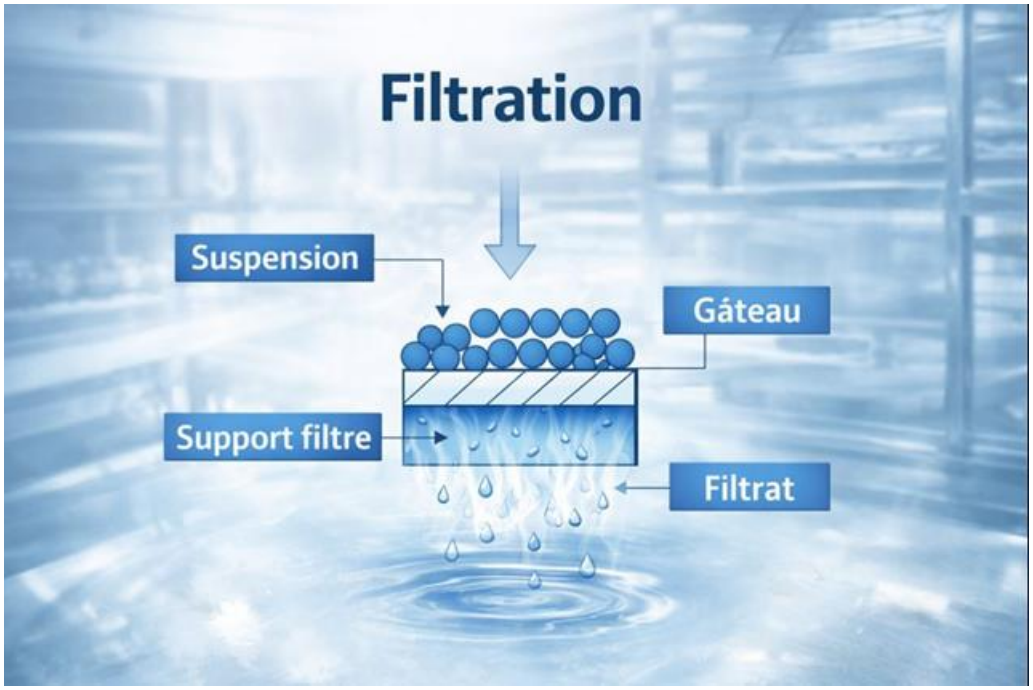
CHAPITRE IV :

Filtration



Chapitre IV : Filtration

IV.1 Introduction :

La filtration est une opération de séparation des constituants d'un mélange liquide –solide (c.-à-d. d'une suspension de particules solides dans un liquide ou un gaz) par passage à travers un milieu filtrant appelé aussi média filtrant (corps poreux), qui retient généralement par action physique les solides et se laisse traverser par le liquide. On récupère après filtration :

- Soit le liquide (purification et récupération d'eaux usées),
- Soit le solide (après une cristallisation),
- Soit le liquide et le solide (opération de recristallisation : purification d'un solide).
- La suspension est parfois appelée préfiltre ou préfiltrât
- Le liquide clarifié (clair) ou eau mère est le filtrat
- La couche de particules solides retenues sur le milieu filtrant (ou déposé sur le filtre) est nommé gâteau ou tourteau.
- Le milieu filtrant (ou surface filtrante) est constitué par des particules solides déposées sur un support qui peut être, selon les cas, des feuilles de papier spécial, des tissus, des toiles métalliques, du sable, des gravières.
- La force motrice de la filtration est en général une différence de pression amont-aval (ΔP), égale à la perte de charge du filtre.

Méthodes de filtration :

Selon la taille des particules, on distingue :

- La filtration clarifiante : permet d'arrêter des contaminants de 10 à 450 µm.
- La microfiltration : Permet d'arrêté des contaminants de 0,01 µm à10 µm, c'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie pharmaceutique. Elle consiste à faire passer un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux qui retient les particules de taille supérieure à la taille des pores en surface, ou les pièges en profondeur. L'efficacité de rétention dépend de la géométrie et de la morphologie du milieu filtrant.
- L'ultra filtration : Elle permet d'arrêter des contaminations de 0.001 µm à 0.01 µm.
- L'osmose inverse : Permettant d'arrêter des contaminants de 0,0001 µm à 0,001 µm.

Intérêt de la filtration :

La filtration permet de purifier les solutions en éliminant toutes les particules solides. Elle est également utilisée pour retenir toutes les particules en suspension dans l'air. La rétention des particules résulte de deux mécanismes, le plus souvent associés :

- ***Le criblage (filtration sur support ou en surface) :*** C'est un phénomène mécanique, qui consiste à retenir, sur le réseau poreux, les particules dont la taille est supérieure à celle des pores filtrants.

- ***La filtration en masse ou en profondeur :*** Autrement appelée filtration dans la masse ou par adsorption. Ce mécanisme consiste à retenir à l'intérieur du réseau poreux du medium filtrant des particules dont la taille peut être inférieure au diamètre des pores.

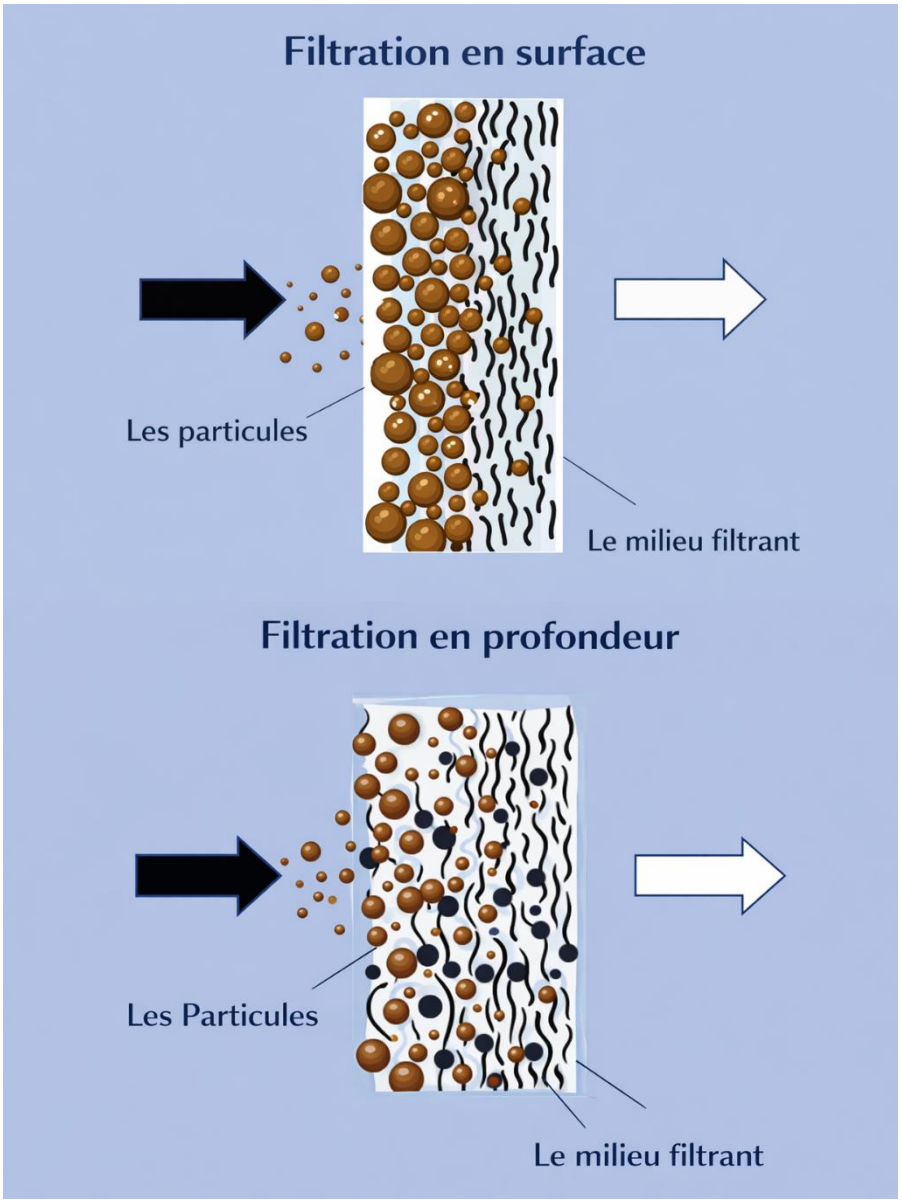


Figure IV.1 : Mécanismes de la filtration.

Dans ce chapitre, on se limite essentiellement à la séparation des suspensions liquide-solide par filtration sur support. En effet, cette filtration :

- Est très importante du point de vue industriel, car elle permet la séparation de liquide assez fortement chargé de particules de forme, dimensions et texture très variées, que l'on rencontre souvent dans le domaine pharmaceutique.
- Permis la formation d'une couche de particules : dépôt facilement récupérable est beaucoup plus rapide que la sédimentation : elle est donc plus utilisée.
- Meilleure que la filtration dans la (ou sur) masse (appelé aussi en profondeur) : Colmatage progressif lent de la masse filtrante : dépôt interne non récupérable.

IV.2 Classification des procédés de filtration :

La classification de ces procédés est basée sur la manière de réaliser le gradient de pression ΔP. On distingue trois types de filtration :

- La filtration sous pression (ou par surpression) : lorsque la pression est appliquée sur la face amont de la surface filtrante, l'autre face restant à la pression atmosphérique (autrement dit, la suspension arrive sous pression dans le filtre) ;

- La filtration sous vide (appelée aussi sous pression réduite) : une dépression est créée sur la face aval (là ou sort le filtrat) du milieu poreux (grâce à une pompe à vide), l'autre face restant à la pression atmosphérique ;
- La filtration par gravité (ou par la pesanteur) : quand la suspension s'écoule due à la pression hydrostatique ; elle 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.

IV.3 Mode de fonctionnement de la filtration :

La différence de pression entre l'amont et l'aval (perte de charge) a une grande importance car elle règle la vitesse de filtration. On peut concevoir deux modes de filtration :

- ***Filtration à pression constante :***

On régule la différence de pression amont-aval à une valeur constante. L'épaisseur du gâteau augmentant au cours du temps, la vitesse de filtration va donc diminuer sous l'effet de l'augmentation de la perte de charge. C'est la filtration la plus utilisée dans l'industrie.

- ***Filtration à débit constant :***

On augmente au cours du temps la différence de pression amont-aval pour garder un débit constant malgré l'augmentation de perte de charge.

IV.4 Aspects théoriques de la filtration sur gâteau (ou sur support) :

IV.4.1 Schéma de principe de la filtration :

Considérons la filtration sur support schématisée à la figure suivante, la suspension se sépare en deux parties :

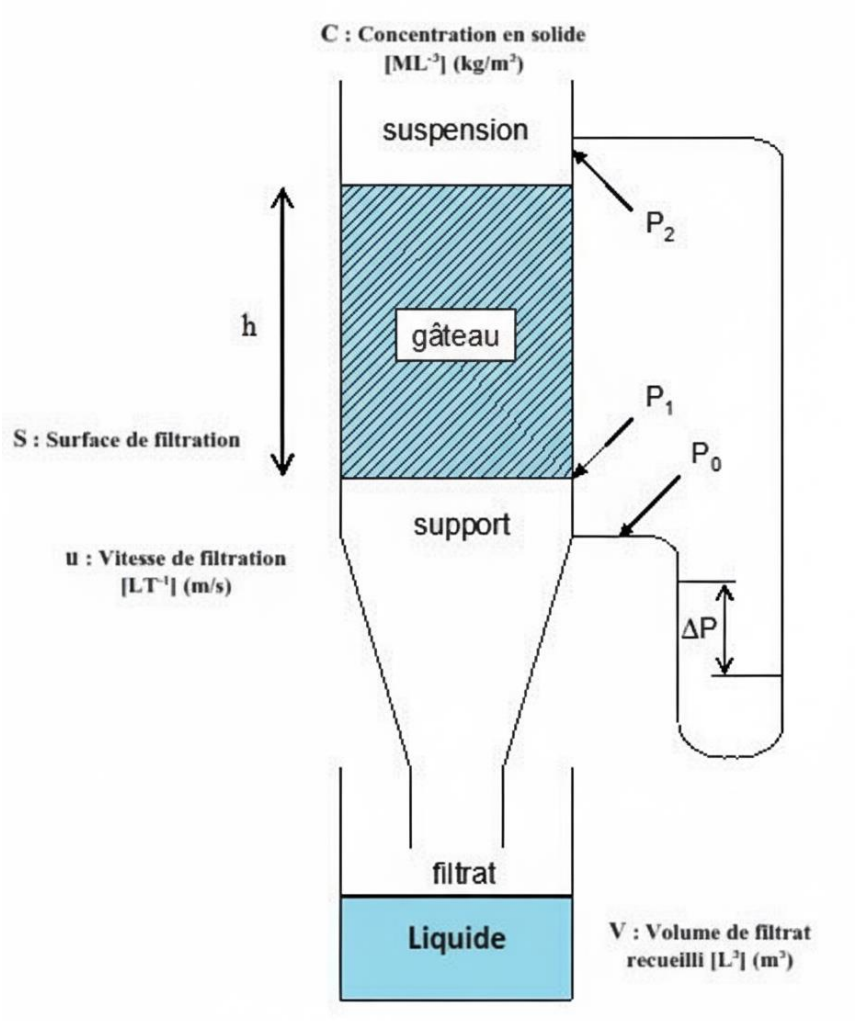


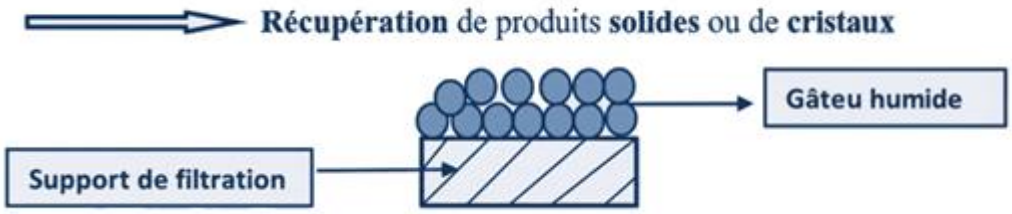
Figure IV.2 : Schéma de principe de la filtration sur gâteau.

Le filtrat et le gâteau qui contient encore du liquide. Le premier problème à résoudre suspension est de trouver la relation entre le volume de filtrat recueilli, la masse de solide arrêté par le filtre dans le gâteau et le volume de liquide qui reste emprisonné.

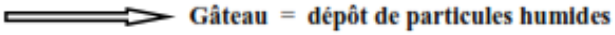
Cette relation dépendra à la fois des caractéristiques de la suspension (teneur en solide, masses volumiques) et des caractéristiques du milieu poreux que forme le gâteau. Il s'agit d'un bilan de matière.

Au fur et à mesure de la formation du gâteau, la résistance à l'écoulement augmente ce qui aura pour effet soit de freiner le débit du filtre, soit d'augmenter la pression de filtration. Le deuxième problème consistera donc à établir la cinétique de la filtration, c'est-à-dire les lois d'évolution en fonction du temps, du volume de filtrat V, de l'épaisseur h du gâteau et de la pression ΔP appliquée au-dessus de la suspension.

- Concentrations moyennes à fortes > 10 g/L.
- Débits Faibles.
- Granulométries étalées (c.-à-d. uniformes).



- Supports de filtration utilisés : **toile métallique**, **tissu synthétique**, ou **membrane** (très fines pores 0,1 – 0,9 microns).



IV.4.2 Bilan de matière :

IV.4.2.1 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 :

- ***Suspension :***
  Teneur de la suspension s, exprimée en kg de solide par kg de suspension.
  Masse volumique de la suspension exprimée en kg/m^3.

- ***Liquide :***
  Masse volumique du liquide ρ_L exprimée en kg/m^3.
  Viscosité dynamique μ (Pa.s).
  Température T en °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.

- ***Gâteau :***
  Masse totale du gâteau M_{GH} (kg).
  Masse de solide M_{GS} (kg).
  Masse de liquide M_L (kg).
  Porosité du gâteau ε.
  Siccité ou compacité (1- ε).

Le rapport d'humidité m.
Epaisseur du gâteau h (m).
Surface du gâteau S (m^2). Cette surface correspond à la surface filtrante.

- ***Filtrat :***

Volume de filtrat V (m^3). Ce volume comme la masse de gâteau dépend du temps de filtration.
Masse volumique ρ_L et la viscosité μ sont généralement celle du liquide.

Tableau IV.1 : Rapport d'humidité.

Siccité ou compacité :

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.

IV.4.2.2 Evaluation de l'humidité du gâteau :

L'humidité du gâteau est évaluée par le calcul :
Du taux d'humidité volumique (porosité ε) ou du rapport d'humidité (m).

A. Taux d'humidité volumique (porosité ε) :

Appelée aussi Porosité du gâteau, représente la fraction du volume apparent disponible pour l'écoulement du liquide.

Elle est calculée par la formule suivante :

$$La\ porosité\ (\varepsilon) = \frac{V_{GH} - V_{GS}}{V_{GH}} = \frac{V_{vide}}{V_{GH}} = \frac{V_{pores}}{V_{total\ du\ gateau}} < 1$$

ε : est une grandeur sans dimension (sans unité).
$\varepsilon = f$ (masse volumique des particules solides).
V_{GH} : volume du gâteau humide.
V_{GS} : volume du gâteau sec.

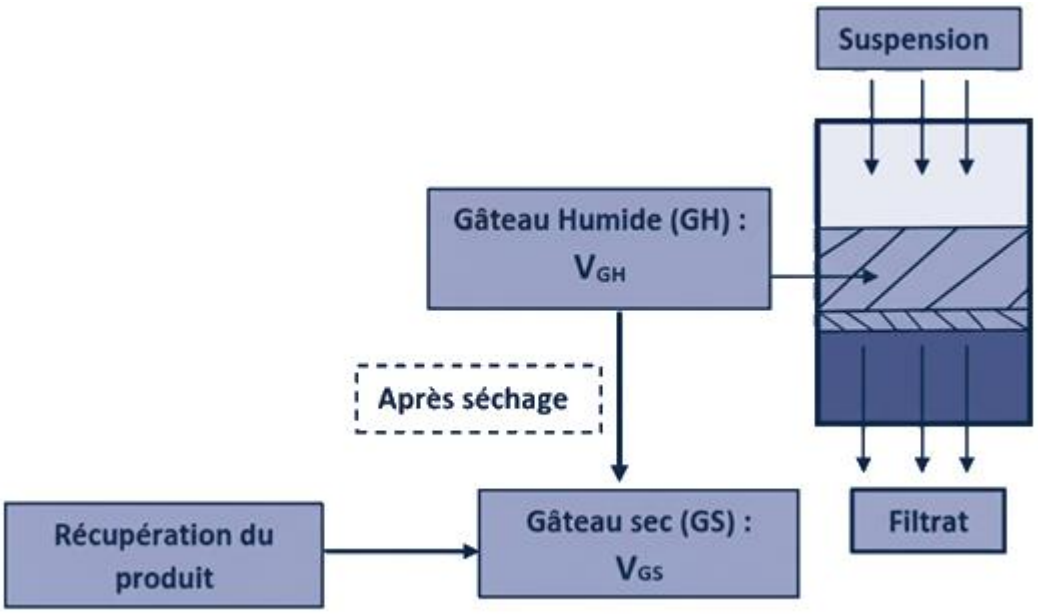


Figure IV.3 : Taux d'humidité volumique (porosité ε).

B. Rapport d'humidité volumique (m) :

Le rapport d'humidité est déterminé par la relation suivante :

$$m = \frac{Masse_{gateau\ humide}}{Masse_{gateau\ sec}} = \frac{M_{GH}}{MV_{GS}}$$

G_H : Gâteau humide = liquide + solide.
G_S : Gâteau solide seul (sec)
m peut être exprimé = f (paramètres du gâteau : S, h, ρS, ρL et ε).
h : hauteur du gâteau, ρ_S: masse volumique gâteau solide sec, ρ_L: masse volumique du liquide dans le gâteau, S : surface du gâteau, autrement dit du filtre.

C. Relation entre rapport d'humidité m et porosité ε :

À un instant donné de la phase de filtration, un gâteau d'épaisseur h et de porosité ε, occupe un volume total S.h :

- ***Masse de solide dans le gâteau*** = ρ_S. h. S (1 - ε)
- ***Masse de liquide dans le gâteau humide*** = ρ_L. h. S. ε

Le rapport d'humidité est par définition :

$$m = \frac{M_{GH}}{M_{GS}} = \frac{M_S + M_L}{M_S} = \frac{\rho_S.\,h.\,S\,(1 - \varepsilon) + \rho_L.\,h.\,S.\,\varepsilon}{\rho_S.\,h.\,S\,(1 - \varepsilon)}$$

Alors le rapport d'humidité (après développement) peut être aussi calculé avec l'expression suivante :

$$m = 1 + \frac{\varepsilon\,\rho_L}{(1 - \varepsilon)\,\rho_S}$$

En pratique, l'intérêt est d'avoir m le plus faible possible : m < 2.

D. Relation entre volume de filtrat et masse de solide dans le gâteau :

Le volume de filtrat V et la masse de solide M dans le gâteau sont liés à la teneur s de la suspension qu'ils constituaient initialement. On définira :

$$C = \frac{M}{V}$$

C'est la masse de solide déposé par unité de volume de filtrat recueilli. La phase de filtration peut être schématisée de la façon suivante en raisonnant sur 1 kg de suspension initiale :

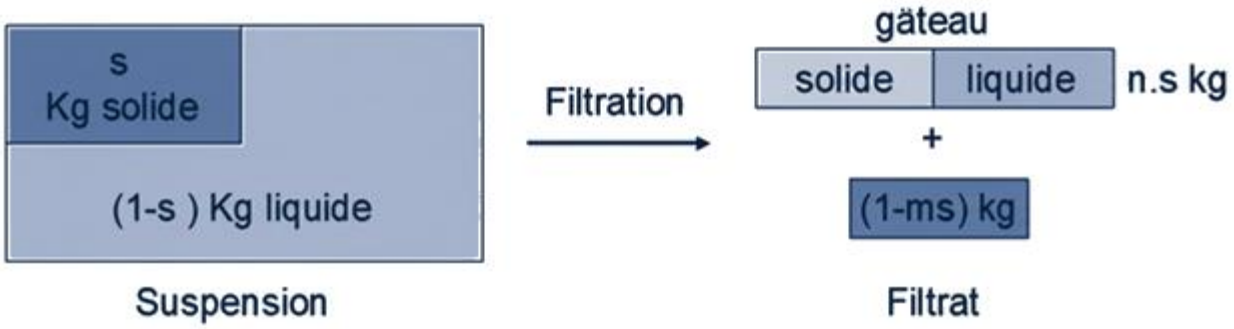


Figure IV.4 : Relation entre volume de filtrat et masse de solide dans le gâteau.

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.

En posant M = s et V = (1 – ms) / ρ_L, on obtient :

$$C = \frac{s}{\frac{(1-ms)}{\rho_L}} = \frac{\rho_L\, s}{1-ms}$$

E. Relation entre l'épaisseur du gâteau et le volume de filtrat :

Par définition la masse de *gâteau séché déposé est :*

$M = C\ V = \rho_S .\ h.\ S\ (1 - \varepsilon)$

D'où:

$$h = \frac{C\ V}{S\ \rho_S\ (1\ -\ \varepsilon)}$$

IV.4.2.3 Vitesse instantanée de filtration :

A. Définitions

Pendant le temps *dt* l'augmentation du volume de filtrat est *dV*. Le débit instantané de filtrat est :

$$Q_V = \frac{dV}{dt}$$

Si S est la surface filtrante, la vitesse débitante en fût vide est :

$$v = \frac{Q_V}{S} = \frac{1}{S}\frac{dV}{dt}$$

Hypothèses :

- Le régime d'écoulement à travers le gâteau est laminaire.
- Le gâteau est homogène et incompressible.

Les vitesses absolues de filtration sont toujours très faibles et l'expérience montre que le fluide s'écoule en régime laminaire dans les pores.

Dans ces conditions, on observe que la perte de charge est proportionnelle au débit instantané et à la viscosité du fluide :

$$\Delta P = \mu\, R_{globale}\, v$$

Le coefficient de proportionnalité est une « résistance » à l'écoulement par unité de surface qui a la dimension L^{-1}.

$R_{globale}$ est la somme de deux résistances en série : celle du support Rs et celle du gâteau en cours de formation R_G.

B. Résistances au passage du liquide :

Au passage du liquide (suspension) à travers le filtre, il rencontre une résistance appelée Résistance globale à l'écoulement égale à la résistance du support plus la résistance du gâteau.

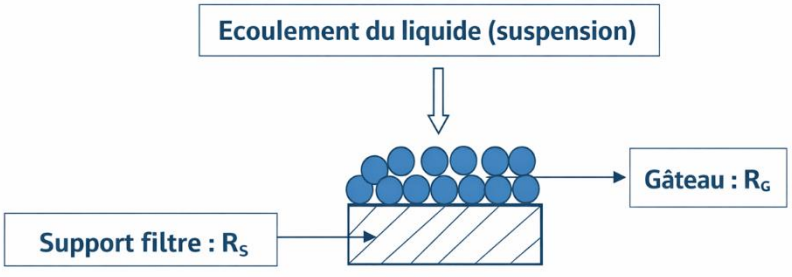


Figure IV.5 : Résistances au passage du liquide.

$R_{globale}$ = R = R_S (Résistance du support) + R_G (Résistance du gâteau)

La résistance à l'écoulement du liquide occasionne une perte de charge ΔP (c'est-il dire une chute de pression) de celui-ci à la traversée du filtre.

La Perte de charge à vaincre pour que l'écoulement soit possible et au bon fonctionnement du filtre est :

$$\Delta P_{filtre} = \Delta P = \Delta P_{support} + \Delta P_{gâteau}$$

$\Delta P_{support} \Rightarrow R_S$; $\Delta P_{gâteau} \Rightarrow R_G$

Le choix du support réalise un compromis entre une résistance Rs minimale et une dimension des pores suffisamment petite pour arrêter les particules.

La résistance du support Rs est fournie par le constructeur ou déterminée expérimentalement par un essai de filtration avec de l'eau exempte de particule.

Valeurs Rs de quelques supports les plus utilisés regroupées dans le tableau IV.2 :

Tableau IV.2 : Résistances de supports de quelques supports.

Type de toiles	*Ouverture (µm)*	R_s *(m^{-1})*
Toiles métalliques REPPS inox	350	1.10^7
	47	2.10^7
	5	2.10^8
Tissus coton croisé		9.10^7 à 5.10^8
nylon mono filament		1.10^6 à 5.10^6
nylon multi filament		2.10^6 à 3.10^8
verre		6.10^7 à 7.10^8
Non tissé		6.10^6 à 3.10^9

La résistance du gâteau R_G dépend des conditions expérimentales : Pression (P), vitesse (v), et d'autres conditions ….

Pour pallier ce problème, il a été mis en place une autre grandeur indépendante de ces conditions. Il s'agit de la résistance spécifique α.

C. Résistance spécifique du gâteau α :

La résistance spécifique α : c'est la résistance à l'écoulement de 1 kg de gâteau sur 1 m^2 de filtre. α est constante si le gâteau est incompressible.

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

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

La résistance spécifique α en m/kg est déterminée par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{R_G\, S}{M}$$

S : surface du filtre.
M : masse de solide (gâteau) séché et récupéré.

α = ***f*** **(**Taille des particules du gâteau, nombre et structure (forme) des pores)

Cherchons à exprimer la résistance spécifique α du gâteau en fonction de sa perméabilité K définie par l'équation de Darcy :

$$v = \frac{K\, \Delta P_G\, S}{\mu\, h}$$

$\Delta P_G = P_2 - P_1$ est la chute de pression à l'intérieur du gâteau. Elle peut aussi être calculée à partir de l'équation :

$$v = \frac{1}{\mu\, R_G}\, \Delta P_G$$

D'où :

$$R_G = \frac{h}{K}$$

Explicitons la masse M du gâteau, d'épaisseur h :

$$M = (1 - \varepsilon)\, S\, h\, \rho_S$$

ρ_s : masse volumique du matériau constituant le lit.

Il vient :

$$R_G = \alpha\, \frac{(1 - \varepsilon)\, S\, h\, \rho_S}{S} = \alpha\, (1 - \varepsilon)\, h\, \rho_S$$

D'où :

$$\alpha = \frac{1}{K\, (1 - \varepsilon)\, \rho_S}$$

Tableau IV.3 : Ordre de grandeurs de α.

Talc (pression de filtration ~ 3 bar)	$\alpha \approx 4{,}7.10^{11}$ m·kg^{-1}
Diatomite naturelle	$\alpha \approx 6.10^{10}$ m·kg^{-1}
Diatomite calcinée	$6.10^{9} < \alpha < 6.10^{10}$ m·kg^{-1}
Diatomite calcinée frittée	$6.10^{8} < \alpha < 6.10^{9}$ m·kg^{-1}

IV.4.2.4 Loi de Darcy et de Kozeny-Carman :

Nous appelons milieux poreux un système constitué de deux phases, l'une solide et géométriquement continue, l'autre fluide et plus ou moins continue. Nous nous intéresserons uniquement au cas des milieux poreux perméables, c'est-à-dire aux milieux poreux qui peuvent être traversés par un fluide : empilages de particules, tissus, feutres ou assemblages mécaniques.

Etudions les lois qui régissent l'écoulement des fluides à travers ces milieux.

A. Loi de Darcy :

Lorsque le régime d'écoulement est laminaire, la loi de DARCY s'écrit :

$$\Delta P = \frac{\mu\, Q_V\, h}{K\, S}$$

H : Hauteur (ou Epaisseur) de la couche du gâteau.
K : Perméabilité qui est une propriété du matériau poreux (appelée aussi conductivité hydraulique). Elle représente la mesure de la capacité d'un matériau poreux à permettre aux liquides de s'écouler. Son unité en S.I est le m^2. Une autre unité courante de K est le Darcy (d) ($1d = 0.987 \times 10^{-12}\ m^2$).
μ : Viscosité qui est une propriété du liquide.
Qv : Débit volumique en (m^3/s ou en L/s)
S : Surface de l'aire du milieu filtrant (ou du lit poreux) en m^2.

La vitesse de l'écoulement du liquide ou de la suspension : $v = \frac{Q_V}{S}$

D'autre part : $\Delta P = \mu\, R_{globale}\, v$

Et : $R_G = \alpha\, \frac{M}{S}$

D'où par utilisation de *l'équation de Kozeny-Carman* on obtient :

$$\alpha_h = \frac{36\, h_K\, (1-\varepsilon)^2}{d_P^2\, \varepsilon^3\, \rho_S}$$

h_K : Constante de Kozeny = 4.5 pour des grains sphériques.
ρ_s : Masse volumique du solide c.-à-d. du gâteau.
ε : Porosité :
ε = 0.5 => Pour des grains dont la forme ne s'éloigne pas trop de la forme sphérique.
ε = 0.26 => Pour un empilement le plus compact (forme hexagonal).
ε = 0.36 - 0,38 => Empilement au hasard (aléatoire).
ε = 0.7- 0,9 => Pour les fibres ou les fils.

Autres formes de relations permettant le calcul de la résistance spécifique α_h basées sur l'équation de Kozeny-Carman :

$$\alpha_h \approx 180\, \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3\, d_S}$$

$$\alpha_h \approx 5 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3\, S_V^2}$$

$\alpha_h = f$ (tailles des particules, ε_G, Surface de filtration)
ds : Diamètre moyen d'une distribution granulométrique de particules sphériques (appelé aussi diamètre de *Sauter*).
Sv ou Ssp : Surface interne spécifique du milieu filtrant ou média filtrant ou gâteau de filtration, qui est liée au volume de la masse solide.

$$S_V = \frac{6}{d_s}$$

B. Loi de Kozeny-Carman :

Cette équation est amplement utilisée pour la filtration, en se basant sur les hypothèses (suppositions) suivantes :

- L'écoulement du liquide est laminaire.
- La résistance hydraulique du support n'est pas prise en considération (c'est-à-dire négligeable (Rs ≈0).
- La masse poreuse est assimilée à un faisceau de canaux cylindriques (pores) droits identiques et inclinés par rapport au sens de l'écoulement et aussi indépendants les uns des autres.

$$Q_V = \frac{dV}{dt} = \frac{S}{\mu\, {S_{sp}}^2} \frac{\Delta P}{h_K\, h} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$$

ε : porosité du gâteau ou du lit.
S_{sp} : Surface spécifique de l'aire des particules constituant le gâteau (m^{-1}).
h_K: Constante de Kozeny (généralement prise comme égale à 5).
ΔP : Différence de pression à travers le filtre, en Pa.
μ : Viscosité du filtrat c'est-à-dire du liquide, en Pa.s.
h : Epaisseur du gâteau du filtre (longueur capillaire), en m.

Par développement de l'équation de Kozeny-Carman on obtient la relation suivante de la perméabilité :

$$K = \frac{\varepsilon^3}{h_K.(1-\varepsilon)^2.S_{sp}^2}$$

IV.5 Relation théoriques de fonctionnement d'un filtre sur support :

$$\Delta P = R_{globale}\, \mu\, v = (R_S + R_G)\mu\, v = \left(R_S + \frac{\alpha\, M}{S}\right)\mu\, v$$

ΔP : Différence de pression (ou gradient).
$R_{globale}$: Résistance totale.

Si la filtration est totale, c'est-à-dire toute la masse solide est piégée, alors : $M_S = C\, V$

Le débit du filtrat : $Q_V = \frac{dV}{dt}$

Or la vitesse : $v = \frac{Q_V}{S}$ Donc la différence de pression ΔP devient :

Donc la différence de pression ΔP devient :

$$\Delta P = \left(R_S + \frac{\alpha\, C\, V}{S}\right)\frac{\mu}{S}\frac{dV}{dt}$$

IV.5.1 Filtration sur support à débit constant : ($Q_V = \frac{dV}{dt}$ constant)

$$\Delta P = \frac{R_S\, \mu\, Q_V}{S} + \frac{\alpha\, C\, \mu\, V\, Q_V}{S^2}$$

Le volume de filtration : $V = Q_V\, t$

Alors ΔP devient :

$$\Delta P = \frac{R_S\ \mu\ Q_V}{S} + \frac{\alpha\ C\ \mu\ V\ {Q_V}^2}{S^2}\ t \qquad\qquad \Delta P = f(t)$$

Cette relation permet de déterminer graphiquement la perte de charge ΔP.

IV.5.2 Filtration sur support à pression constante : (ΔP = Constante)

Le but de ce mode de fonctionnement ou (de cette opération) est la détermination du débit ou du volume filtré par unité de temps :

$$\Delta P = \left(R_S + \frac{\alpha\ C\ V}{S}\right)\frac{\mu}{S}\ \frac{dV}{dt}$$

$$\Rightarrow \qquad dt = \left(R_S + \frac{\alpha\ C\ V}{S}\right)\frac{\mu}{S}\ \frac{dV}{\Delta P}$$

$$\Rightarrow \qquad dt = \frac{R_S\ \mu}{S\ \Delta P}\ dV + \frac{\alpha\ C\ \mu}{S^2 \Delta P} V\ dV$$

Par intégration par rapport au temps et Von obtient :

$$t = \frac{R_S\ \mu}{S\ \Delta P}\ V + \frac{\alpha\ C\ \mu}{S^2 \Delta P}\frac{V^2}{2} \qquad\qquad t = f(V)$$

Cette relation permet de suivre l'évolution du temps, t, de filtration en fonction du volume filtré, V.

La mise de la relation ci-dessus sous la forme suivante (appelée Equation de RUTH), permet de déterminer graphiquement α_h et Rs.

$$\frac{t}{V} = \frac{\alpha\ C\ \mu}{S^2\ \Delta P}\ \frac{V}{2} + \frac{R_S\ \mu}{S\ \Delta P} \qquad\qquad \frac{t}{V} = f(V)$$

$\frac{t}{V} = f(V)$ est une droite : Pente : $\frac{\alpha\ C\ \mu}{2\ S^2\ \Delta P}$

Ordonnée à l'origine : $\frac{R_S\ \mu}{S\ \Delta P}$

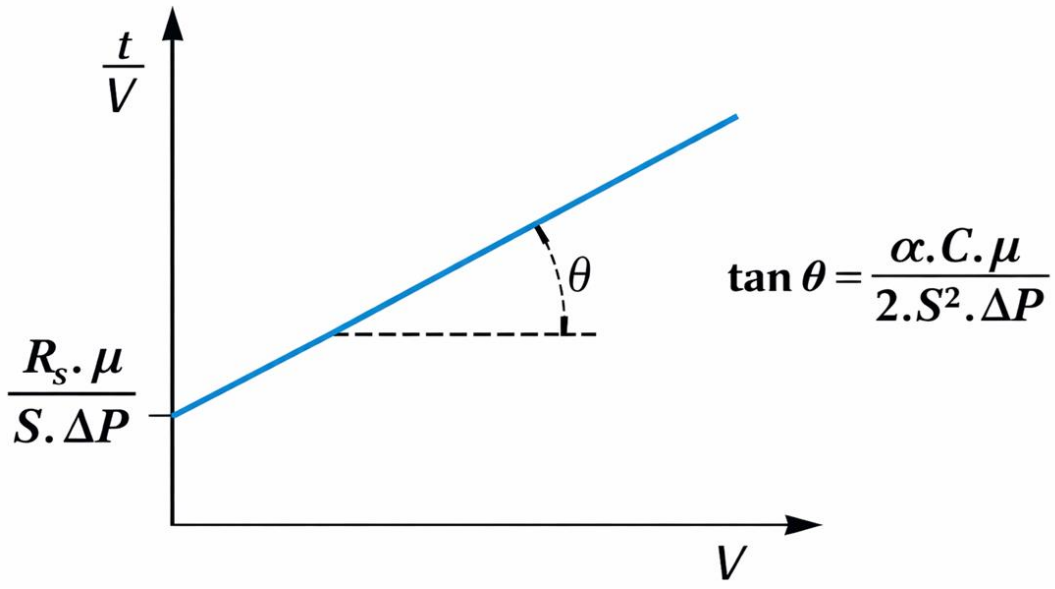


Figure IV.6 : Présentation graphique de $\frac{t}{V} = f(V)$.

Il en ressort de l'étude de ces deux modes de fonctionnement les informations qualitatives suivantes sur le débit de filtration :

- Le Débit augmente lorsque l'épaisseur du gâteau diminue : il faut alors disposer d'un gâteau le plus étalé possible (sans avoir de fissures qui causerait une rupture de la différence de pression (ΔP) de part et d'autre du filtre.
- Le Débit augmente lorsque la surface filtrante augmente (S).
- Le débit augmente lorsque la viscosité diminue (μ).
- Une augmentation de la température limitée peut-être intéressante mais cette possibilité perd de son intérêt en cas de filtration sous vide à cause de l'augmentation de la tension de vapeur.

IV.5.3 Compressibilité du gâteau :

Si le gâteau est compressible, les équations écrites précédemment demeurent valables, à condition de remplacer α par une résistance spécifique moyenne sur le gâteau. $\alpha = \alpha_0 . (\Delta P)^n$ ou n : est l'exposant de compressibilité.

Cette équation, montre l'influence de la pression sur la résistance spécifique moyenne. Donc l'équation de fonctionnement du filtre, en négligeant le terme R_S, dû au support devient :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{S^2\ \Delta P^{1-n}}{\mu\ \alpha_0\ C\ V}$$

- Si n = 0 : le gâteau est incompressible.
- Si n < 1 : le gâteau est compressible, mais une augmentation de pression permet d'augmenter le débit.
- Si n = 1 : la pression n'a théoriquement pas d'effet sur le débit.
- Si n > 1 : toute évolution de pression a un effet néfaste sur le débit, il faut filtrer à la pression la plus faible possible. Le filtre à vide est généralement adapté dans un tel cas.

IV.6 Aspects techniques des filtres sur support :

IV.6.1 Mode de fonctionnement :

Les filtres sur support peuvent fonctionner selon deux modes, soit :

- En continu.
- En discontinu.

IV.6.1.1 Fonctionnement en continu :

La production de solide se fait en continu (kg/h). Ce mode de fonctionnement se déroule en passant par les étapes suivantes :

- Filtration.
- Lavage.
- Récupération du gâteau.
- Séchage du gâteau.

Les filtres concernés par ce mode de fonctionnement sont :

- Le filtre à tambour rotatif.
- Le filtre à bande.

IV.6.1.2 Fonctionnement en discontinu :

Le cycle de filtration se déroulant selon ce mode de fonctionnement comprend les étapes suivantes :

- Filtration.
- Débâtissage
- Lavage.
- Arrêt.
- Récupération du gâteau.
- Séchage.

Le filtre-presse est l'équipement mise en œuvre suivant ce mode de fonctionnement. La suspension est filtrée à haute pression (5 à 15 bars) par utilisation de cadres creux recouverts d'une toile filtrante.

IV.6.2 Description de quelques filtres usuels :

IV.6.2.1 Filtres à fonctionnement continu ou discontinu :

Dans les appareils continus, un support de gâteau (ou une masse filtrante) se déplace lentement devant la suspension. Lorsque le gâteau formé est suffisamment épais (ou que le colmatage de la masse est assez important) on procède à l'enlèvement du gâteau (ou au décolmatage de la masse, ou même à son remplacement si ce décolmatage est impossible ou non rentable) avec, le cas échéant, des étapes intermédiaires de lavage et essorage du gâteau.

Les filtres à bandes (voir photo). Ces machines se composent en principe d'une combinaison de 2 bandes filtrantes qui se déplacent sur plusieurs rouleaux. La boue est comprimée entre les bandes au fur et à mesure de leur déplacement. Dans la première zone de déshydratation, la boue est drainée par gravité sur toute la largeur de la bande inclinée. Elle passe ensuite via une zone cunéiforme à faible pression à la zone de haute pression, où le diamètre décroissant des rouleaux fait augmenter progressivement la pression sur la boue.



Figure IV.7 : Filtre à bande.

Dans les appareils discontinus on amène la suspension dans une capacité munie d'un support de gâteau (ou d'une masse poreuse). On arrête l'opération lorsque la capacité est remplie (ou lorsque le colmatage de la masse atteint le maximum tolérable). Il faut alors démonter le filtre, extraire le gâteau (ou décolmater, ou remplacer la masse filtrante) et remonter l'ensemble pour recommencer un nouveau cycle.

Les filtres continus sont en général plus coûteux à l'achat que les filtres discontinus, les frais de main d'œuvre ultérieurs étant par contre bien plus réduits dans le premier cas que dans le second.

Les filtres discontinus sont parfois équipés de systèmes plus ou moins automatiques destinés à réduire ou supprimer l'intervention humaine en fin de cycle.

IV.6.2.2 Classement suivant la teneur de la suspension en phase dispersée :

La clarification correspond à des suspensions peu chargées (quelques fractions de grammes de phase dispersée par litre de suspension). C'est le cas de la filtration des brouillards, poussières, ou de la filtration de certains liquides (alimentaires en particulier), destinés à donner du "brillant" au liquide par "polissage" de cette suspension. La clarification est en général réalisée par filtration en profondeur, en discontinu.

L'extraction correspond à des suspensions plus chargées en matières solides (de quelques grammes à quelques centaines de grammes de phase dispersée- en général solide - par litre de suspension). C'est généralement le domaine de la filtration sur support, avec filtres sous vide ou sous pression.

IV.6.2.3 Classement suivant la nature de la force filtrante :

A. Les filtres à pression naturelle :

Ils fonctionnent par simple gravité, le type classique étant le filtre à sable utilisé pour la filtration des eaux (eau résiduaire d'usine devant être renvoyée en rivière, ou eau de rivière devant être transformée en eau potable).

B. Les filtres à pression forcée :

On applique à la suspension une pression supérieure à la pression atmosphérique, la suspension étant ainsi forcée, soit contre un support au-dessus duquel la suspension se dépose, soit contre un médium à l'intérieur duquel elle se dépose. En première approximation le premier cas correspond à l'extraction et le second à la clarification.

Dans cette catégorie des filtres à pression forcée, on rencontre :

C. Les filtres presses : (à cadres ou à plaques)

Ils sont constitués par des empilements de plateaux et cadres séparés par des toiles support et pressés les uns contre les autres pour assurer l'étanchéité. Il est possible lorsque les cadres sont entièrement remplis de gâteau, de brancher un circuit de liquide clair, sur celui de la suspension pour assurer le lavage du gâteau. C'est un appareil à fonctionnement discontinu.

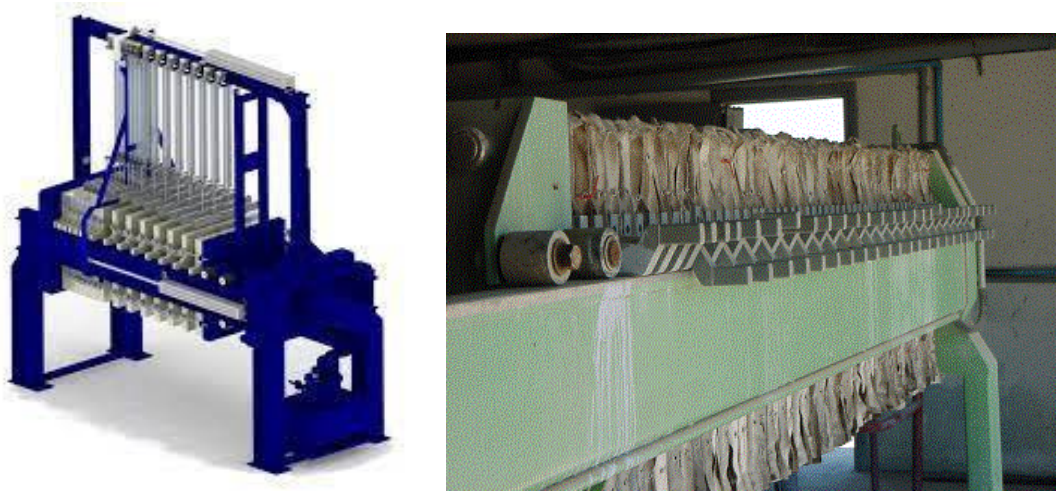


Figure IV.8 : Filtre presse.

D. Les filtres à claies ou tambours disposés dans des carters sous pressions :

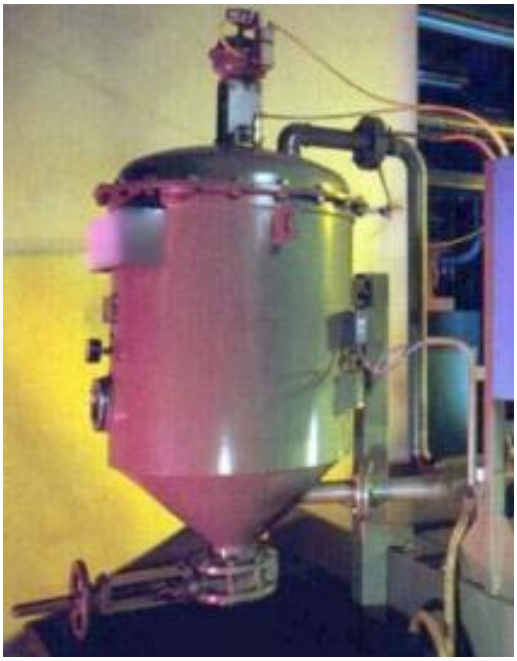
Ils sont de même conception que les filtres à claies ou tambours sous vide décrits plus loin, mais la pression motrice est appliquée dans le carter qui enveloppe claies ou tambours.

E. Les filtres à poches :

Ils sont formés de boîtes parallélépipédiques en treillis ou grillage recouvertes d'une toile filtrante sur laquelle se déposera le gâteau. Plusieurs de ces boîtes (poches) sont enfermées dans une cuve alimentée en suspension. Ces filtres sont parfois utilisés en clarification finale (polissage) en commençant par y déposer une précouche d'adjuvants de filtration, de type kieselguhr par exemple.

Les kieselguhrs sont des carapaces de diatomées fossiles, broyées, calcinées et lavées, se présentant sous forme de poudre, extrêmement poreuses (0,7 à 0,9), peu compressibles et très perméables. Le fait de déposer une précouche de quelques millimètres d'épaisseur sur les toiles des poches permet, sans freiner outre mesure le débit, de retenir, partiellement en surface et partiellement en profondeur, des particules très fines de suspension qu'il serait difficile d'arrêter par d'autres techniques.

Les filtres à bougies ou cartouches filtrantes (simples ou à faisceaux) sont également assimilables aux filtres à poches.



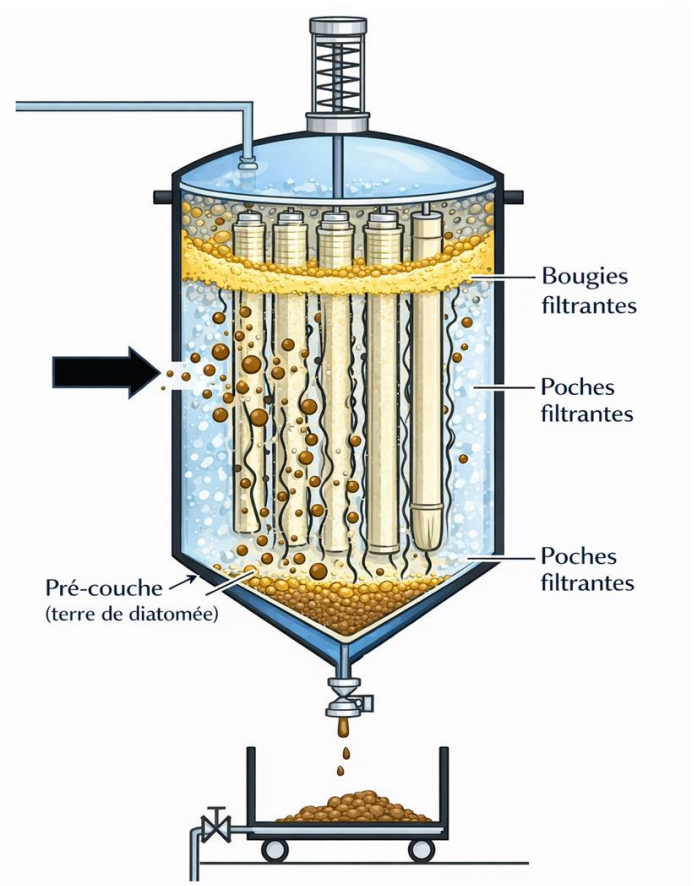


Figure IV.9 : Filtre précouche – bougies – poches.

F. Filtre continu sous pression :

Dans ce type de filtre l'alimentation se fait en continu dans l'un des compartiments d'une cuve cylindrique sous pression. On peut prévoir trois autres compartiments pour le lavage, le débâtissage et la formation de précouche. Les plateaux verticaux disposés radialement passent successivement d'un compartiment à l'autre.

Un appareil plus simple utilisé pour épaissir les boues ne comporte pas de compartiment. L'ensemble des plateaux tourne. La filtration s'accomplit pendant les 9/10 ième de la rotation, le 1/10 ième restant correspond au débâtissage.

D'autres dispositifs fonctionnent suivant le principe des filtres continus sous vide.

G. Les filtres à vide :

Le plus simple d'entre eux est le büchner de laboratoire monté sur fiole à vide, avec sa version industrielle à fonctionnement tout aussi discontinu.

Mais la majorité des filtres à vide sont des filtres continus où le vide est appliqué à l'intérieur d'une capacité qui se déplace lentement devant la suspension. Le gâteau formé d'épaisseur croissante au cours du déplacement de la capacité est extrait après lui avoir, le cas échéant, fait subir diverses opérations de lavage et d'essorage.

Le plus classique des filtres continus à vide est le filtre rotatif à tambour. Il est constitué par une série de petites boîtes de faible profondeur, toutes de même largeur et de longueurs égales à celle du tambour, à la périphérie duquel elles sont disposées.

Ces boîtes, au nombre de 10 à 20 environ, constituent autant de secteurs. Ces secteurs sont en communication avec l'extérieur par des séries de fentes ou de perforations. La périphérie du tambour sera recouverte de la toile support du gâteau.

Un tube, soudé dans le fond de chaque boîte, relie celle-ci à la face avant place d'un distributeur. L'ensemble des secteurs du tambour et du distributeur tourne autour d'un axe horizontal. En face de ce distributeur, et plaqué contre lui par des ressorts qui assurent l'étanchéité, se trouve l'obturateur, pièce fixe, creusé sur une face d'alvéoles circulaires reliées à des canalisations permettant d'amener le vide ou la pression dans ces alvéoles, donc dans les secteurs correspondants du tambour. Cette dernière plonge dans une auge à niveau constant contenant la suspension.

Pendant l'immersion du tambour le vide est appliqué aux secteurs correspondants. Il y a donc aspiration de la suspension contre la toile support et formation d'un gâteau d'épaisseur croissante jusqu'à la sortie de la suspension. Cette aspiration est parfois continue pour assurer un essorage partiel du gâteau par aspiration d'air extérieur.



Figure IV.10 : Filtre rotatif à tambour sous vide.

Un ou plusieurs lavages successifs peuvent être prévus, les eaux de lavage étant recueillies séparément ou mélangées aux eaux mères (filtrat). De l'air est ensuite soufflé sous la toile, ce qui facilitera l'enlèvement du gâteau par le racloir.

D'autres systèmes d'extraction du gâteau peuvent être envisagés (ficelles, rouleau, ...). Certains filtres rotatifs sont munis d'une toile sortante : entre l'enlèvement du gâteau et l'entrée dans l'auge des rouleaux amènent la toile en dehors du tambour devant des pulvérisateurs d'eau qui permettent de la laver pour éliminer les particules qui auraient éventuellement pu la colmater.

Les filtres à tambour, normalement utilisés pour la filtration de suspensions assez fortement chargées en matières solides, peuvent également servir pour des opérations de clarification. On commence par former sur toute la périphérie du tambour une précouche très épaisse d'adjuvant de filtration (de 5 à 10 cm). On filtre ensuite la suspension à clarifier et, pour éliminer la couche superficielle d'adjuvant colmatée par les fines particules de la suspension, on équipe le filtre d'un racleur à avance micrométrique qui enlève une fraction de millimètre du gâteau par tour de tambour. L'opération est théoriquement discontinue. Mais pratiquement, compte tenu des très faibles avances du racleur et des très faibles vitesses de rotation du tambour (d'un à quelques dizaines de tours par heure), l'élimination totale de la précouche prend plusieurs jours en marche continue.

Une variante du filtre à tambour est le filtre à disques : on utilise alors des tambours de faible épaisseur c'est-à-dire des disques creux, la surface filtrante de chaque disque étant alors constituée par ses deux faces latérales et non par la périphérie. Des séries de disques sont ainsi disposées côte à côte dans une auge, séparés les uns des autres par des couteaux racleurs. Les secteurs, le distributeur, l'obturateur sont conçus suivant les mêmes principes que pour le filtre à tambour.

On peut également concevoir un filtre à vide sous la forme d'une bande sans fin qui est pratiquement une bande de caoutchouc percée de trous supportant la toile filtrante. Cette bande se déplace horizontalement en glissant sur des capacités correspondant aux secteurs du filtre à tambour ou à disques. En fin de course la bande passe sur une poulie de renvoi contre laquelle est appliqué le racloir. Dans la période de retour, il sera possible de prévoir des lavages de la toile.

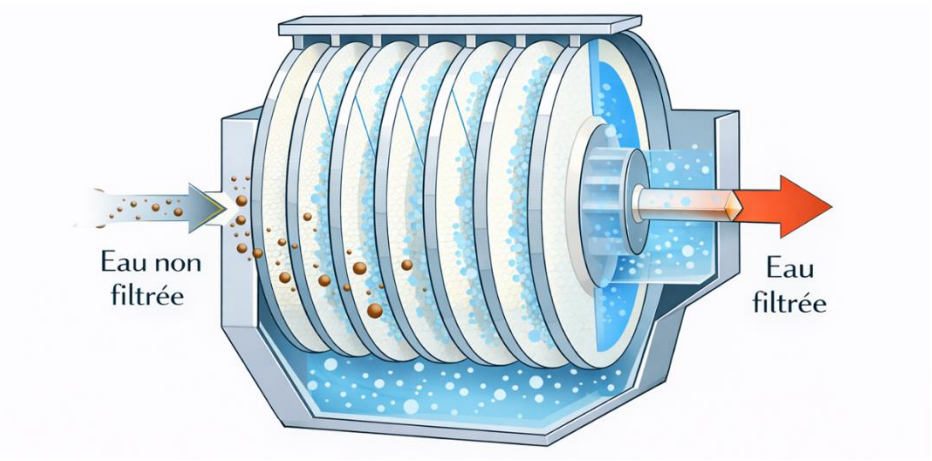


Figure IV.11 : Filtre à disques.