

Chapitre V : Filtration

V.1. Introduction

C'est une opération unitaire physique très utilisés en génie chimique. Elle est une opération de séparation, le but de la filtration est la séparation d'une phase continue et d'une phase dispersée initialement mélangée ; ce mélange est désigné sous le terme générale de suspension (ou préfiltre).

La filtration est effectuée pour des suspensions ou des solutions chargées de substances minérales ou organiques pour les séparées en deux phases grâce à un lit poreux.

On peut utiliser des milieux poreux granuleux ou fibreux.

On peut effectuer la séparation des solides des liquides, ou les solides des gaz.

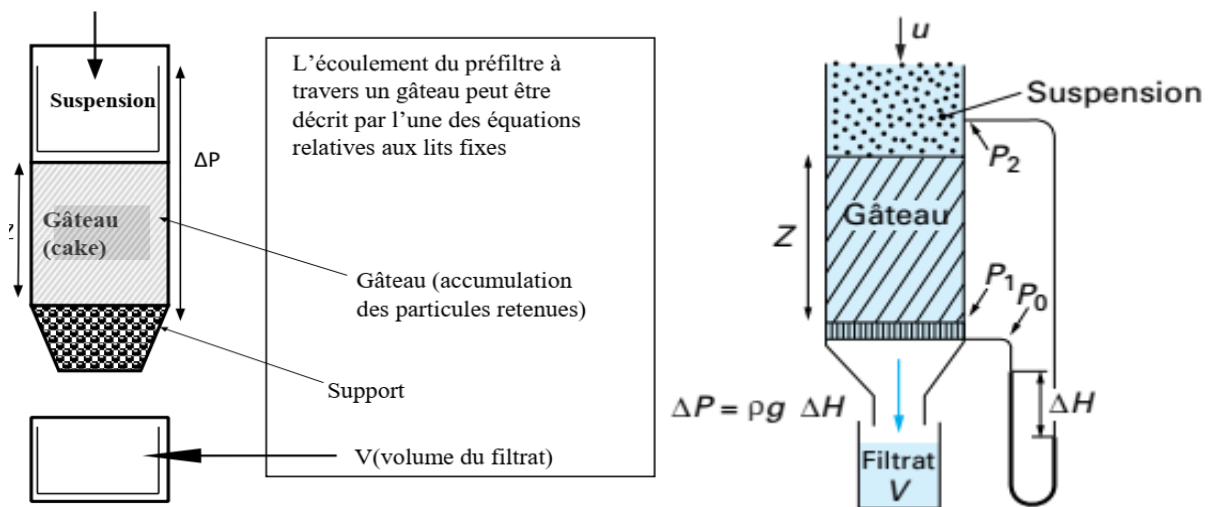


Figure V.1 : Filtration des liquides

V.2. Classification

Comme on l'a vu, la suspension à filtrer est dirigée vers un support filtrant que le liquide seul traverse sous l'influence d'une différence de pression. Une méthode pour classer les filtres se base sur la manière de réaliser ce gradient de pression. On a :

- la filtration sous pression, lorsque la pression est appliquée sur la face amont de la surface filtrante, l'autre face restant à la pression atmosphérique ;
- la filtration sous vide, si l'on crée une dépression sur la face aval du milieu poreux, l'autre face restant à la pression atmosphérique ;
- la filtration par gravité, quand la suspension s'écoule due à la pression hydrostatique ; cette méthode est généralement utilisée lorsqu'il s'agit de traiter d'importantes quantités de suspension contenant peu de particules solides, par exemple pour la filtration de l'eau.

D'autres critères de classification de la filtration sont :

- le mode d'opération : en continu, semi-continu ou en discontinu ;
- la technique de filtration : sur gâteau, à courants croisés ou sur membrane.

La séparation peut être effectuée de deux façons différentes.

■ Filtration dans la masse

La suspension s'écoule à travers une masse poreuse (lit de particules consolidé ou non, papier, feutre...) à l'intérieur de laquelle les particules ou globules de la phase dispersée sont plus ou moins retenus, entraînant un colmatage progressif de la masse filtrante. La phase continue sortant de la masse poreuse, appelée filtrat pour les liquides, sera soit parfaitement pure, soit appauvrie en phase dispersée.

■ Filtration sur support

On amène la suspension au-dessus d'un support (toile, feutre, membrane, grille...) sur lequel les particules vont se déposer sous la forme d'un gâteau d'épaisseur croissante. Le filtrat est recueilli sous le support.

Matériel

Sous vide, Büchner : dispositif de laboratoire monté sur fiole à vide



Figure V.2 : Filtration sous vide par Büchner.

Le filtre presse

Ils sont constitués par des éléments verticaux alternés (plateau - cadre), l'ensemble étant maintenu par des rails et serré entre deux plaques.

Les éléments de filtre (plateaux et cadres) sont serrés avec une presse. Les toiles fait filtrantes séparent les plateaux et les cadres. Le gâteau se dépose entre les toiles ; on peut alors procéder au lavage du gâteau en faisant circuler le liquide de lavage dans le filtre.



Figure V.3 : Filtration par filtre presse.

1. Le filtre rotatif à tambour

Principe : un tambour horizontal, recouvert (ou non) de media filtrant et divisé en différents secteurs, plonge dans une auge ou est alimentée la suspension à filtrer. Le tambour est animé d'un mouvement de rotation régulier. Chaque secteur du tambour est relié par un distributeur tournant, soit à une collecte de filtrat sous vide, soit à une collecte d'eau de lavage, soit à de l'air comprimé

Un racleur assure l'évacuation du gâteau en continu vers une bande transporteuse.

Certains tambours supportent directement le média filtrant. D'autres sont équipés d'une toile filtrante avec renvois par rouleaux pour la tension et système de lavage. D'autres enfin sont des filtres à pré-couche.



Figure V.4 : Le filtre rotatif à tambour.

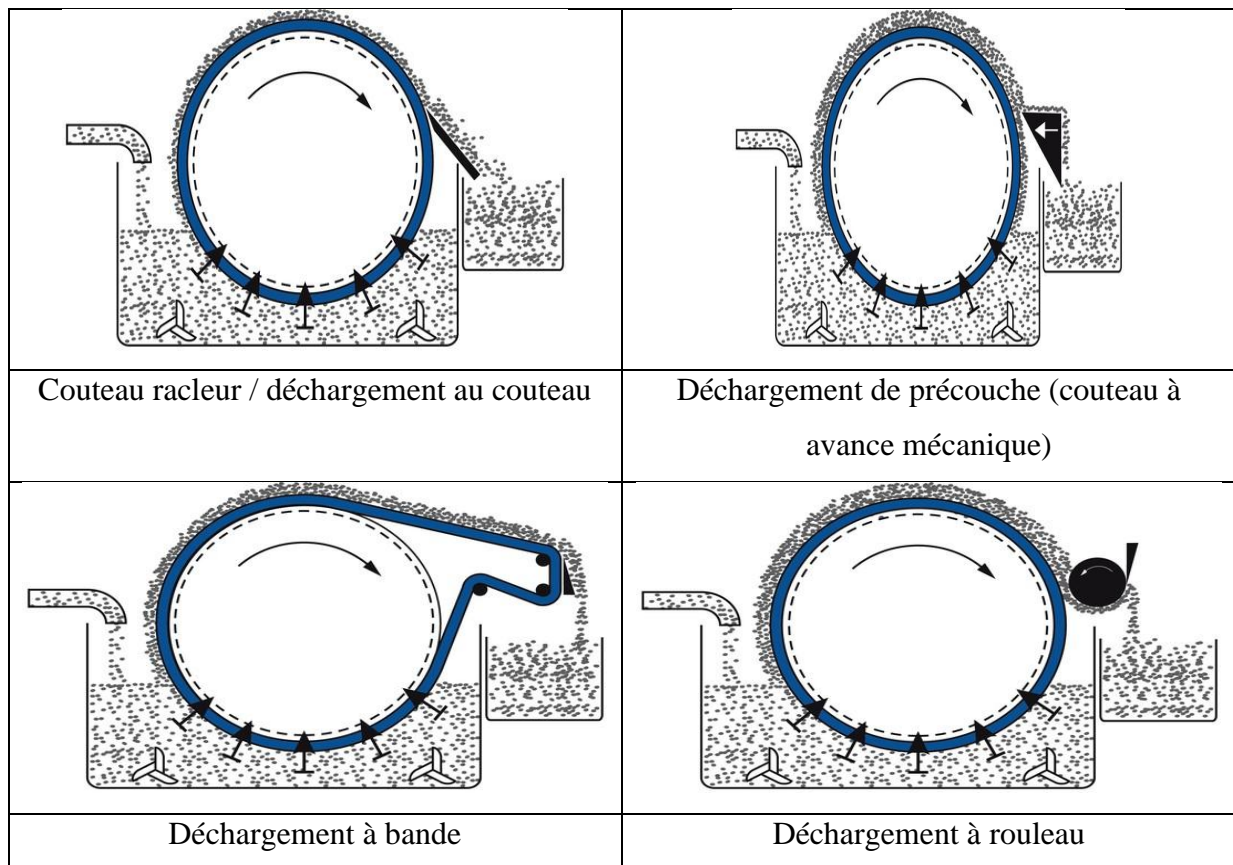


Figure V.5 : Les différents types de déchargement de la matière en suspension.

V.3. La théorie de la filtration par gâteau

V.3.1. Cas des gâteaux incompressibles

On considère l'expérience de filtration d'une suspension schématisée sur la figure 1.

À l'instant t , l'épaisseur du gâteau est Z et le volume du filtrat recueilli est V . Une pression ΔP est appliquée au-dessus de la suspension.

Le problème posé par la filtration consiste à déterminer les variations du volume de filtrat V , de la perte de charge ΔP et de la hauteur du gâteau Z en fonction du temps t , compte tenu des propriétés du préfiltre et du gâteau.

Bilan de matière

Liste des paramètres utiles

Le bilan repose sur les caractéristiques de la suspension, du gâteau et du filtrat. On peut en dresser la liste suivante :

- a. Suspension :
 - teneur de la suspensions, exprimée en kg de solide par kg de suspension.
 - masse volumique de la suspension ρ_a exprimée en kg.m^{-3} .
- b. Liquide :
 - masse volumique du fluide ρ_f exprimée en kg.m^{-3} .

- viscosité dynamique μ [Pa.s].
- c. Solide :
 - masse volumique ρ_s exprimée en kg.m^{-3} .
 - dimension des particules, granulométrie. Ces informations ne sont pas utiles au calcul du filtre mais servent au choix du support filtrant et permettent d'interpréter le fonctionnement du filtre.
- d. Gâteau :
 - masse totale du gâteau M_t [kg].
 - masse de solide M [kg].
 - masse de liquide M_l [kg].
 - porosité du gâteau ε [—].
 - Siccité S [—].
 - rapport d'humidité m [—].
 - épaisseur du gâteau Z [m].
 - surface du gâteau Ω [m^2]. Cette surface correspond à la surface filtrante.

Siccité :

La siccité est le rapport de la masse de solide dans le gâteau à la masse du gâteau humide.

Rapport d'humidité :

Le rapport d'humidité est le rapport de la masse du gâteau humide à la masse du solide dans le gâteau. C'est l'inverse de la siccité.

Problème :

Déterminer les variations de V , ΔP et Z en fonction du temps. Les trois équations :

$$V = f(t)$$

$$\Delta P = f(t)$$

$$Z = f(t)$$

Il faut trouver les relations entre

- La pression
- Les propriétés du préfiltre et du gâteau ;
- L'augmentation d'épaisseur du gâteau dZ pendant dt ;
- L'augmentation du volume du filtrat dV pendant dt .

Appelons le débit volumique instantané de filtrat et posons

$$q_v = \frac{dV}{dt} \quad V : \text{volume du filtrat}$$

$$U = \frac{q_v}{\Omega} = \frac{1}{\Omega} \frac{dV}{dt}$$

Ω Étant la surface filtrante. Supposons par ailleurs que le gâteau est homogène et incompressible et que le régime d'écoulement à travers le gâteau est laminaire.

Chaque unité de volume du filtrat, va assurer un dépôt d'une certaine masse de particules qui forme un certain volume du cake ; ce volume est exprimé par :

$$\text{Volume du cake par unité de volume du filtrat} = \frac{Z \Omega}{V}$$

Z : épaisseur du cake

Ω : section droite

Z. Ω = volume du cake

V : volume du filtrat

On observe que la perte de charge ΔP est proportionnelle au débit instantané et à la viscosité du fluide sur la longueur Z (loi de Darcy) :

$$-\frac{\Delta P}{Z} = \frac{\mu}{B} U$$

B étant la perméabilité dont la dimension est le carré d'une longueur (L^2).

Pour simplifier l'écriture, l'équation sera écrite $\Delta P = R \mu U$

Avec la perméabilité $B=Z/R$.

R (m^{-1}) : somme des résistances du support R_s et du gâteau en cours de formation R_G .

$$R = R_s + R_G$$

Résistance spécifique du gâteau α :

Ecrivons que la résistance à l'écoulement par unité de surface de gâteau est proportionnelle à la masse de matériau séché déposé M par unité de surface filtrante Ω :

$$R_G = \alpha \frac{M}{\Omega}$$

Avec $M = \Omega Z (1-\varepsilon) \rho_s$: masse de gâteau séché

ρ_s masse volumique du gâteau, donc masse de matériau séché déposé par unité de surface filtrante.

Expression de α en fonction de la perméabilité B

La comparaison avec la loi de Darcy où intervient la perméabilité B du gâteau donne :

$$R_G = \alpha \frac{M}{\Omega} \rightarrow \alpha = \frac{\Omega R_G}{M} = \frac{\Omega R_G}{\Omega Z (1-\varepsilon) \rho_s} = \frac{R_G}{Z (1-\varepsilon) \rho_s} = \frac{1}{B (1-\varepsilon) \rho_s}$$

$$\alpha = \frac{1}{B (1-\varepsilon) \rho_s}$$

Relation entre W et s

On suppose que la masse M du gâteau est à chaque instant, proportionnelle au volume V de filtrat recueilli :

$$M = W V$$

W : masse des particules de gâteau séché par unité de volume de filtrat (facteur de proportionnalité)

La filtration d'une masse S de suspension donne :

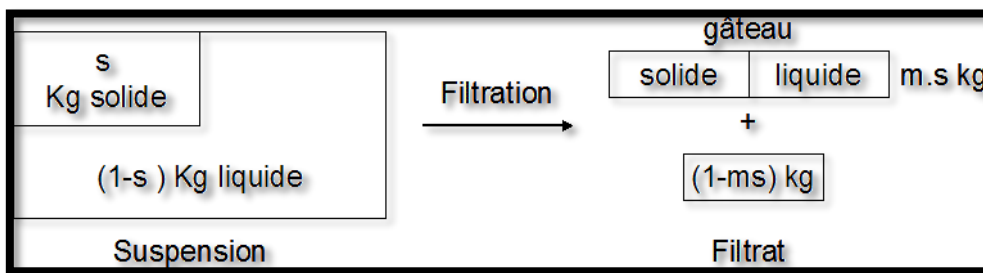
- un gâteau séché de masse $M = s S$;
- un gâteau humide de masse $M' = m s S$;
- une masse de filtrat $\rho_f V = (1 - m s) S$.

Avec

s : teneur en particules de la suspension, ρ_f : masse volumique du filtrat,

m rapport d'humidité : $\frac{\text{masse de gâteau humide}}{\text{masse de gâteau séché}}$

$$\text{d'où } M = W V \Rightarrow W = \frac{M}{V} = \frac{s S}{\frac{S (1 - m s)}{\rho_f}} \Rightarrow W = \frac{s \rho_f}{(1 - m s)}$$



Exemple : 1 kg de suspension donne par séparation s kg de solide dans le gâteau, ms kg de gâteau humide et $(1 - ms)$ kg de filtrat.

Relation entre le rapport d'humidité m et la porosité ε

Avec la relation entre le rapport d'humidité m et la porosité ε :

$$m = \frac{\text{masse de gâteau humide}}{\text{masse de gâteau séché}} = \frac{V_G (1 - \varepsilon) \rho_s + V_G \varepsilon \rho_f}{V_G (1 - \varepsilon) \rho_s} = 1 + \frac{\varepsilon \rho_f}{(1 - \varepsilon) \rho_s}$$

$$m = 1 + \frac{\varepsilon \rho_f}{(1 - \varepsilon) \rho_s}$$

Relation entre l'épaisseur Z du gâteau et le volume de filtrat V

$$M = W V = \Omega Z (1 - \varepsilon) \rho_s$$

$$Z = \frac{W V}{\Omega (1-\varepsilon) \rho_s}$$

L'expression de la vitesse filtration

$$\Delta P = R \mu U \quad \Delta P = (R_s + R_G) \mu U$$

$$\text{avec } R = R_s + R_G \quad \text{avec } R_G = \alpha \frac{M}{\Omega}$$

$$U = \frac{1}{\Omega} \frac{dV}{dt}$$

$$\Delta P = \left(R_s + \alpha \frac{M}{\Omega} \right) \mu U = \left(R_s + \alpha \frac{M}{\Omega} \right) \mu \frac{1}{\Omega} \frac{dV}{dt}$$

$$\Delta P = \left(R_s + \alpha \frac{M}{\Omega} \right) \mu \frac{1}{\Omega} \frac{dV}{dt} \quad \text{C'est une équation différentielle en } V$$

• Filtration à débit constant

$$\frac{dV}{dt} = q_v = \Omega U$$

$$dV = \Omega U dt \quad \int_0^V dV = \int_0^t \Omega U dt \Rightarrow V = \Omega U t$$

$$\Delta P = \left(R_s + \alpha \frac{M}{\Omega} \right) \mu \frac{1}{\Omega} \frac{dV}{dt} = \left(R_s + \alpha \frac{W V}{\Omega} \right) \mu \frac{1}{\Omega} \frac{dV}{dt} = R_s \mu \frac{1}{\Omega} \frac{dV}{dt} + \alpha \mu \frac{W V}{\Omega^2} \frac{dV}{dt}$$

$$\Delta P = R_s \mu U + \alpha \mu W U^2 t$$

• Filtration à pression constante

Si la filtration est à pression constante (sous vide ou sous pression), alors $\Delta P = Cte$ et l'équation précédente devient

$$dt = \left(R_s + \alpha \frac{M}{\Omega} \right) \mu \frac{1}{\Omega \Delta P} dV = \left(R_s + \alpha \frac{W V}{\Omega} \right) \mu \frac{1}{\Omega \Delta P} dV = R_s \mu \frac{1}{\Omega \Delta P} dV + \alpha \mu \frac{W V}{\Omega^2} \frac{dV}{\Delta P}$$

En supposant à $t=0$ et $V=0$

$$t = R_s \frac{\mu}{\Omega \Delta P} V + \alpha W \frac{\mu}{2 \Omega^2 \Delta P} V^2$$

En divisant cette équation sur V .

$$\frac{t}{V} = R_s \frac{\mu}{\Omega \Delta P} + \alpha W \frac{\mu}{2 \Omega^2 \Delta P} V \quad \text{Sous la forme} \quad \frac{t}{V} = A + B V$$

On trace t/V en fonction de V , puis on obtient une droite (la pente, B et l'ordonné à l'origine, A).

$$A = R_s \frac{\mu}{\Omega \Delta P} \quad \text{et} \quad B = \alpha W \frac{\mu}{2 \Omega^2 \Delta P}$$

Les constantes A et B sont déterminées expérimentalement dans une installation de laboratoire.

Résistance du support R_s et résistance spécifique du gâteau (α). Équation de Ruth

L'utilité de l'équation de Ruth réside dans la comparaison de la résistance spécifique du gâteau avec la résistance du support, pour savoir s'il est possible de négliger cette dernière.

On définit :

$$R_s = \alpha \frac{W V_f}{\Omega}$$

Avec V_f : volume fictif de filtrat qui correspondrait à la formation d'un gâteau de même résistance que la membrane. Le temps nécessaire à cette formation est t_f .

L'équation différentielle devient alors :

$$\Delta P = \left(\alpha \frac{W V_f}{\Omega} + \alpha \frac{W V}{\Omega} \right) \mu \frac{1}{\Omega} \frac{dV}{dt} \Rightarrow \Delta P = \frac{\alpha W \mu}{\Omega^2} (V_f + V) \frac{dV}{dt} \quad \text{qui devient, par intégration}$$

à pression constante.

$$t = a (V_f + V)^2 + \text{Cste}$$

$$t = 0, V = 0 \Rightarrow \text{Cste} = a V_f^2 = t_f$$

$$(t + t_f) = a (V_f + V)^2$$

$$\text{Ou bien } (V_f + V)^2 = K (t + t_f)$$

Avec

$$K = \frac{1}{a}$$

$$K = \frac{2 \Omega^2 \Delta P}{\mu \alpha W}$$

$$V_f = \frac{R_s \Omega}{\alpha W} \quad \text{et} \quad t_f = \frac{V_f^2}{K} = \frac{R_s^2 \mu}{2 \alpha W \Delta P}$$

Application du modèle de Kozeny-Carman

Comme de façon générale, les particules qui forment un gâteau sont très petites, l'écoulement du liquide pourra être considéré le régime laminaire et l'équation de Kozeny-Carman sera utilisée pour décrire cet écoulement comme suit :

$$\frac{\Delta P}{Z} = h_K \mu a_g^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} U = \frac{\mu}{B} U$$

$$B = \frac{\varepsilon^3}{h_K a_g^2 (1-\varepsilon)^2}$$

Ou h_K est la constante de **Kozeny**, prise égale 4.5 dans le cas poreux de porosité moyenne formés de grains isométrique, et a_g la surface spécifique des grains.

D'autre part la résistance spécifique α d'un gâteau d'épaisseur Z est liée à sa porosité ε et à sa perméabilité B par la relation :

$$\alpha = \frac{1}{B(1-\varepsilon)\rho_s}$$

La comparaison de deux équations (α et B), montre que :

$$\alpha = \frac{h_K a_g^2 (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \rho_s}$$

La résistance spécifique (α) est une fonction décroissante de la porosité (ε).

V.3.2. Cas des gâteaux compressibles

Les résultats précédents supposent une incompressibilité totale du gâteau. Dans la pratique, il en est rarement ainsi :

- Le gâteau déposé se comprime tout au long de la filtration, mais pour une filtration à pression constante, les résultats exposés précédemment restent généralement valables à condition de considérer α comme une valeur moyenne. Il faudra cependant être prudent dans l'extrapolation des résultats, un tassement prolongé peut provoquer une brusque augmentation de résistance.
- À chaque pression correspondra une résistance spécifique moyenne. Il sera souvent possible d'établir une loi de variation de α en fonction de la pression.

$$\alpha = \alpha_0 (\Delta P)^n$$

n est le coefficient de compressibilité et peut varier de $n = 0$ pour les gâteaux incompressibles à $n=1$ ou plus pour les gâteaux très compressibles (filtration de suspensions floculées).

Plus n est grand et moins une augmentation de pression est intéressante du point de vue vitesse de production de filtrat. Par contre, en fin de filtration, la siccité du gâteau est fortement augmentée.