

Filtration

Auteur(s)

FLOURY Juliane

JEANTET Romain

Date de création du document

Table des matières

I	La filtration tangentielle : Introduction.....	7
I.1	Objectifs de la filtration tangentielle	7
I.2	Avantages des techniques de filtration tangentielle.....	8
I.3	Principales techniques de filtration.....	8
II	Bases théoriques de la filtration.....	10
II.1	Séparation en phase liquide.....	10
II.2	Caractérisation des membranes et procédés de filtration tangentielle.....	10
II.3	Filtration frontale et tangentielle.....	11
II.4	Lois de transfert de matière.....	11
II.4.1	Transfert de solvant.....	11
II.4.1.1	Cas des membranes poreuses.....	11
II.4.1.2	Cas des membranes denses.....	12
II.4.2	Transferts de solutes.....	12
II.4.2.1	Exclusion stérique (Loi de Ferry)	12
II.4.2.2	Exclusion ionique (dialyse de Donnan).....	13
II.4.3	Facteurs limitants.....	13
II.4.3.1	La polarisation de concentration.....	14
II.4.3.2	Le colmatage.....	14
II.4.3.3	Conséquences des facteurs limitants	15
II.4.3.3.1	Sur la perméabilité.....	15
II.4.3.3.2	Sur la sélectivité.....	15
III	Conduite de la filtration tangentielle.....	16
III.1	Influence des paramètres.....	16
III.1.1	Vitesse de circulation et pression transmembranaire.....	16
III.1.2	Température de fonctionnement.....	16

III.2	Composition des fractions.....	17
III.2.1	Bilan matière.....	17
III.2.2	Exemple.....	17
III.2.3	Cas de la diafiltration.....	17
III.3	Pilotage d'une installation.....	18
III.4	Vitesse de circulation et pression transmembranaire.....	19
IV	Matériel de filtration.....	20
IV.1	Membranes.....	20
IV.1.1	Structure.....	20
IV.1.2	Nature chimique.....	21
IV.1.2.1	Organique (2ème génération).....	21
IV.1.2.2	Minérale (3ème génération).....	21
IV.1.3	Géométrie des modules.....	23
IV.1.3.1	Critères de choix.....	23
IV.1.3.2	Type de modules.....	24
IV.1.3.2.1	Modules plans.....	24
IV.1.3.2.2	Modules tubulaires.....	25
IV.1.3.2.3	Modules spirales.....	26
IV.2	Equipement.....	27
IV.2.1	Système discontinu.....	27
IV.2.2	Système continu.....	29
V	Applications.....	32
V.1	Microfiltration.....	32
V.2	Ultrafiltration.....	32
V.3	Nanofiltration.....	32
V.4	Osmose inverse.....	32

Les caractéristiques du module

Ce module présente tout d'abord les objectifs, les principes et les avantages majeurs du procédé de filtration tangentielle par rapport aux techniques classiques de concentration et/ou séparation. Les lois de transfert de solvant et de solutés sont ensuite posées afin de permettre aux futurs ingénieurs de dégager des paramètres robustes de ces techniques (pression, viscosité, contrainte tangentielle, etc.). Ils acquièrent ainsi les notions de base indispensables à la conduite et l'optimisation de tels procédés. Enfin les différents équipements de filtration disponibles ainsi que les principales applications industrielles de ces techniques sont exposés.

Les finalités et objectifs

A l'issue de ce module, l'étudiant ou le stagiaire sera capable de :

- Définir les termes suivants : perméat, rétentat, seuil de coupure, FRV, perte de charge, pression transmembranaire, densité de flux de perméation.
- D'associer une à deux applications industrielles (en IAA) aux termes suivants : OI, NF, UF et MF et préciser le type de molécules séparées et/ou concentrées pour chacune de ces applications.
- Définir la loi de Darcy et optimiser les différents paramètres de la filtration (fluide, membrane, opérateurs)
- Expliquer pourquoi il est intéressant de connaître la contrainte de cisaillement à la membrane en regard de la densité de flux imposée.
- Calculer la composition des fractions de liquide issues d'une opération de filtration ou de diafiltration.

Le contenu du cours

1. Filtration tangentielle : Introduction

- Objectifs de la filtration tangentielle
- Avantage des techniques de filtration tangentielle

- Principales techniques de filtration tangentielle

2. Bases théoriques de la filtration

- Séparation en phase liquide
- Caractérisation des membranes et procédés de filtration tangentielle
- Filtration frontale et tangentielle
- Les lois de transfert de matière

3. Conduite de la filtration tangentielle

- Influence des paramètres
- Composition des fractions
- Pilotage d'une installation
- Vitesse de circulation et pression transmembranaire

4. Matériel de filtration

- Membranes
- Equipement

5. Applications

- Microfiltration
- Ultrafiltration
- Nano filtration
- Osmose inverse.

Les ressources d'apprentissage

Vous disposez dans ce module :

Sur la page d'accueil de la plate forme Moodle

- Une boîte aux lettres
- Un forum
- Un chat
- L'accès au cours
- L'accès à un lexique spécialisé

Dans la partie cours

- La présentation du module, document que vous lisez actuellement,
- Un cours (bouton « cours »)
- Ce module ne propose pas de planning d'activités,
- Des ressources associées aux cours par le bouton « Ressources » et comprenant : une bibliographie, une « webographie » qui reprend les sites Internet mentionnés dans le cours, une table des illustrations,
- Une aide pour présenter les différents tuteurs à votre disposition,
- La possibilité d'imprimer le cours en format PDF,
- La possibilité d'imprimer les illustrations soit à partir de la table des illustrations accessible par le bouton « Ressources », soit à partir du cours à l'ouverture de l'illustration.

L'encadrement

Durant toute la durée du module, un tuteur sera disponible pour vous guider dans votre parcours d'apprentissage. Ce tuteur peut vous aider à résoudre des problèmes relatifs aux cours, clarifier un point de méthodologie, effectuer avec vous un suivi individuel de vos activités. Il prend également en charge l'animation du forum ainsi que les corrections et l'évaluation de vos travaux.

Les crédits

Auteurs :

Juliane FLOURY, Enseignant chercheur en génie des procédés, Agrocampus Ouest.

Romain JEANTET, Enseignant chercheur en génie des procédés et technologie laitière, Agrocampus Ouest.

Scénarisation :

Equipe des auteurs du module,

Equipe d'Ingénierie du CIRM-Université de Rennes 1.

Production :

Equipe de production du CIRM - Université de Rennes 1.

I LA FILTRATION TANGENTIELLE : INTRODUCTION

I.1 OBJECTIFS DE LA FILTRATION TANGENTIELLE

Les techniques à membrane sont devenues des outils industriels incontournables dans les technologies alimentaires depuis un peu plus de 30 ans. Les principales applications sont développées dans le secteur laitier pour la concentration des protéines du lactosérum et la standardisation du lait en protéines, loin devant les bio-produits et les autres produits alimentaires (boissons et ovo-produits). La majorité de ces opérations de séparation et/ou concentration met en oeuvre la filtration tangentielle. Le fluide traité circule tangentiellement à la membrane (filtre) pour limiter l'accumulation de matière occasionnée par le flux de matière transversal généré par le gradient de pression au travers de la membrane.

Ses nombreuses applications permettent d'atteindre les objectifs suivants :

Adaptation de la matière première (lait, lactosérum) :

- pour sa transformation : standardisation physico-chimique (teneur en matière grasse, protéine, lactose... par exemple, l'ultrafiltration du lait permet d'augmenter la concentration en protéine pour la fabrication de fromage) et microbiologique (élimination des microorganismes par exemple, lors de l'épuration bactérienne du lait par microfiltration).
- au marché : la filtration tangentielle offre de nombreuses possibilités dans le traitement de matières premières telles que les coproduits industriels. Cette technique permet d'obtenir des produits intermédiaires ou finis mieux adaptés aux conditions technico-économiques et aux exigences des consommateurs en matière de qualité nutritionnelle, de service, etc. La valorisation des coproduits est ainsi meilleure. On peut citer par exemple l'obtention de concentrés protéiques par ultrafiltration du lactosérum issu de fromageries.

Valorisation des coproduits et minimisation des effluents : les techniques de filtration sont considérées comme des procédés « propres » puisque qu'elles remplacent souvent une ou plusieurs étapes d'épuration. Par exemple, les opérations membranaires peuvent être utilisées pour la récupération de matière alimentaire et le recyclage d'effluents (eaux de

procédés, condensats, ultrafiltrats, nanofiltrats, osmosats, fluides d'intérêt industriel, saumures). L'utilisation des bioréacteurs à membranes permet de diminuer la production de boues par rapport aux traitements biologiques conventionnels de décontamination des eaux résiduelles.

I.2 AVANTAGES DES TECHNIQUES DE FILTRATION TANGENTIELLE

- **Amélioration de la qualité des produits.** En effet, la membrane est un **filtre physique** elle fonctionne sans ajout de produits chimiques et constitue une barrière pour les composés de dimensions supérieures à celles de ses pores. Ces techniques permettent de travailler à basse température et de minimiser ainsi l'altération du produit.
- **Faible coût énergétique :** la séparation sur membrane n'implique pas de changement de phase. Ainsi, la consommation énergétique de la microfiltration et de l'ultrafiltration tangentielle (1 à 15 kWh.m⁻³ de perméat), la nanofiltration (3 à 7 kWh.m⁻³) et l'osmose inverse (9 à 40 kWh.m⁻³) les rend particulièrement attractives pour concentrer de la matière sèche (lait, lactosérum, jus de fruits et de légumes) par rapport à l'évaporation sous vide (100 kWh.m⁻³ pour 5 effets), même combinée à la recompression mécanique des vapeurs.
- **Facilité d'intégration industrielle et fiabilité :** les équipements sont modulaires, ils se prêtent donc bien à un dimensionnement ajusté. Ils sont flexibles, généralement compacts ; les opérations peuvent être facilement conduites en continu et automatisées avec fiabilité. Elles peuvent être combinées à des opérations existantes pour améliorer la qualité d'un produit ou augmenter la capacité d'une unité. Les opérations à membrane apportent une simplification des schémas de procédés.

I.3 PRINCIPALES TECHNIQUES DE FILTRATION

On peut distinguer 4 opérations de séparation mettant en oeuvre des membranes poreuses : la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose

inverse (OI). Cette distinction est basée sur la taille des constituants retenus et sur le diamètre moyen des pores de la membrane utilisée.

Pour visualiser les animations illustrant les principales techniques de filtration, cliquer sur les liens suivants :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

Cliquer ici ¹ pour visualiser l'animation.

1

II BASES THÉORIQUES DE LA FILTRATION

II.1 SÉPARATION EN PHASE LIQUIDE

En agro-alimentaire, l'intérêt des techniques à membranes réside principalement dans le respect des qualités organoleptiques et nutritionnelles du produit et la faible consommation énergétique du procédé. En effet, ces procédés de filtration, dite sélective, sont des procédés de séparation en phase liquide à travers une membrane.

Ces procédés ont deux objectifs fondamentaux :

- la concentration : dans ce cas, on cherche à concentrer tous les constituants d'une solution (osmose inverse). Seule l'eau peut alors traverser la membrane, les autres solutés étant retenus par la membrane et constituant le concentré.
- la séparation : dans ce cas, on cherche à séparer les constituants d'une solution présentant des tailles ou des propriétés (électriques, chimiques...) différentes. Ainsi, les différents constituants resteront d'un côté ou passeront à travers la membrane selon le cas.

Cliquer ici ¹ pour visualiser l'animation.

II.2 CARACTÉRISATION DES MEMBRANES ET PROCÉDÉS DE FILTRATION TANGENTIELLE

Les paramètres permettant de caractériser une opération de filtration tangentielle sont :

- pour la membrane :
 - sa perméabilité : elle est décrite par deux paramètres, la densité de flux de perméat J et la résistance hydraulique membranaire R_m ;
 - sa sélectivité : elle est donnée par le taux de rétention T_R et par le seuil de coupure de la membrane.

1

- pour le procédé de filtration :
 - la pression transmembranaire : PT
 - la perte de charge longitudinale : ΔP

Cliquer ici ¹ pour visualiser l'animation.

II.3 FILTRATION FRONTALE ET TANGENTIELLE

Il existe deux modes de filtration : la filtration frontale et la filtration tangentielle. L'animation suivante permet de comparer ces deux procédés : ².

II.4 LOIS DE TRANSFERT DE MATIÈRE

En MF, UF et NF, le transfert de solvant et de solutés se produit par convection à travers les pores de la membrane. En OI, le transfert des différentes molécules a lieu par « solubilisation-diffusion » dans la membrane.

II.4.1 Transfert de solvant

II.4.1.1 Cas des membranes poreuses

La loi de Darcy est vérifiée dans le cas de la filtration d'un fluide newtonien (eau ou air, par exemple), exempt de particules susceptibles d'être retenues par la membrane, circulant en régime laminaire à travers les pores de la membrane poreuse (modèle des capillaires et application de la loi de Poiseuille).

Cliquer ici ³ pour visualiser l'animation.

1

2

3

II.4.1.2 Cas des membranes denses

Les modèles convectifs qui permettent d'exprimer le flux de solvant (comme celui présenté dans la loi de Darcy) ne sont pas valables pour décrire le transfert à travers les membranes denses (cas de l'osmose inverse).

Il est alors nécessaire de recourir à des modèles diffusifs basés sur la loi de Fick, qui présentent quelques différences par rapport à la loi de Darcy :

- La notion de pression transmembraire (PT) est remplacée par le concept de pression efficace (PEff) : $PEff = PT - \pi$.¹
- La perméabilité de la membrane et la densité de flux de perméat dépendent aussi du coefficient de diffusion du filtrat (eau) à travers la membrane.

Le passage du modèle convectif au modèle diffusif est progressif. Ainsi, la nanofiltration est une technique de séparation où l'importance relative des deux modes de transfert est comparable.

II.4.2 Transferts de solutes

Les phénomènes majeurs qui conditionnent la sélectivité d'une membrane par rapport au transfert des différents solutés sont :

II.4.2.1 Exclusion stérique (Loi de Ferry)

Le phénomène d'exclusion stérique des membranes de filtration s'explique par la rétention des molécules en fonction de leur forme et leur taille.

Les molécules s'écoulant selon le mode convectif sont arrêtées par la membrane quand leur taille est supérieure à la taille des pores membranaires. Les molécules de plus petites tailles peuvent en revanche passer à travers les pores.

1

Cette rétention n'est pas constante au cours de la filtration à cause du colmatage progressif de la membrane qui entraîne une variation de sa sélectivité, en fonction des caractéristiques des dépôts formés. ¹

La loi de Ferry ² permet d'établir un bilan matière entre l'entrée et la sortie des pores en tenant compte du phénomène de rétention des solutés.

II.4.2.2 Exclusion ionique (dialyse de Donnan)

Certaines membranes de filtration peuvent être considérées comme des surfaces poreuses interagissant avec des ions.

La contribution des interactions ioniques membrane-soluté sur la sélectivité de la membrane ne peut pas toujours être négligée par rapport au mécanisme d'exclusion stérique, notamment dans le cas des techniques de filtration sélective pour lesquelles le seuil de coupure des membranes utilisées est de l'ordre du nanomètre (nanofiltration).

Les solutés chargés de la solution se comportent comme des co-ions ou des contre-ions vis à vis de la membrane, selon qu'il sont de signe identique ou opposé aux groupes chargés de cette dernière. ³

II.4.3 Facteurs limitants

Au cours du procédé de filtration tangentielle, il apparaît deux paramètres qui vont limiter le fonctionnement et la productivité de l'opération :

- La polarisation de concentration
- Le colmatage

Ces deux phénomènes ont pour principales conséquences une modification de la perméabilité et de la sélectivité de la membrane, et donc une évolution des performances de l'opération de filtration.

1

2 **En savoir plus : Cf annexe : Loi de Ferry**

3

II.4.3.1 La polarisation de concentration

Ce phénomène apparaît suite à l'accumulation de matière à proximité de la surface de la membrane. Cette polarisation de concentration est causée par le gradient de pression transmembranaire qui entraîne le transfert convectif des particules présentes en solution vers la membrane, dont la rétention à sa surface est plus ou moins importante. De ce fait, il s'établit un gradient de concentration dans la zone comprise entre la surface de la membrane et la veine liquide. Cliquer ici ¹ pour visualiser l'animation.

L'épaisseur de cette couche est le résultat du bilan entre l'apport convectif de matière vers la membrane et le retour par diffusion dans la veine liquide. Cependant, ce phénomène de polarisation est totalement réversible, puisqu'il disparaît lorsque le gradient de pression transmembranaire s'annule.

A l'équilibre, l'épaisseur de la couche de polarisation se rapproche de l'épaisseur de la couche limite hydrodynamique.

Le phénomène de polarisation peut entraîner l'apparition du phénomène de colmatage du fait d'un changement ou d'une modification des conditions physico-chimiques locales.

II.4.3.2 Le colmatage

Le phénomène de colmatage se produit suite à l'accumulation de matière dans la membrane. Le colmatage est en fait une conséquence du phénomène de polarisation de concentration, qui est donc, pour différentes raisons, précurseur du colmatage. En effet, au-delà d'une certaine valeur critique de concentration des constituants à la surface de la membrane, il peut se produire une insolubilisation des matières minérales (formation de tartre) ou bien une dénaturation et une gélification des protéines.

On peut distinguer :

- Le colmatage externe, qui se forme à la surface de la membrane.
- Le colmatage interne, qui se situe à l'intérieur de la structure poreuse de la membrane. Cliquer ici ² pour visualiser l'animation.

1

2

Le degré de réversibilité du colmatage est défini par rapport aux moyens nécessaires mis en oeuvre pour le faire disparaître lors du nettoyage des installations. Pour cela, il convient de distinguer entre **le colmatage irréversible**, qui nécessite l'action de détergents et d'agents chimiques, et **le colmatage réversible**, qui s'élimine au rinçage par action mécanique en augmentant la vitesse de circulation du fluide.

II.4.3.3 Conséquences des facteurs limitants

II.4.3.3.1 *Sur la perméabilité*

Cliquer ici ¹ pour visualiser l'animation.

II.4.3.3.2 *Sur la sélectivité*

Cliquer ici ² pour visualiser l'animation.

1

2

III CONDUITE DE LA FILTRATION TANGENTIELLE

III.1 INFLUENCE DES PARAMÈTRES

III.1.1 Vitesse de circulation et pression transmembranaire

Les paramètres prépondérants sur la densité de flux de perméat sont :

- La pression transmembraire PT.
- La force d'érosion ou taux de cisaillement tangentiel à la paroi, τ_w , qui apparaît en réaction à la vitesse de circulation du fluide v. ¹

III.1.2 Température de fonctionnement

Le choix de la température de travail au cours d'une opération de filtration résulte d'un compromis entre plusieurs facteurs :

- La viscosité du fluide ²
- La résistance physico-chimique de la membrane de filtration ³
- Le développement de microorganismes ⁴
- La thermosensibilité des constituants du produit à traiter ⁵

1

2 En savoir plus : Cf annexe : La viscosité du fluide

3 En savoir plus : Cf annexe : La résistance physico-chimique de la membrane de filtration

4 En savoir plus : Cf annexe : Le développement de microorganismes

5 En savoir plus : Cf annexe : Thermosensibilité des constituants du produit à traiter

III.2 COMPOSITION DES FRACTIONS

III.2.1 Bilan matière

Cliquer ici ¹ pour visualiser l'animation.

En pratique, au cours de la filtration d'un liquide alimentaire, les constituants à séparer et/ou à concentrer sont plus ou moins retenus par la membrane selon ses caractéristiques de sélectivité.

Pour simplifier les calculs, nous allons supposer ici le cas d'une membrane idéale pour laquelle les constituants du liquide traités sont totalement retenus (**TR = 100%**) ou bien traversent librement (**TR = 100%**) la membrane pour se retrouver dans le perméat. ²

III.2.2 Exemple

L'animation suivante permet d'illustrer la démarche suivie pour réaliser le bilan matière au cours d'une opération de filtration membranaire.

3

III.2.3 Cas de la diafiltration

La diafiltration consiste à introduire de l'eau au cours d'une des étapes de filtration lors d'un procédé à plusieurs étages. L'obtention de macromolécules de haut degré de pureté requiert l'introduction d'une étape de diafiltration dans le procédé global de filtration, qui

1

2

3

peut être appliquée sur tout type de module, en fonctionnement continu ou discontinu. ¹

Le calcul des compositions des fractions et le bilan matière se font de la même manière que dans le cas d'un procédé de filtration classique, à condition de tenir compte de la quantité d'eau ajoutée.

L'animation suivante permet d'illustrer le cas particulier de la diafiltration. ²

III.3 PILOTAGE D'UNE INSTALLATION

Sur l'installation présentée ci-après, on peut observer l'importance de l'ouverture et de la fermeture des vannes sur les conditions de fonctionnement de l'équipement, c'est à dire plus précisément sur la pression transmembranaire (PT) et sur la perte de charge due à l'écoulement dans la membrane (ΔP).

Cliquer ici ³ pour visualiser le fonctionnement d'une installation de filtration tangentielle.

D'une part, le réglage de la vanne de sortie du concentré permet de régler la pression transmembranaire (PT) :

PT = pression moyenne du côté rétentat - pression moyenne du côté perméat, soit :

$$PT = \frac{(\text{pression d'entrée} + \text{pression de sortie du côté concentré})}{2} - \text{pression dans le perméat}$$

Dans ce cas, la pression côté perméat est égale à la pression atmosphérique puisqu'il n'y a pas vanne de contre-pression dans ce circuit.

Si nous ouvrons la vanne de sortie du concentré, la pression transmembranaire diminue. Au contraire, si nous fermons un peu cette vanne, la pression transmembranaire augmente.

D'autre part, si nous agissons sur la vanne de réglage du taux de recyclage, nous agissons

1

2

3

sur la perte de charge due à l'écoulement dans la membrane (ΔP) :

$\Delta P = \text{Pression d'entrée} - \text{Pression de sortie du côté concentré.}$

En ouvrant cette vanne, le débit de recyclage dans la membrane augmente, et par conséquent la perte de charge augmente aussi. Au contraire, si nous fermons cette vanne, on réduit le débit et la perte de charge dans la zone de recyclage. Il est important d'optimiser ce réglage pour adapter le fonctionnement de l'équipement aux caractéristiques (viscosité) du fluide traité.

III.4 VITESSE DE CIRCULATION ET PRESSION TRANSMEMBRANAIRE

Les paramètres prépondérants sur la densité de flux de perméation sont :

- La pression transmembraire PT.
- La perte de charge, proportionnelle à la vitesse de circulation du fluide v , et qui conditionne la contrainte de cisaillement tangentiel à la paroi, τ_w . La valeur de τ_w est représentative de l'érosion des dépôts à la membrane. ¹

IV MATÉRIEL DE FILTRATION

IV.1 MEMBRANES

IV.1.1 Structure

Les premières membranes de filtration étaient composées de matériaux de **structure homogène ou isotrope**. Ces membranes étaient donc constituées d'une unique couche active. Les inconvénients de ce type de structure monocouche sont une faible résistance mécanique ainsi qu'une variation de la perméabilité de la membrane au cours d'une filtration.

Aujourd'hui, la majorité des membranes utilisées industriellement dans les techniques de filtration sélective sont des membranes asymétriques (anisotropes) dont la structure composite varie de la surface de la membrane vers l'intérieur. Elles sont souvent constituées de **deux couches superposées**¹ :

Une sous-couche de 100 à 200 μm d'épaisseur

Cette sous-couche, dite **support mécanique**, permet de soutenir mécaniquement la membrane proprement dite (couche filtrante). Sa structure est relativement poreuse, ce qui permet d'obtenir un flux de perméation élevé.

Une couche filtrante

C'est un film semi-perméable très fin de 10 à 100 nm d'épaisseur.

Les propriétés de séparation de ces membranes dépendent exclusivement des **propriétés de la couche active** .

La perméabilité (densité de flux de perméation) est notamment inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche filtrante. On cherche par conséquent à diminuer cette épaisseur dans les membranes asymétriques.

1 En savoir plus : Cf annexe : Deux couches

IV.1.2 Nature chimique

IV.1.2.1 Organique (2ème génération)

La majorité des membranes installées dans l'industrie agroalimentaire sont de nature organique. Elles sont constituées de matériaux ou composés de synthèse dont la base est le carbone, l'hydrogène et l'oxygène (polymères organiques).

Ils peuvent être de deux types :

- A base de polysulfones ¹
- A base de polymères fluorés ²

IV.1.2.2 Minérale (3ème génération)

Les membranes minérales, dites de troisième génération, sont constituées de matériaux **entièrement minéraux**, tels que la silice, l'aluminium, le zircon ou le titane. Ces matériaux sont obtenus par synthèse chimique.



A l'origine, le développement des **membranes minérales** a été mené dans le cadre des recherches de l'industrie nucléaire.

1 En savoir plus : Cf annexe : Membranes à base de polysulfones

2 En savoir plus : Cf annexe : Membranes à base de polymères fluorés

Ces membranes sont de structures asymétriques car elles utilisent un support mécanique à base de céramique ou de carbone sur lequel est déposé un nombre variable de couches filtrantes de **nature minérale**¹.

1 En savoir plus : Cf annexe : Nature minérale

Avantages	Inconvénients
Résistent à des valeurs de pH extrêmes (0-14)	Matériaux très coûteux
Supportent les températures de stérilisation	Volume mort très important, étant donné sa configuration tubulaire et le diamètre des canaux de perméat et de concentré.

IV.1.3 Géométrie des modules

IV.1.3.1 Critères de choix

Les critères de sélection d'un module de filtration sont :

- **Le type de régime d'écoulement du fluide.**

- **La compacité.**

Elle s'exprime par le rapport de la surface de membrane installée et du volume de l'installation. A titre d'exemple, ce rapport est de $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ et de $300 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ pour les membranes organiques spirales et planes, respectivement.

- **La facilité de démontage et de remplacement des membranes défectueuses.**
- **Le volume mort de l'installation, exprimé en $L \cdot m^{-2}$**
- **La facilité de nettoyage.**

Dans l'alimentaire, les modules doivent être nettoyables et stérilisables, dans certains cas par la vapeur.

- **Les aspects sanitaires.**

La conception du module doit éviter l'existence de zones mortes susceptibles de s'encrasser et de favoriser le développement de microorganismes (biofilms, etc.). En ce qui concerne le contact avec les aliments, les matériaux utilisés doivent être autorisés par la réglementation.

- **La réponse aux exigences du procédé global sur le plan qualitatif.**

Les conditions de fonctionnement ne doivent pas altérer la qualité du produit, et l'ensemble module/membrane doit pouvoir fonctionner dans ces conditions (viscosité, température, présence de particules abrasives, pH, compatibilité avec les solutions de nettoyage, maintien de la sélectivité de séparation).

- **Le coût d'investissement initial.**

Il comprend notamment la maintenance, le remplacement des membranes, le nettoyage et le coût énergétique du procédé.

IV.1.3.2 Type de modules

IV.1.3.2.1 Modules plans

Ce type de configuration est le plus simple et le plus ancien. Il peut se présenter sous forme de plaques unitaires ou sous forme de cartouche.



Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

Un des paramètres les plus importants à prendre en compte lors du dimensionnement d'un module plan est la distance entre deux membranes adjacentes, qui détermine la largeur de passage du concentré.

- Une **distance réduite** implique une préfiltration des solutions, entraîne des difficultés de nettoyage et est peu adaptée aux produits visqueux.
- Une **distance élevée** implique que le module présente un volume mort accru ainsi qu'un coût énergétique supérieur (dimensionnement de la pompe de circulation).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Système modulaire pouvant être modifié relativement facilement par l'industriel.- Grande facilité d'accès et d'échange des membranes.- Visualisation possible du perméat issu de chaque membrane, qui permet de détecter facilement une éventuelle détérioration des membranes.	<ul style="list-style-type: none">- Système peu compact : de 100 à 400 m² par m³- Investissement relativement important

IV.1.3.2.2 Modules tubulaires

Ces modules sont constitués de tubes poreux sur lesquels est déposée la couche filtrante (membrane). Le choix du diamètre des tubes résulte d'un compromis entre la

consommation d'énergie, qui augmente avec le diamètre, et le coût de fabrication, qui diminue avec le diamètre.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

Il existe plusieurs variantes dans ce type de configuration, comme par exemple :

- Les modules multitubulaires

Les différentes membranes tubulaires sont montées en parallèle dans un même carter.

- La configuration de type monolithe ¹

Avantages	Inconvénients
Simplification des prétraitements. Les tubes ayant des diamètres relativement importants, ils peuvent accepter des fluides relativement chargés en particules.	Coût énergétique élevé, puisque pour éviter les risques de colmatage, il est recommandé d'utiliser des taux de cisaillement importants aux parois. En outre le régime d'écoulement est turbulent.
Simplicité de nettoyage.	Faible compacité, comprise entre 10 et 300 m ² pour m ³ .
Simplicité de la technologie, du remplacement et de l'installation des membranes.	Volume mort important.
Faible colmatage.	Prix élevé des membranes (minérales).

IV.1.3.2.3 Modules spirales

¹ En savoir plus : Cf annexe : La configuration de type monolithe

Dans ce type de configuration, des membranes d'origine planes sont enroulées autour d'un tube perforé et creux destiné à collecter le perméat.

Une grille plastique d'épaisseur variable est installée entre deux feuilles de membranes pour créer un écoulement turbulent dans la veine de fluide.

Pour pouvoir exercer la pression nécessaire au procédé, les rouleaux de membranes ¹ sont insérés dans un carter de géométrie tubulaire.

Un ensemble de joints permet à chaque extrémité de séparer les circuits perméat et rétentat.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Système modulaire pouvant être modifié relativement facilement par l'industriel- Facilité d'échange des membranes- Compacité élevée: de 300 à 1000 m² par m³- Coût d'investissement relativement réduit- Faible consommation énergétique	<ul style="list-style-type: none">- Bonne adaptabilité aux produits visqueux- Flux faible- Perte de charge élevée, qui provoque un gradient de pression transmembraire le long du tube collecteur de perméat- Existence de zones mortes- Tendance forte au colmatage- Nettoyage difficile

IV.2 EQUIPEMENT

IV.2.1 Système discontinu

Un équipement discontinu (batch) est un système de filtration qui traite un volume fini de produit. Généralement, la totalité du produit est placée au début de l'opération dans le réservoir d'alimentation. Le seul débit de sortie est le filtrat (perméat), la fraction retenue étant recyclée dans le réservoir d'alimentation.

1 En savoir plus : Cf annexe : Rouleaux de membranes



La composition du produit d'alimentation varie pendant l'opération de filtration : il se concentre. Le facteur de réduction volumique (FRV) exprime la réduction de volume de produit traité. Il est défini comme le rapport du volume d'alimentation initial (V_I) et du volume de concentré (rétentat) à l'instant t (V_R) :

$$FRV = \frac{V_I}{V_R}$$

Il existe deux types de systèmes discontinus :

- Simple.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

- A recyclage partiel du rétentat.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

Le principal avantage des systèmes à recyclage par rapport au mode discontinu simple est la réduction du volume mort de l'installation et de la puissance installée.

Au cours d'une filtration discontinue simple, l'alimentation et la circulation du produit dépendent d'une seule et même pompe. Cette pompe requiert une forte puissance et une capacité à compenser une perte de charge éventuellement importante.

A l'inverse, dans un système avec recirculation, on utilise deux pompes, une pour l'alimentation de la boucle et l'autre pour la recirculation du rétentat dans celle-ci. La puissance de chacune de ces pompes est ainsi limitée (puissance totale installée plus faible), ainsi que le volume mort de la boucle (dont dépend le temps de séjour du produit dans l'installation).

IV.2.2 Système continu

Au cours d'une filtration en mode continu, le fluide d'alimentation arrive de manière continue dans le réservoir d'alimentation, où sa composition reste alors constante. Il y a en outre deux débits de sortie, l'un correspondant au perméat et l'autre au rétentat.



En système continu, le facteur de réduction volume s'exprime non plus par le **rapport des volumes**¹ mais par le rapport des débits d'alimentation (Q_A) et de rétentat sortant (Q_R).

$$FRV = \frac{Q_A}{Q_R}$$

1 En savoir plus : Cf annexe : Formule

Pour ce mode de fonctionnement, les bilans peuvent être **instantanés** (rapport des débits volumiques) ou **totaux** (rapport du volume initial et du rétentat final). Les modules continus avec recyclage partiel du rétentat sont les plus couramment utilisés.

Module continu avec boucle de recirculation.

La concentration du fluide d'alimentation est généralement constante dans le temps. Les concentrations du perméat et du concentré dépendent des conditions opératoires et de la durée de filtration.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

Le système continu dit « multiétages » est un cas particulier du mode continu à recyclage. Ce type de procédé à plusieurs étages est fréquemment utilisé à l'échelle industrielle, car il permet l'installation d'importantes surfaces de filtration et par conséquent le traitement de volumes importants de produit.

Système continu multiétages .

Ses principaux avantages sont :

- Par rapport au procédé à un seul étage, les rendements obtenus avec une même surface totale filtrante sont meilleurs. Ceci est dû au fait qu'en disposant plusieurs étages successifs, l'augmentation de la concentration se fait progressivement, de sorte qu'on travaille à des faibles concentrations dans les premiers étages avec des flux de perméat relativement importants, et c'est seulement lors de la dernière étape que la filtration se déroule à la concentration finale de sortie et donc au flux de perméat minimum. Par conséquent, le débit total de perméation obtenu est plus important.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

- En général, les systèmes continus permettent de réduire de manière sensible le temps de séjour moyen du produit dans l'équipement, ce qui limite les risques de dégradations mécaniques et thermiques (perte d'activité ou dénaturation des composants) et de contamination microbienne du milieu à traiter.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

L'animation suivante présente un exemple d'installation industrielle de filtration continue à système multiétages.

1



1

V APPLICATIONS

V.1 MICROFILTRATION

La taille des pores utilisée en microfiltration varie entre 0.1 et 10 μm . Ces dimensions sont de l'ordre de grandeur de la plupart des bactéries et des globules gras du lait, ainsi que d'une partie des caséines.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

La microfiltration a les applications suivantes :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

V.2 ULTRAFILTRATION

L'ultrafiltration a les applications suivantes :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

V.3 NANOFILTRATION

La nanofiltration a les applications suivantes :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

V.4 OSMOSE INVERSE

L'osmose inverse a les applications suivantes :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE : Loi de Ferry

La loi de Ferry définit le taux de rétention T_R d'une membrane pour un soluté par :

$$T_R = [1 - (1 - \lambda)^2]^2$$

où $\lambda = \frac{R_s}{R}$, avec R_s le rayon moyen du soluté considéré et R le rayon moyen des pores de la membrane.

1

On définit le taux de rétention apparent par :

$$T_R = X_c - \frac{X_p}{X_c}$$

avec : X_c la concentration du soluté dans le rétentat

et X_p la concentration du même soluté dans le filtrat (perméat).

ANNEXE : La viscosité du fluide

La viscosité d'un fluide diminue lorsque la température augmente. Par conséquent, d'après la loi de Darcy, il est possible d'augmenter la densité de flux de perméation et ainsi d'améliorer la productivité de la filtration en fonctionnant à une température plus élevée.

1

ANNEXE : La résistance physico-chimique de la membrane de filtration

Cependant, l'augmentation de la température de fonctionnement est limitée. En effet, les membranes sont sensibles à la température, la chaleur favorisant la dégradation chimique et mécanique des matériaux constitutifs de la membrane. Cette sensibilité à la chaleur dépend fortement du type de membrane utilisé.

ANNEXE : Le développement de microorganismes

L'augmentation de la température de fonctionnement de l'opération de filtration doit également rester dans une plage de température où le développement microbien est limité. En effet, la croissance bactérienne dépend fortement de la température du milieu, chaque type de microorganisme étant caractérisé par une température optimale de développement pour laquelle son taux de croissance est maximal, une température maximale (le m.o. ne survit pas à des températures supérieures) et une température minimale (au dessous de laquelle le m.o. est incapable de se reproduire).

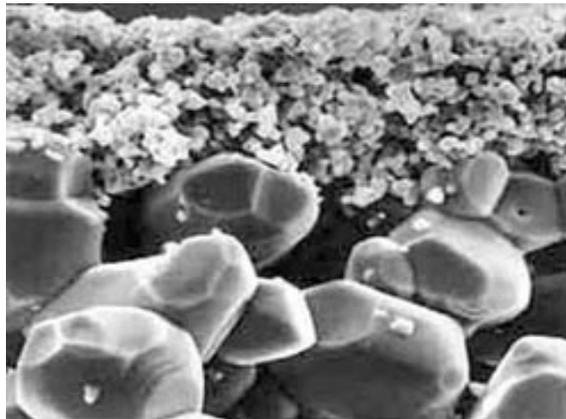
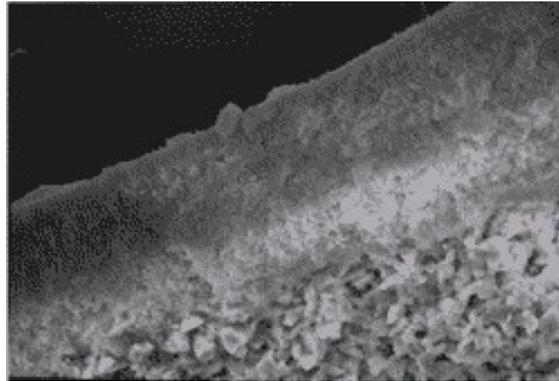
ANNEXE : Thermosensibilité des constituants du produit à traiter

L'action de la chaleur sur les composants du lait et des produits laitiers a pour conséquences principales :

- Altération des constituants et de leurs propriétés fonctionnelles, organoleptiques et/ou nutritionnelles. On peut citer ainsi la dénaturation des protéines à des températures élevées, et leur interaction éventuelle avec des sucres réducteurs (réaction de Maillard). L'intensité de la dénaturation est fonction de la durée de chauffage du produit.
- Précipitation des constituants : sont concernés certaines protéines globulaires, et pour l'essentiel les phosphates de calcium.

ANNEXE : Deux couches

Le terme « asymétrique » fait référence au fait que ces membranes sont constituées de matériaux de nature et structure différentes :



ANNEXE : Membranes à base de polysulfones

Elles se caractérisent par la présence de groupes SO_2 relativement stables. La charge de la membrane dépend du pH de la solution filtrée, qui conditionne l'ionisation de ces groupements.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Bonne stabilité thermique - Supportent des pH compris entre 1 et 13, compatibles avec celui des solutions de nettoyage - Résistance à des concentrations allant jusqu'à 200 mg.l-1 en chlore actif, en fonction de la durée d'exposition et de la température.	<ul style="list-style-type: none">- Sensible au phénomène de colmatage. Problèmes d'adsorption, en particulier de protéines, difficiles à résorber (zones mortes) - Désinfection des modules difficiles à garantir, compte tenu de la résistance limitée des matériaux (colles notamment) aux oxydants.

ANNEXE : Membranes à base de polymères fluorés

Les polymères les plus employés sont le PVDF et le PTFE.

Avantages	Inconvénients
Bonne stabilité thermique	Perméabilité réduite, compte tenu du caractère hydrophobe de la membrane
Fortes stabilité et compatibilité vis à vis des agents chimiques	Obtention difficile de petits diamètres de pore

ANNEXE : Nature minérale

Exemple de couches filtrantes de nature minérale.

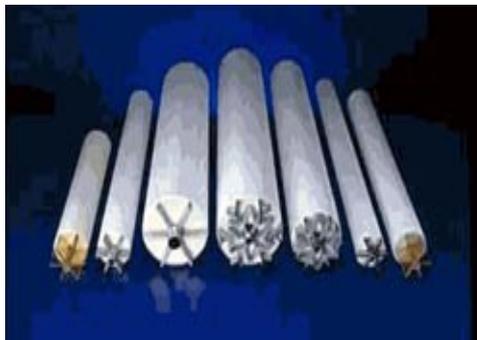
Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2

ANNEXE : La configuration de type monolithe



Différents canaux tubulaires montés en parallèle dans un même support (barreau).
Configuration spécifique aux membranes minérales.

ANNEXE : Rouleaux de membranes



ANNEXE : Formule

$$FRV = \frac{V_A}{V_R}$$

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.

ANNEXE :

Ce média est disponible sur la version en ligne du module de formation.