensemble des particules entassées d'une certaine façon. Elle représente le taux de vide moyen entre les grains de la couche de volume  $V_c$ . Elle se définit comme le rapport du volume occupé par les vides sur le volume total de la couche, c'est-à-dire le volume de phase gazeuse mobile occupant les interstices laissés par les  $n$  particules du lit,  $V_f$ , et le volume total de la couche de solide,  $V_c$ , appelé aussi volume apparent,  $V_a$ . La porosité externe peut donc être symbolisée par les expressions suivantes.

$$\varepsilon = \frac{V_c - n V_g}{V_c} = \frac{V_a - n V_g}{V_a} = \frac{V_f}{V_a} \quad (1.2)$$

Elle dépend de la forme des particules, de leur distribution de tailles et de la façon dont la couche a été constituée (vrac, tassements, vibrations, *etc.*). Elle dépend aussi de l'effet de paroi (effet de frottement supplémentaire contre la paroi avec alignement des particules le long de la paroi). Celui-ci est d'autant plus important que l'on se rapproche de la paroi. La porosité peut être déterminée par la mesure des masses volumiques vraie et apparente (*cf.* équation 1.7) mais est difficile à déterminer avec précision avec cette méthode. On préfère utiliser les méthodes porosimétriques au mercure ou au gaz. La porosité externe de quelques matériaux usuels est indiquée dans le tableau 1.1.