



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université 08 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie des procédés

Polycopié Pédagogique du Cours et des Exercices

Génie des Procédés Agro-Alimentaire 1 (GPAA 1)

Option :

Licence académique (LMD) en spécialité : Technologie Agro-Alimentaire et
Contrôle de Qualité (TAACQ)

Licence Professionnelle (LP) en spécialité : Procédés Alimentaire (PA)

Elaborée par :

Dr. KOUADRI Imane

Maître de Conférences Classe A

Année Universitaire 2023/2024

Préambule

Ce polycopié est un support pédagogique conforme au programme officiel enseigné ; constitué par des opérations unitaires en génie des procédés. C'est un travail personnel qui émane de ma propre expérience lors de mes activités pédagogiques dans le module de structure de la matière.

Le présent polycopié a été rédigé dans le but de permettre d'avoir un outil de travail et de référence recouvrant les connaissances qui leur sont demandés. Il est rédigé sous forme de cours détaillé, avec des applications résolues et des exercices supplémentaires non résolus. Il est présenté avec un style très simple qui permet aux étudiants une compréhension très rapide.

Public cible :

Ce polycopié de cours a été rédigé à l'intention des étudiants de 3^{ème} année en spécialité Technologie Agro-alimentaire et Contrôle de Qualité (TAACQ), 2^{ème} année en spécialité Procédés Alimentaire (PA) et même utilisé pour les étudiants 3^{ème} année Génie des procédés.

Pré-requis :

Afin que les étudiants comprennent et suivent le programme, qui est souvent nouveau pour eux, les étudiants doivent avoir des prérequis concernant les connaissances de base de thermodynamique, notions de transferts de chaleur et de matière et mécanique des fluides. Il est indispensable aussi de faire un rappel des notions fondamentales.

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif principal de ce cours est :

✓ De procurer à l'étudiant les bases théoriques des opérations unitaires (distillation, évaporation, cristallisation et les techniques de séparation membranaires) ainsi que les applications pratiques industrielles en mettant l'accent sur des applications en industries agroalimentaires.

✓ La bonne description d'un procédé et ses opérations unitaires.

✓ La maîtrise des mathématiques impliquées dans les notions de bilans.

✓ La capacité de réaliser des bilans de matière et thermiques pour des opérations unitaires et procédés.

Contenu de la matière :

Le contenu de ce polycopié s'articule autour de six chapitres :

✓ Le premier chapitre est consacré à la distillation

- ✓ Le deuxième chapitre se rapporte à l'évaporation
- ✓ Le troisième chapitre aborde la cristallisation
- ✓ Le quatrième chapitre traite la filtration
- ✓ Le cinquième chapitre est dédié aux séparations membranaires.
- ✓ Le sixième et le dernier chapitre est réservé au l'électrodialyse.

Chaque chapitre sera terminé à la fin par des exercices résolus et plus des autres supplémentaires non résolus.

Bien que l'élaboration de ce manuscrit soit faite avec le plus grand soin, il reste bien évidemment perfectible. Je remercie d'avance toute personne me rapportant des remarques ou commentaires.

Travaux dirigés :

Des travaux dirigés sur les différentes opérations unitaires :

TD 1 : Distillation

TD 2 : Evaporation

TD 3 : Cristallisation

Mode d'évaluation :

Examen Final : **60%**

Travaux Dirigés (Exposé, Micro-interrogation, Autres) : **40%**

Avant-Propos

Le génie des procédés concerne l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques nécessaires aux transformations physicochimiques et biologiques de la matière première en un produit formulé pour une valeur d'usage à l'adresse du consommateur.

Les opérations unitaires du génie alimentaire sont l'un des principaux paradigmes du génie des procédés. Il s'agit de découper les procédés en un enchaînement d'opérations élémentaires, l'enchaînement dépend de l'objectif du procédé et de la matière à transformer. L'intérêt du concept des opérations unitaires se manifeste dans la recherche des lois d'extrapolation et de dimensionnement ou pour l'établissement du schéma de circulation et d'obtenir des produits désirables avec une longue durée de conservation et un faible coût de production. C'est en outre le bon guide pour le développement d'étude technologique et d'appareillage. Les opérations unitaires de génie alimentaire peuvent être classées selon l'équipement du processus ou selon l'objectif. Les chapitres traités dans ce module sont répartis selon le classement des opérations unitaires.

Table des matières

Préambule
 Avant-Propos

Chapitre 1 : Distillation

Introduction	1
1. Rappel sur les équilibres liquide-vapeur.....	1
1.1. Les différents types de mélanges.....	1
1.2. Lois fondamentales.....	1
1.2.1. Titres et pression partielle	1
1.2.2. Pression de vapeur saturante	2
1.2.3. Loi de Dalton	2
1.2.4. Loi de Raoult.....	2
1.2.5. Volatilités	3
1.3. Diagrammes d'équilibre liquide-vapeur	3
1.3.1. Diagramme isotherme.....	4
1.3.2. Diagrammes isobares : $T - X$ ou Y	4
1.3.3. Diagramme isobare d'équilibre liquide-vapeur : $y = f(x)$	5
1.4. Influence de la pression sur la courbe d'équilibre.....	6
2. La distillation	6
2.1. Principe de distillation.....	6
2.2. Différents modes de distillation.....	7
2.2.1. Distillation simple.....	7
2.2.2. Distillation discontinue étagée (rectification discontinue).....	8
2.2.3. Distillation continue étagée.....	9
2.3. Construction de Mac Cabe et Thiele	10
2.3.1. Nombre d'étages théoriques NET pour un taux de reflux fixé R	14
2.3.2. Reflux total, NET_{min}	14
2.3.3. Reflux minimum	15
Série de TD 1.....	16

Chapitre 2 : Evaporation

1. Introduction.....	20
2. Vaporisation de l'eau : évaporation et ébullition	20
3. Définition de l'évaporation.....	21
4. Principe d'évaporation.....	21
5. Le but d'évaporation.....	22
6. Facteurs influençant l'évaporation.....	22
6.1. Concentration.....	22
6.2. Solubilité.....	22
6.3. Sensibilité à la température	22
6.4. Viscosité	23

6.5. Ecart de température.....	23
7. Evaporateur simple effet et équations bilans	23
7.1. Définition.....	23
7.2. Equations de bilan matière.....	23
7.3. Equations de bilan d'énergie	24
8. Evaporateur Multiple Effet	24
8.1. Principe de fonctionnement.....	25
8.2. Les différents types d'évaporation multiples effet.....	25
8.2.1. Evaporation triple effet à co-courant	25
8.2.2. Evaporation triple effet à contre-courant	26
8.2.3. Evaporation triple effet à alimentations parallèles.....	26
8.3. Équations bilans des matières et énergétiques.....	27
8.3.1. Cas Arrangement en contre-courant	27
8.3.2. Cas Arrangement en co-courant.....	27
Série de TD 2	29

Chapitre 3 : Cristallisation

Introduction	31
1. Définition	31
2. Les types de cristallisation.....	31
3. La cinétique de cristallisation.....	32
3.1. La courbe de solubilité.....	33
3.2. Exemples de lectures sur la courbe de solubilité.....	34
3.3. Taux de saturation (τ).....	34
4. Bilans matière et énergétique.....	35
4.1. Bilans de matière.....	35
4.1.1. Cristallisation standard sans recyclage	36
4.1.2. Cristallisation avec recyclage	36
4.2. Bilan énergétique.....	37
Série de TD 3	39

Chapitre 4 : La filtration

1. Définition	42
2. Principe de la filtration	42
3. Méthode de filtration.....	43
3.1. Filtration gravimétrique (filtration par gravité).....	43
3.1.1. Principe	43
3.1.2. Montage	44
3.2. Filtration sous vide	44
3.3. Filtration sous pression.....	46
3.4. Filtration centrifuge	46
4. Types de filtration	46
4.1. Filtration sur gâteau.....	47

4.2. Filtration à lit profond.....	47
5. Réalisation d'une filtration	47
6. Exemples d'application	47
7. Débit de filtration.....	48
8. Equation générale de fonctionnement d'un filtre sur support	48
8.1. Filtration à débit constant.....	49
8.2. Filtration à pression constante.....	49
8.3. Compressibilité du gâteau.....	49
9. Technologie des filtres.....	50
9.1. Filtres discontinus.....	50
9.1.1. Filtres à sable.....	50
9.1.2. Filtres à cartouches.....	50
9.1.3. Filtres – presses.....	51
9.2. Filtres continus.....	52
9.2.1. Filtres rotatifs à tambour sous vide.....	52
9.2.2. Filtres rotatifs à tambour sous pressions.....	53

Chapitre 5 : Les séparations membranaires

1. Introduction.....	54
2. Définition	54
3. Classement des différentes techniques membranaires.....	54
3.1. Les techniques membranaires à gradient de pression.....	55
3.1.1. La microfiltration.....	56
3.1.2. L'ultrafiltration	57
3.1.3. La nanofiltration	57
3.1.4. L'osmose inverse	58
3.2. Technique membranaire à gradient de potentiel électrique.....	59
4. Classification des membranes.....	59
4.1. Définition.....	59
4.2. Classification des membranes:	60
4.2.1. Classification d'après le mécanisme de séparation.....	60
4.2.2. Classification d'après la morphologie	62
4.2.3. Classification d'après la géométrie de préparation des membranes	63
4.2.4. Classification d'après la nature chimique	64
4.3. Performances des membranes	65
4.3.1. Perméabilité.....	65
4.3.2. Résistance.....	66
4.3.3. Durée de vie	66
4.3.4. Taux de conversion	66
4.3.5. Sélectivité	66
4.3.6. Taille des pores	67
4.3.7. La porosité membranaire.....	67
4.3.8. Seuil de coupure.....	67
5. Différents types de géométrie des modules membranaires	67

5.1. Définition.....	67
5.2. Les modules tubulaires.....	67
5.3. Les modules fibres creuses.....	68
5.4. Les modules plans.....	69
5.5. Les modules spiralés.....	69
6. Matériaux de fabrication.....	69
7. Mise en œuvre des membranes.....	70
7.1. Écoulement frontal.....	70
7.2. Écoulement tangentiel.....	71
8. Les avantages et les inconvénients des procédés membranaires.....	71
8.1. Avantages.....	71
8.2. Inconvénients.....	72
9. Applications industrielles.....	72

Chapitre 6 : Electrodialyse

1. Introduction.....	74
2. La dialyse.....	74
3. Les membranes échangeuses d'ions.....	74
3.1. Les membranes échangeuses de cation (membranes cationiques).....	75
3.2. Les membranes échangeuses d'anions (membranes anioniques).....	75
3.3. Les membranes bipolaires.....	75
4. L'électrodialyse.....	76
4.1. Définition.....	76
4.2. Principe de l'Electrodialyse.....	76
4.3. Les variantes de l'électrodialyse.....	77
4.3.1. Electrodialyseur à trois compartiments (trois circuits).....	77
4.3.2. Electrodialyseur à quatre compartiments (quatre circuits).....	78
5. L'électrodialyse et ses nombreuses applications.....	78
5.1. Électrodialyse conventionnelle.....	78
5.1.1. Définition.....	78
5.1.2. Applications de l'électrodialyse conventionnelle.....	78
5.2. Électrodialyse bipolaire.....	79
5.2.1. Principe et définition.....	79
5.2.2. Applications de l'électrodialyse bipolaire.....	80
Références Bibliographiques.....	81

Chapitre 1: Distillation

Introduction

La distillation est l'une des méthodes de séparation les plus importantes dont dispose le génie des procédés. La distillation est une opération de transfert de matière ayant pour but de séparer les constituants d'un mélange liquide, homogène ou hétérogène. Elle se base sur la différence de volatilité entre ces constituants. C'est l'une des opérations de séparation les plus employées dans le domaine de l'agroalimentaire, la chimie et de la pétrochimie.

1. Rappel sur les équilibres liquide-vapeur

1.1. Les différents types de mélanges

Les différents mélanges de liquide peuvent être classés, d'après le nombre de leurs constituants, en mélanges binaires, ternaires...etc. Les mélanges binaires, qui ont été les plus étudiés, seront seuls considérés ici. On distingue deux grandes familles, d'après la solubilité réciproque des constituants :

- a) Les mélanges homogènes :** Les deux constituants sont miscibles en toutes proportions.
- b) Les mélanges hétérogènes :** Les deux constituants sont partiellement miscibles ou totalement immiscibles. Ces deux familles se subdivisent en deux classes :

✓ **Les mélanges zéotropes :** Mélanges dits normaux qui n'ont pas de point d'ébullition fixe donc une composition de la phase vapeur toujours différente de la phase liquide.

✓ **Les mélanges azéotropes :** Mélanges dits anormaux qui forment un azéotrope c'est à dire un liquide dont la composition de la phase liquide est identique à celle de la phase vapeur, ce qui se traduit par un point d'ébullition fixe sous une pression donnée (comme avec un corps pur) ce qui ne permet pas sa séparation par distillation ordinaire.

1.2. Lois fondamentales

1.2.1. Titres et pression partielle

Les teneurs d'un mélange se définissent dans les opérations de transfert de matière par les titres :

Le titre massique : c'est le rapport de la masse d'un constituant à la masse totale du mélange.

$$W_i = \frac{m_i}{m_T} \dots \dots \dots (1)$$

W_i : titre massique du constituant i ;

m_i : masse du constituant i ; **m_T :** masse totale du mélange.

Le titre molaire : c'est le rapport du nombre de moles d'un constituant au nombre de moles total du mélange.

$$x_i(y_i) = \frac{n_i}{n_T} \dots \dots \dots (2)$$

Avec :

n_i : nombre de moles du constituant ; n_T : nombre de moles total du mélange ; x_i : titre molaire du constituant i dans la phase liquide ; y_i : titre molaire du constituant i dans la phase gazeuse ou vapeur.

1.2.2. Pression de vapeur saturante

Quand une vapeur et un liquide sont en équilibre (le nombre de molécules qui s'échappent du liquide (vaporisation) est égal au nombre de molécules qui retournent dans le liquide (condensation), la pression développée par la vapeur est appelée pression de vapeur saturante. Elle ne dépend que de la nature du liquide et de sa température.

1.2.3. Loi de Dalton

La loi de Dalton s'applique aux gaz et aux vapeurs sans tenir compte du liquide au contact de la vapeur. On peut l'énoncer de la manière suivante :

$$P_T = \sum_i^n P_i \dots \dots \dots (3)$$

P_i : pression partielle du constituant i ; n : nombre de constituants du mélange ; P_T : pression totale du mélange.

D'après la loi des gaz parfaits $PV = nRT$, la loi de Dalton peut s'écrire aussi en faisant intervenir le titre molaire :

$$P_i = y_i P_T \dots \dots \dots (4)$$

Pour un mélange binaire contenant deux gaz parfaits A et B, la pression totale est donnée par la relation suivante :

$$P_T = P_A + P_B$$

Avec :

$$P_A = y_A P_T; P_B = (1 - y_A) P_T \dots \dots \dots (5)$$

1.2.4. Loi de Raoult

Cette loi est applicable que pour les solutions idéales, c'est à dire les solutions dont les forces intermoléculaires sont identiques ou nulles quel que soit la composition. Cette loi permet d'exprimer la proportionnalité, pour une température et une pression donnée, entre la phase vapeur et les compositions de la phase liquide comme suit :

$$P_i = x_i P_i^\circ \dots \dots \dots (6)$$

Avec : P_i° : la pression de vapeur du constituant i.

Pour un mélange binaire : $P_A = x_A P_A^\circ \dots \dots \dots (7)$

$$P_B = (1 - x_A) P_B^\circ \dots \dots \dots (8)$$

En combinant la loi de Raoult et la loi de Dalton, on peut écrire :

$$P_T = x_A P_A^\circ + (1 - x_A) P_B^\circ \dots \dots \dots (9)$$

1.2.5. Volatilités

La volatilité désigne la plus ou moins grande facilité de vaporisation d'une substance. On distingue la volatilité absolue et la volatilité relative.

1.2.5.1. Volatilité absolue (V)

Elle est définie comme le rapport entre la pression partielle, à l'équilibre, de la substance, dans la phase vapeur et le titre molaire de la substance dans la phase liquide.

$$V_i = \frac{P_i}{x_i} \dots \dots \dots (10)$$

Dans le cas d'un corps pur, la volatilité absolue est égale à la pression de vapeur saturante car $x_i = 1$.

1.2.5.2. Volatilité relative (α)

Dans un mélange liquide renfermant deux composants i et j, elle est définie comme le rapport entre les volatilités absolues de chaque composant dans le mélange liquide. Elle est exprimée généralement par rapport à la plus grande volatilité, de sorte que sa valeur est supérieure à l'unité.

$$\alpha = \frac{V_i}{V_j} = \frac{P_i x_j}{P_j x_i} \dots \dots \dots (11)$$

En exploitant la loi de Dalton on obtient :

$$\alpha = \frac{y_i x_j}{y_j x_i} \dots \dots \dots (12)$$

1.3. Diagrammes d'équilibre liquide-vapeur

Pour un tel système, mélange binaire liquide-vapeur, il existe trois diagrammes :

- Diagramme isotherme (T fixée) : $P = f(x_A \text{ ou } y_A)$;
- Diagramme isobare (P fixée) : $T = f(x_A \text{ ou } y_A)$;

- Diagramme isobare (P fixée) : $y_A = f(x_A)$.

1.3.1. Diagramme isotherme

A partir des relations précédentes on aboutit à la relation qui permet de tracer le digramme $P_T = f(x_A, y_A)$.

On a :
$$P_T = x_A P_A^\circ + (1 - x_A) P_B^\circ \dots \dots \dots (13)$$

Donc:

$$x_A = \frac{P_T - P_B^\circ}{P_A^\circ - P_B^\circ} \dots \dots \dots (14)$$

Sachant que:
$$P_T = \frac{P_A x_A}{y_A} \dots \dots \dots (15)$$

On obtient:
$$P_T = \frac{P_A^\circ P_B^\circ}{P_A^\circ - y_A (P_A^\circ - P_B^\circ)} \dots \dots \dots (16)$$

C'est une équation d'une hyperbole.

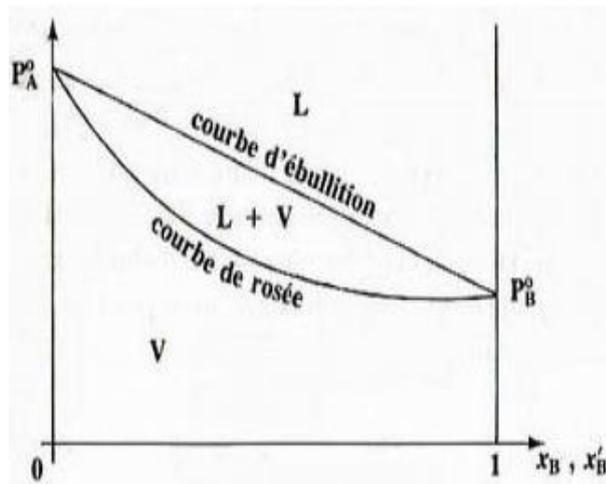


Figure 1 : Exemple d'un diagramme isotherme.

1.3.2. Diagrammes isobares : T – X ou Y

Il est d'usage, en distillation, de fixer la composition d'un mélange liquide binaire par son titre molaire X en constituant le plus volatil et celle d'une vapeur par le titre molaire Y en même constituant. Par détermination expérimentale de la température d'ébullition commençante de différents mélanges de composition connue, on trace la courbe qui représente la variation de cette température en fonction du titre x du liquide. Cette courbe dite isobare d'ébullition qui permet de connaître la composition du mélange qui bout à une température donnée. L'isobare de rosée représente à pression constante la variation de la température de rosée (condensation) en fonction du titre molaire en composé volatil dans la phase vapeur.

Courbe de rosée $T = f(y)$: $\frac{1}{P_T} = \frac{1}{P_A^\circ} y_A + \frac{1}{P_B^\circ} (1 - y_A) \dots \dots \dots (17)$

Courbe d'ébullition $T = f(x)$: $P_T = P_A^\circ x_A + P_B^\circ (1 - x_A) \dots \dots \dots (18)$

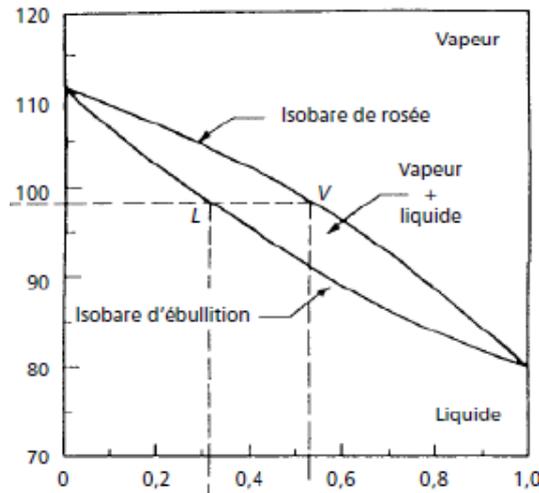


Figure 2 : Exemple d'une courbe d'équilibre isobare d'un mélange binaire.

Analyse du graphe : Considérons un mélange binaire de titre molaire x_1 , en le chauffant, le mélange sera liquide jusqu'à la température T_1 , correspondant au point L. Puis ce mélange entrera en ébullition à la température T et la première bulle de vapeur émise à cette température correspondant au point V aura pour titre molaire y_1 .

1.3.3. Diagramme isobare d'équilibre liquide-vapeur : $y = f(x)$

Ce diagramme est le plus utilisé dans le domaine de la distillation. Ce diagramme peut être construit en utilisant la relation :

$$y = \frac{\alpha x}{(\alpha - 1)x + 1} \dots \dots \dots (19)$$

C'est l'équation d'une hyperbole, dépend de la nature du mélange, de la température et de la pression.

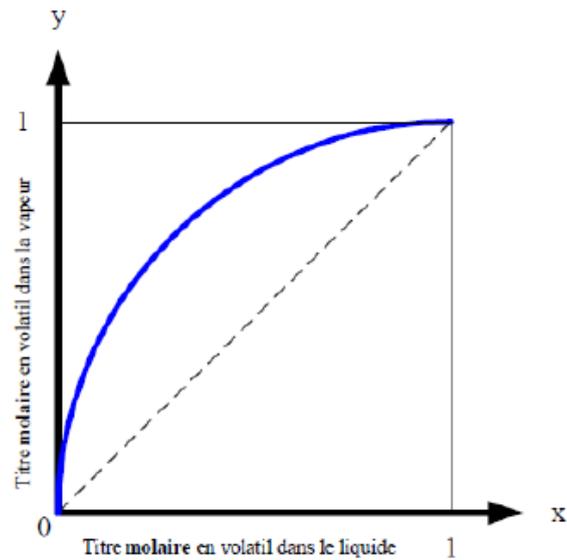


Figure 3 : Courbe d'équilibre d'un mélange homozyéotrope.

1.4. Influence de la pression sur la courbe d'équilibre

Plus la pression est faible plus la volatilité relative α est grande et donc la courbe s'éloigne de la diagonale. A la pression critique $\alpha = 1$, donc la séparation par distillation est impossible.

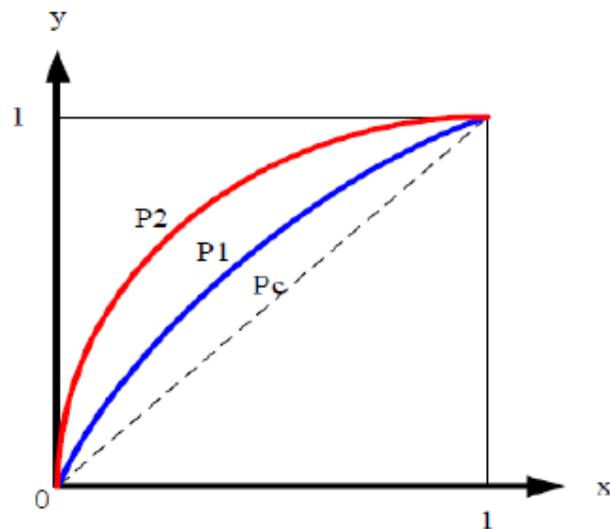


Figure 4 : Influence de la pression sur la courbe d'équilibre.

$$(P_2 < P_1 < P_c \text{ (Pression critique)})$$

2. La distillation

2.1. Principe de distillation

La distillation est une opération double ; après chauffage jusqu'à l'ébullition, la phase vapeur surmontant le liquide bouillant et en équilibre avec celui-ci n'a pas la même composition. Par condensation de la phase vapeur, on obtient un liquide nommé distillat ou extrait (dit aussi produit

de tête) dont la composition diffère de celle du mélange initial. La phase liquide non évaporée constitue le résidu ou le raffinat (appelée également produit de pied ou de fond).

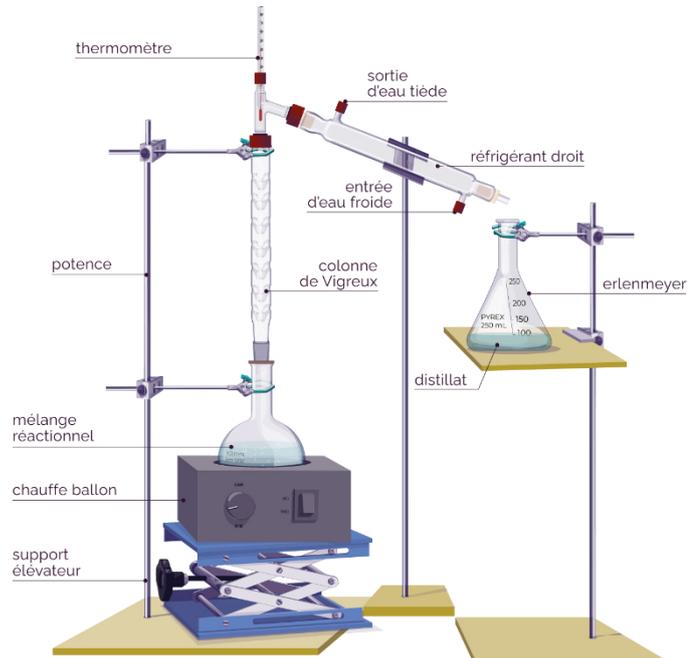


Figure 5 : Schéma de principe de la distillation.

2.2. Différents modes de distillation

2.2.1. Distillation simple

On appelle distillation simple la séparation des constituants d'un mélange d'alimentation (binaire A+B) par vaporisation partielle à l'ébullition de ce mélange, et obtention d'une phase vapeur (ou distillat) et d'une phase liquide (ou résidu), les deux phases étant en équilibre liquide-vapeur. Les vapeurs issues du mélange en ébullition sont en général condensées.

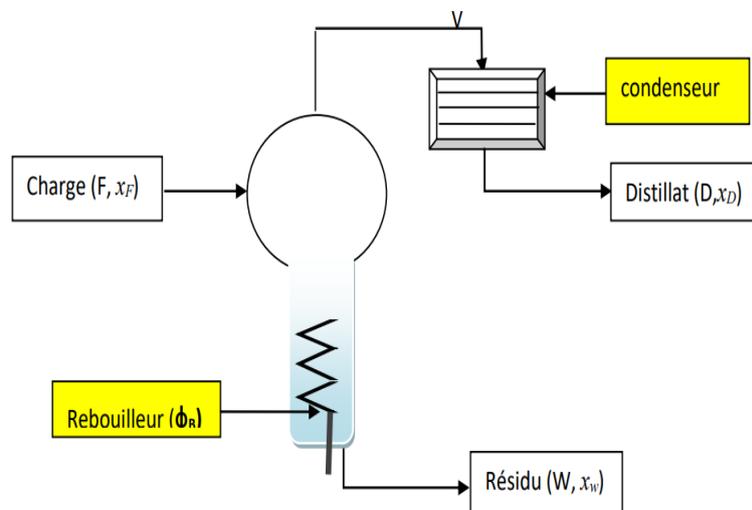


Figure 6 : Schéma de la distillation simple (Bouilleur avec chauffage électrique).

Bilan matière global :

$$F = W + V = W + D \dots \dots \dots (20)$$

Bilan matière partiel :

$$F \cdot x_F = W \cdot x_w + V \cdot x_D \dots \dots \dots (21)$$

Bilan énergétique :

$$F \cdot h_F + \phi_B = W \cdot h_w + V \cdot h_v \dots \dots \dots (22)$$

Où h_F , h_w et h_v désignent respectivement les enthalpies molaires de la charge, du résidu et du distillat. ϕ_B représente la puissance de chauffe du bouilleur.

2.2.2. Distillation discontinue étagée (rectification discontinue)

La rectification est une technique qui utilise une distillation répétée dans une colonne de manière à provoquer des échanges entre les phases vapeur montant et liquide refluant dans la colonne. L'alimentation à traiter est chargée en une fois dans le bouilleur. Elle est ensuite portée à l'ébullition. Les vapeurs de tête obtenues sont condensées, et une partie des condensats sont renvoyés en reflux dans la colonne. L'autre partie des condensats est soutirée, constituant ce que l'on nomme le distillat. L'opération est poursuivie jusqu'à épuisement du bouilleur en constituant le plus volatil. Le résidu est alors soutiré du bouilleur après refroidissement éventuel.

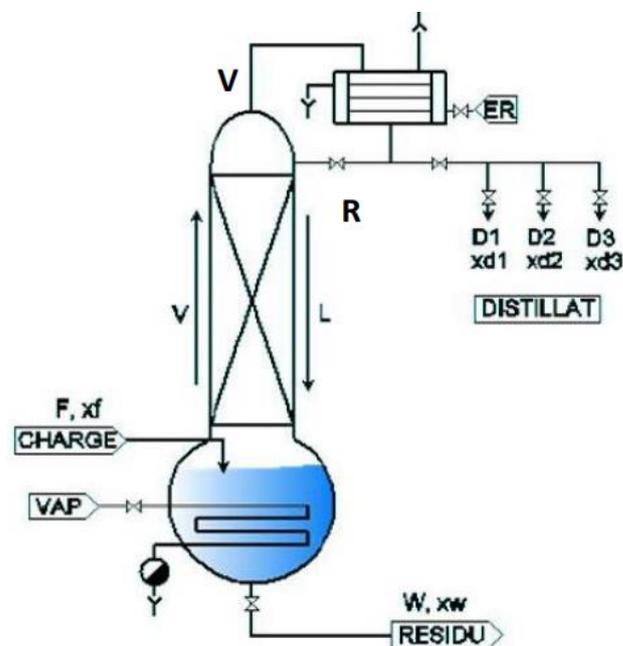


Figure 7 : Schéma de la rectification discontinue.

Bilan matière global :

$$F = W + \sum_{i=1}^n D_i \dots\dots\dots(23)$$

Bilan matière en constituant volatil :

$$F \cdot x_F = W \cdot x_w + \sum_{i=1}^n D_i \cdot x_i \dots\dots\dots(24)$$

2.2.3. Distillation continue étagée

En rectification continue, l'alimentation (ou charge) est introduite en continu entre les zones de rectification (partie supérieure de la colonne) et d'épuisement (partie inférieure). La colonne est parcourue par un débit de liquide descendant du haut vers le bas et un débit de vapeur montant de bas en haut. Ces deux flux sont mis en contact l'un avec l'autre dans la colonne afin qu'ils se rapprochent de l'équilibre liquide-vapeur. La mise en contact du liquide et de la vapeur peut être assurée par des plateaux ou par du garnissage.

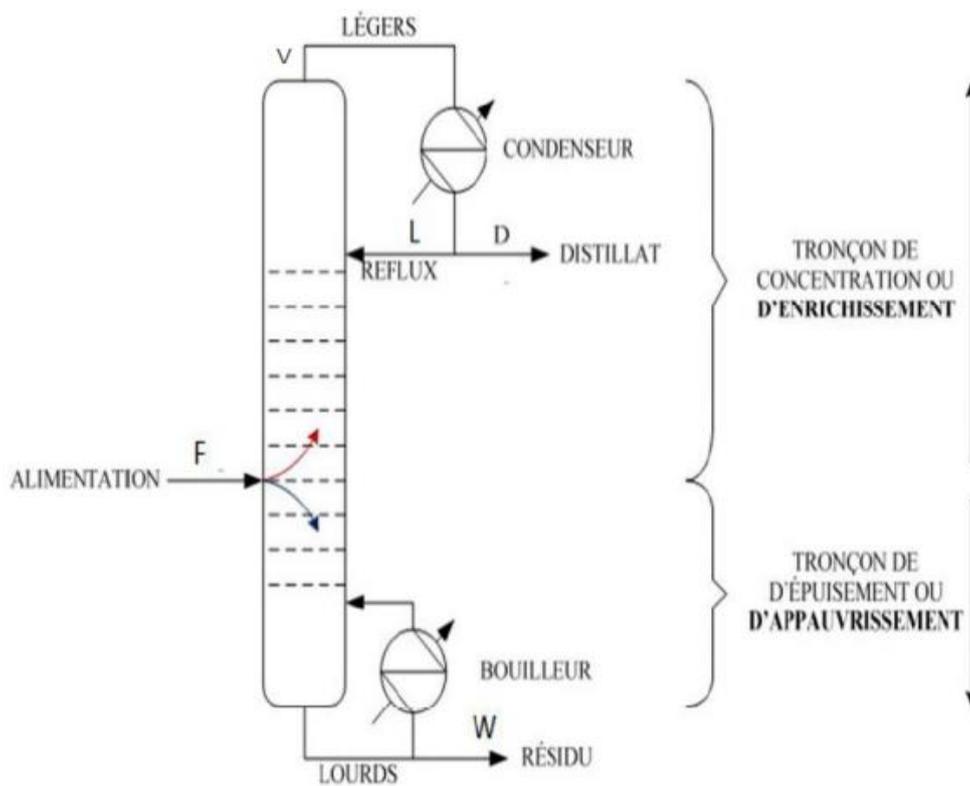


Figure 8 : Schéma de la rectification continue.

Bilan matière global :

$$F = W + D \dots\dots\dots(25)$$

Bilan matière en constituant volatil :

$$F \cdot x_F = W \cdot x_w + D \cdot x_D \dots\dots\dots(26)$$

On obtient :

$$D = F \frac{x_F - x_W}{x_D - x_W} \dots\dots\dots(27)$$

$$W = F \frac{x_F - x_D}{x_W - x_D} \dots\dots\dots(28)$$

Bilan énergétique sur la colonne :

$$F \cdot h_F + \Phi_B = Wh_w + Dh_D + \Phi_C \dots\dots\dots(29)$$

Φ_B : flux fourni au bouilleur par le moyen de chauffage, Φ_C : flux cédé par les vapeurs de tête au condenseur.

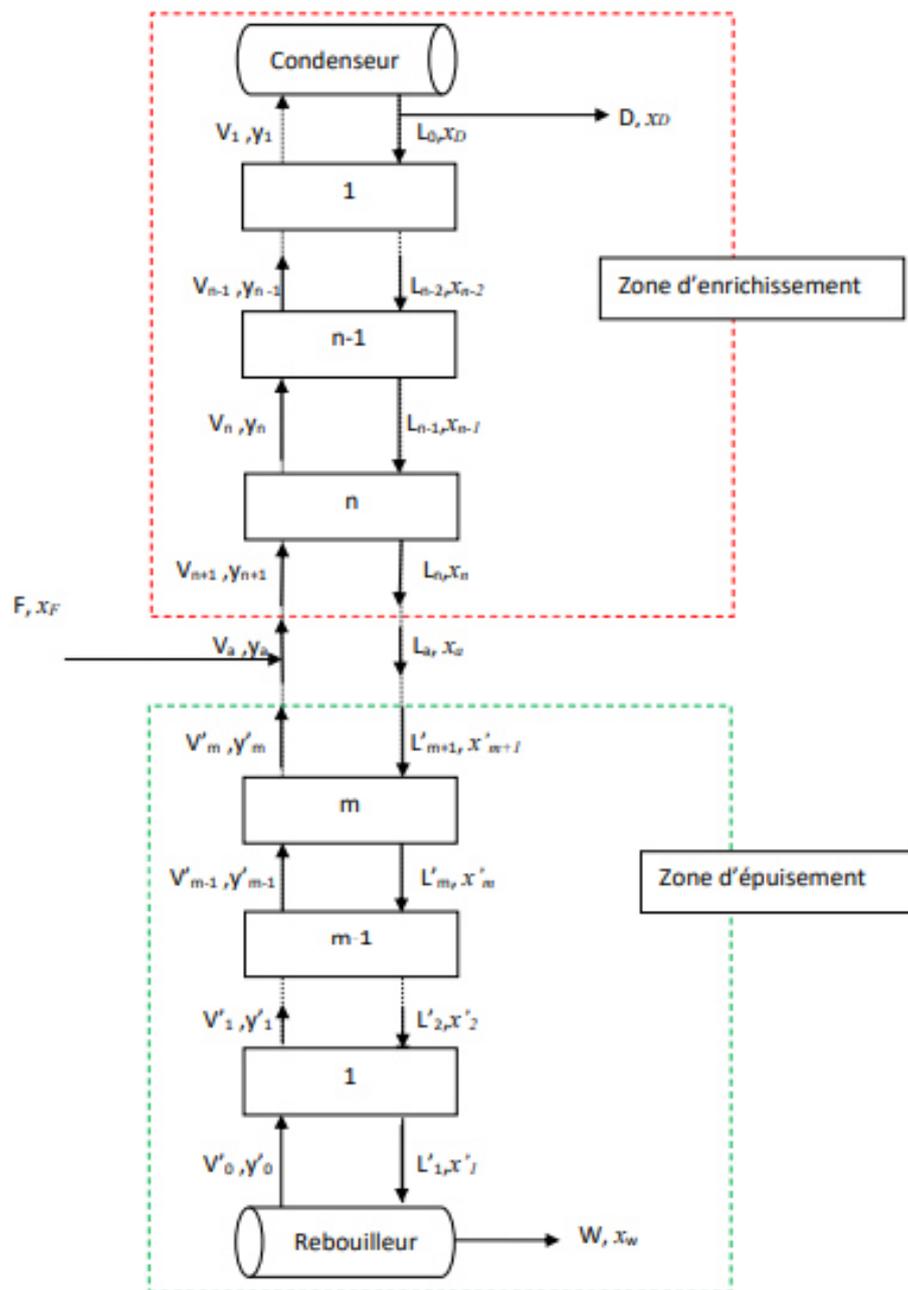


Figure 9 : Principe de distillation

Bilan sur le condenseur :

$$V_1 = L_0 + D \dots \dots \dots (30)$$

On définit le **taux de reflux en tête de la colonne** :

$$R = L_0/D \dots \dots \dots (31)$$

$$V_1 = L_0 + D = RD + D = D (R + 1)$$

Bilan partiel sur le condenseur (total) :

$$V_1 y_1 = (L_0 + D) x_D, \text{ puisque : } y_1 = x_D \dots \dots \dots (32)$$

Bilan énergétique sur le condenseur (total) :

$$V_1 h_v = (L_0 + D) h_D + \Phi_c$$

$$\Phi_c = V_1 h_v - (L_0 + D) h_D$$

$$\Phi_c = (L_0 + D) h_v - (L_0 + D) h_D$$

$$\Phi_c = (L_0 + D) (h_v - h_D)$$

$$\Phi_c = (R + 1) D (h_v - h_D) \dots \dots \dots (33)$$

Bilan sur le rebouilleur :

$$L'_1 = V'_0 + W \dots \dots \dots (34)$$

Bilan partiel sur le rebouilleur :

$$L'_1 x = V'_0 y_0 + W x_w \dots \dots \dots (35)$$

2.3. Construction de Mac Cabe et Thiele

Nous admettons l'hypothèse de Lewis, selon laquelle le débit molaire de chaque phase (liquide ou vapeur) reste constant d'un plateau à l'autre, à l'intérieur de chaque section de la colonne. Nous appellerons L et V ces débits dans la section d'épuisement, L' et V' ces débits dans la section d'épuisement.

Les hypothèses :

- ✓ Les chaleurs molaires de vaporisation des deux constituants sont identiques, $\Delta H_A = \Delta H_B$
- ✓ La colonne est adiabatique (pertes calorifiques négligeable).
- ✓ La condensation des vapeurs de tête de colonne est totale

Elles permettent de déterminer, pour une séparation donnée (x_F , x_w et x_D) :

- ✓ Le nombre minimum d'étages théoriques (NET_{min} à reflux total),
- ✓ Le taux de reflux minimum (R_{min} à nombre de plateaux infini),
- ✓ Le nombre d'étages théoriques NET requis pour un taux de reflux R.

Le taux de reflux R est en général choisi tel que $1,2 R_{min} < R < 2 R_{min}$. Il représente un compromis entre le nombre de plateaux (coût d'investissement) et le taux de reflux (coût énergétique associé, c.-à-d. coût de fonctionnement).

La méthode de Mac Cabe et Thiele consiste à considérer que les débits molaires de liquide et de vapeur dans la colonne sont constants, ce qui implique que :

$$L_{n+1} = L_n = L_{n-1} = \dots = L$$

$$V_{n+1} = V_n = V_{n-1} = \dots = V$$

$$L'_{n+1} = L'_n = L'_{n-1} = \dots = L'$$

$$V'_{n+1} = V'_n = V'_{n-1} = \dots = V'$$

Zone d'enrichissement

Soit (n) un plateau dans la section d'enrichissement. Considérons le système composé des plateaux : (condenseur) à n (système entouré dans le graphique ce dessus). Ce système reçoit de la vapeur à partir du plateau (n+1) situé juste en dessous de (n), et cède de la matière à travers le distillat et le liquide quittant le plateau (n). Nous pouvons écrire des bilans matière sur ce système :

Bilan global :

$$V_{n+1} = L_n + D \dots \dots \dots (36)$$

Bilan partiel :

$$V_{n+1} \cdot y_{n+1} = L_n \cdot x_n + D \cdot x_D \dots \dots \dots (37)$$

D'où :

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{L_n + D} x_n + \frac{D}{L_n + D} x_D \dots \dots \dots (38)$$

Ou bien :

$$y_{n+1} = \frac{L}{L + D} x_n + \frac{D}{L + D} x_D \dots \dots \dots (39)$$

En faisant intervenir le **taux de reflux $R=L/D$** , on aboutit à :

$$y_{n+1} = \frac{R}{1 + R} x_n + \frac{x_D}{R + 1} \dots \dots \dots (40)$$

C'est l'équation de la droite opératoire d'enrichissement :

- Passe par le point de coordonnées (x_D, x_D)
- De coefficient directeur (pente) = $R/1+R$
- Ordonnée à l'origine = $x_D/R+1$

Bilan énergétique :

$$V_{n+1}h_{n+1}^V = L_n h_n^L + Dh_D \dots\dots\dots(41)$$

Zone d'épuisement

Nous pouvons effectuer un calcul analogue dans la section d'épuisement de la colonne (en dessous de l'alimentation) en délimitant un système formé par les plateaux m au rebouilleur de la colonne.

Bilan global :

$$L'_{m+1} = V'_m + W \dots\dots\dots(42)$$

Bilan partiel :

$$\begin{aligned} L'_{m+1}x'_{m+1} &= V'_m y'_m + Wx_w \\ V'_m y'_m &= L'_{m+1}x'_{m+1} - Wx_w \\ y'_m &= \frac{L'_{m+1}}{V'_m} x'_{m+1} - \frac{W}{V'_m} x_w \\ y'_m &= \frac{L'_{m+1}}{L'_{m+1} - W} x'_{m+1} - \frac{W}{L'_{m+1} - W} x_w \\ y'_m &= \frac{L'}{L' - W} x'_{m+1} - \frac{W}{L' - W} x_w \end{aligned}$$

En faisant intervenir le **taux de rebouillage $r=L'/W$** , on aboutit à :

$$y'_m = \frac{r}{r-1} x'_{m+1} - \frac{x_w}{r-1} \dots\dots\dots(43)$$

C'est l'équation de la droite opératoire d'épuisement :

- Passe par le point (x_w, x_w)
- De coefficient directeur (pente) = $r/r-1$
- Croise la droite opératoire de rectification en un point d'abscisse x_F

Bilan énergétique :

$$L'_{m+1}h_{m+1}^L = V'_m h_m^V + Wh_w + Q_R \dots \dots \dots (44)$$

2.3.1. Nombre d'étages théoriques NET pour un taux de reflux fixé R

Soit à séparer par rectification continue un mélange de deux constituants de titre molaire x_F en un résidu de titre molaire x_w et un distillat de titre molaire x_D , à un taux de reflux fixé R. Le nombre d'étages théoriques permettant cette séparation est donné par la construction de McCabe et Thiele s'appuyant sur la courbe d'équilibre et les droites opératoires suivantes :

- De x_D à x_F , sur la droite opératoire d'enrichissement passant par le point (x_D, x_D) et coupant l'axe des ordonnées en $x_D / (R+1)$
- De x_F à x_w , sur la droite opératoire d'épuisement passant par le point (x_w, x_w) et coupant la droite d'enrichissement en $x = x_F$

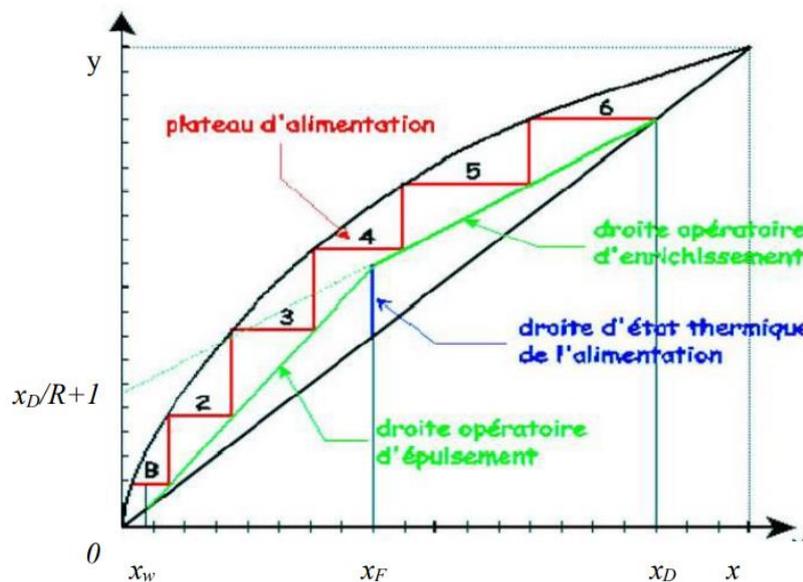


Figure 10 : Détermination du nombre d'étages théoriques à reflux fixé par la méthode de McCabe et Thiele.

2.3.2. Reflux total, NET_{min}

La relation entre le taux de reflux et le nombre d'étages nécessaires à une séparation donnée peut être facilement visualisée grâce à la construction de McCabe et Thiele. En effet, augmenter le taux de reflux revient à éloigner les droites opératoires de la courbe d'équilibre, jusqu'à les confondre avec la première bissectrice. On trouve alors le nombre minimum d'étages, correspondant à un taux de reflux infini (colonne à reflux total). Le nombre minimum d'étages théoriques pour réaliser cette séparation est déterminé par la construction de McCabe et Thiele à reflux total, qui consiste à tracer des escaliers (ou étages) entre la courbe d'équilibre et la bissectrice, de x_w à x_D .

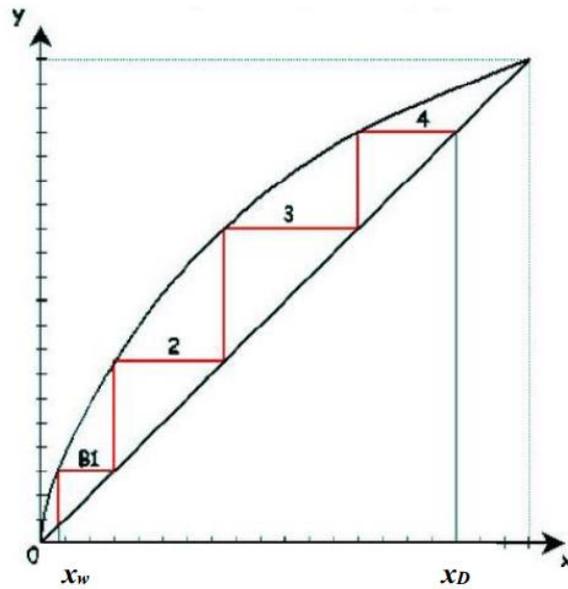


Figure 11 : Détermination du nombre d'étages théoriques (à reflux total) par la méthode de McCabe et Thiele.

2.3.3. Reflux minimum

Le taux de reflux minimum pour réaliser une séparation donnée en rectification continue est déterminé par l'ordonnée à l'origine de la droite passant par les points suivants :

- ✓ Le point (x_D, x_D) , situé sur la bissectrice ;
- ✓ Le point de la courbe d'équilibre ayant pour abscisse x_F .

Cette ordonnée, déterminée graphiquement, vaut : $y_{min} = x_D / R_{min+1}$, ce qui permet d'en déduire R_{min} .

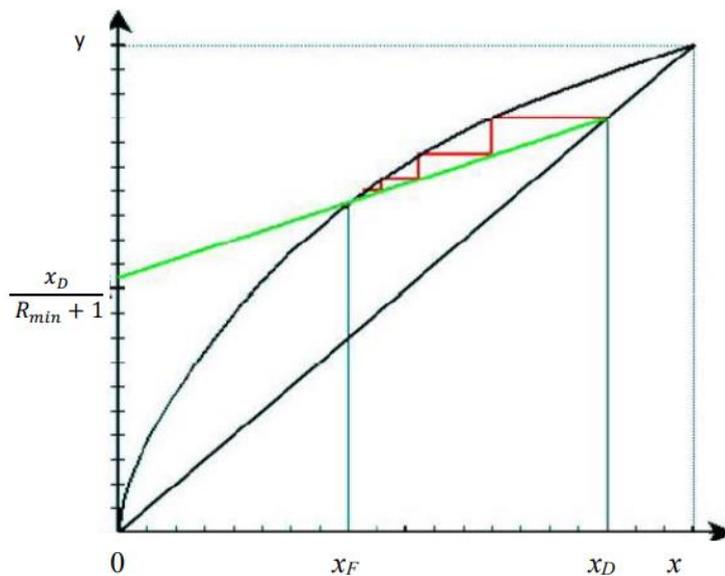


Figure 12 : Détermination du reflux minimum par la méthode de McCabe et Thiele.

Série de TD 1

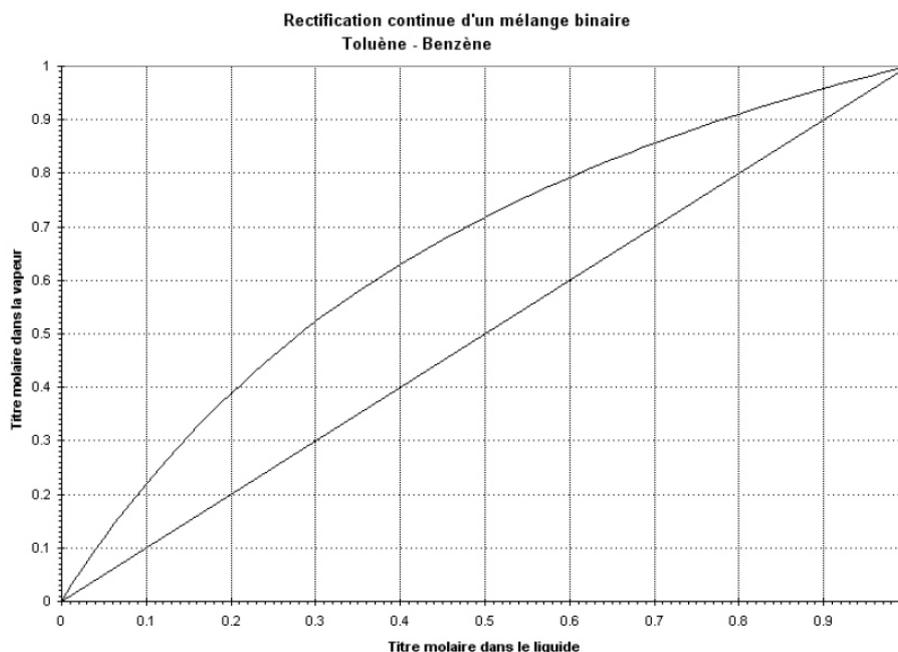
Exercice 1

On désire rectifier en continu **10 t.h⁻¹** d'un mélange à **80%** poids de benzène et **20%** poids de toluène, de façon à obtenir un distillat à **98%** poids de benzène et un résidu à **97%** de toluène avec un taux de reflux de **4**.

- 1- Etablir le bilan matière des divers courants et les représenter sur un schéma de principe.
- 2- Déterminer le **NET** dans le cas où l'alimentation est préchauffée à son point d'ébullition.
- 3- Etablir le bilan énergétique de la colonne, et déterminer le débit d'eau de refroidissement au condenseur dans les conditions suivantes :
 - L'eau de refroidissement rentre à **15 °C** et sort à **60 °C** ;
 - Le distillat est obtenu à **38 °C**.

Données :

- Enthalpie massique de l'alimentation à son point d'ébullition $h_A=153,4 \text{ kJ.kg}^{-1}$;
- Enthalpie massique du résidu à son point d'ébullition $h_S=200,6 \text{ kJ.kg}^{-1}$;
- Enthalpie massique du reflux et du distillat à 38 °C $h_D=66,9 \text{ kJ.kg}^{-1}$;
- Enthalpie massique des vapeurs saturantes en tête de colonne $H_V=539,2 \text{ kJ.kg}^{-1}$;
- Courbe d'équilibre benzène-toluène ;
- $M_{\text{benzène}} = 78 \text{ g.mol}^{-1}$; $M_{\text{toluène}} = 92 \text{ g.mol}^{-1}$; $C_{p_{\text{eau}}} = 4180 \text{ J/Kg.K}$.

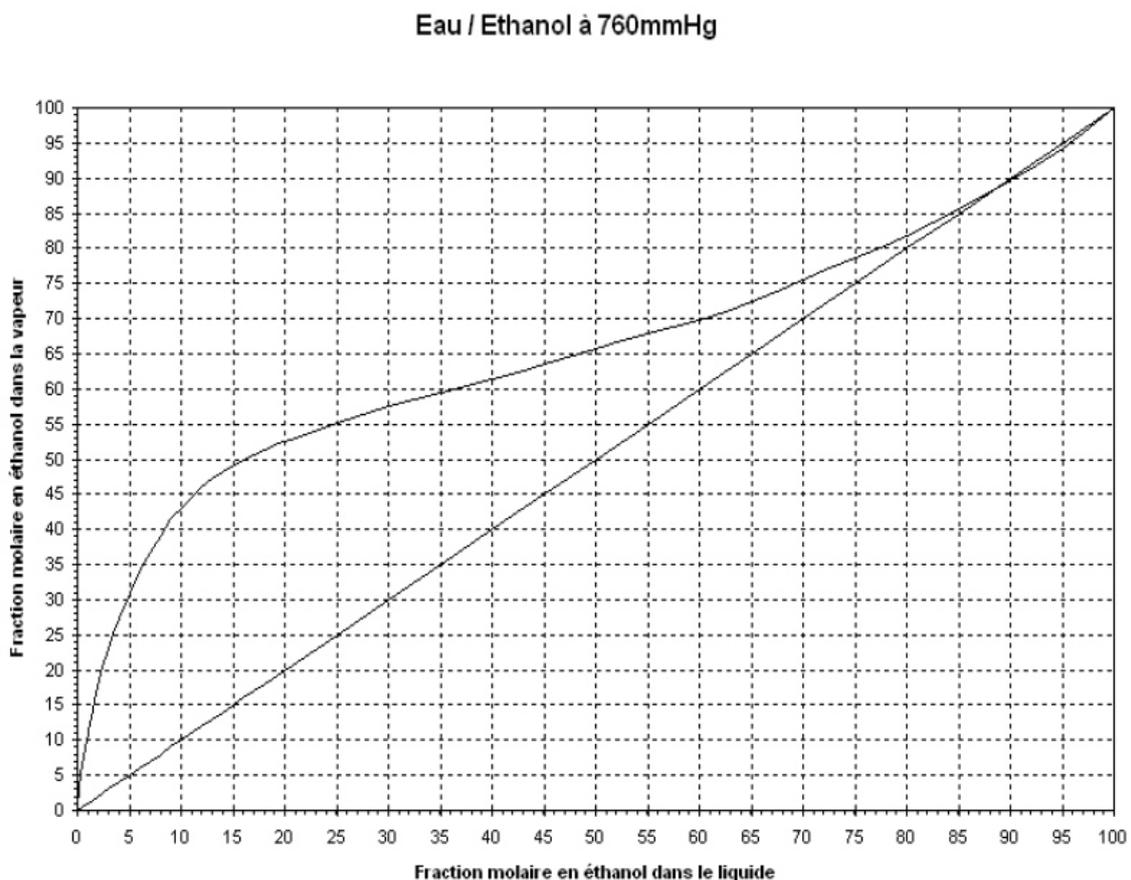


Exercice 2

On désire séparer, en discontinu, l'éthanol contenu dans **1000 kg** de mélange eau - éthanol à **25%** poids en alcool. On souhaite de plus récupérer **80%** de l'alcool dans le distillat. On dispose pour l'opération d'une colonne à **6** plateaux théoriques (dont le bouilleur) et on choisit d'opérer de manière à ce que le distillat ait un titre massique en alcool de **90%**.

- 1- Déterminer le titre molaire et massique noté $X_{azéo}$ de l'azéotrope eau-alcool.
- 2- L'installation est démarrée à reflux total. En considérant que la composition du bouilleur est identique à celle de la charge, soit **25%**, déterminer la composition du produit obtenu en tête avant que l'on ait commencé à soutirer du distillat.
- 3- Déterminer les masses, titres massiques, nombre de moles et titres molaires du distillat, du résidu et de la charge.
- 4- Vérifier que pour obtenir la qualité de distillat souhaitée, il faut appliquer un taux de reflux d'environ **3,5** en début de rectification, et de **7** en fin de rectification.

Données : $M_{éth} = 46 \text{ g.mol}^{-1}$; $M_{eau} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$; courbe d'équilibre eau-éthanol.

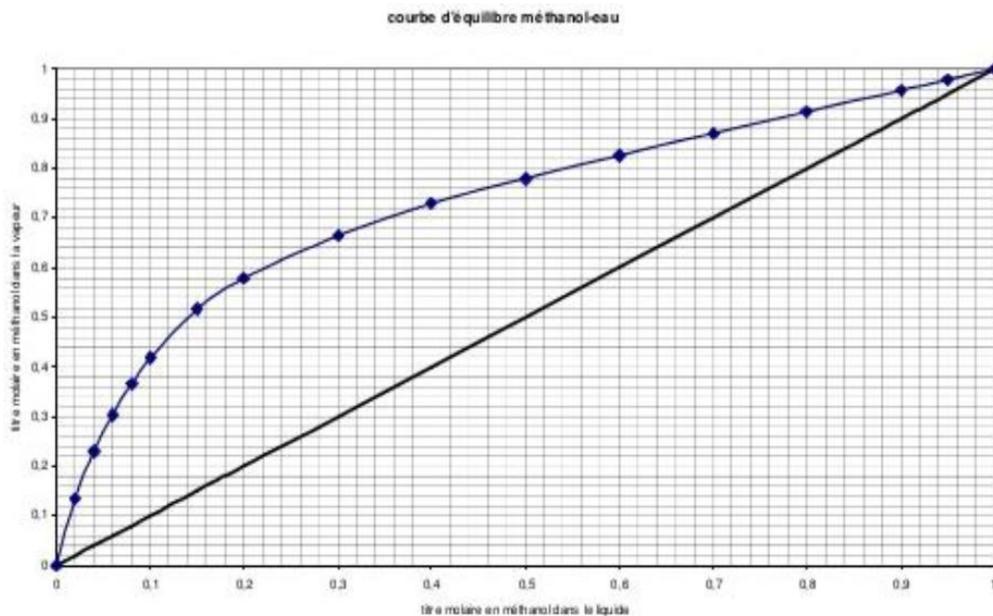


Exercice 3

On rectifie en discontinu **500 kg** d'un mélange **Eau / Méthanol** de titre massique **40 %** en eau afin d'obtenir un distillat avec une teneur massique de **90 %** en méthanol et un résidu avec une teneur massique de **93 %** en eau.

- 1- Calculer les masses obtenues de distillat et de résidu.
- 2- Dans les conditions de l'alimentation, calculer le taux de reflux optimal.
- 3- Dans les conditions finales :
 - Tracer la droite opératoire optimale ;
 - En déduire le nombre de plateaux théoriques de la colonne.
- 4- Calculer le nombre de plateaux réels de la colonne.

Données : $M_{\text{méth}} = 32 \text{ g.mol}^{-1}$; $M_{\text{eau}} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$; $Tr_{\text{opt}} = 1,3 * Tr_{\text{min}}$; $E = 0,8$; courbe d'équilibre eau-méthanol.

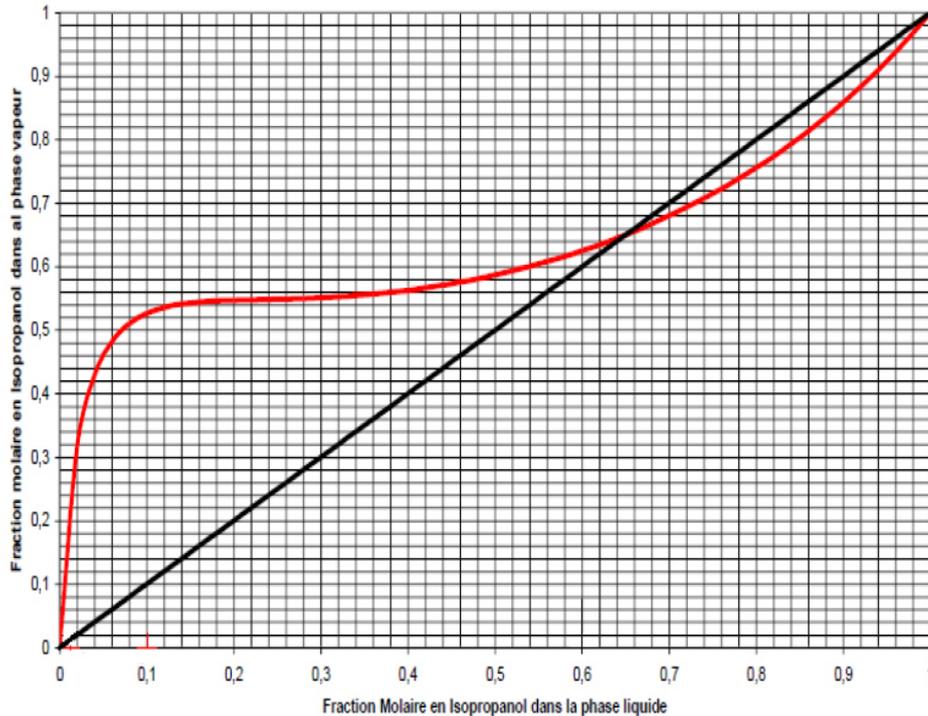


Exercice 4

On rectifie en discontinu **1500 kg** d'un mélange **Eau / Isopropanol** de titre massique **73 %** en eau afin d'obtenir un résidu avec une teneur molaire de **5 %** en isopropanol.

- Calculer le nombre de plateaux théoriques de la colonne, sachant que y_{min} dans les conditions de l'alimentation égale à **0,51**.

Données : $M_{\text{isop}} = 60 \text{ g.mol}^{-1}$; $M_{\text{eau}} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$; $Tr_{\text{opt}} = 1,3 * Tr_{\text{min}}$.



Exercice 5

On désire rectifier en continu dans une colonne à plateaux fonctionnant à pression atmosphérique un mélange méthanol-eau à **60%** poids de méthanol. L'alimentation est liquide à son point d'ébullition, son débit est **A = 2000 kg.h⁻¹**. On souhaite un distillat de titre massique en méthanol est **98%** et un résidu de titre massique en méthanol est **2%**.

- 1- Déterminer tous les débits et compositions massiques et molaires, les présenter dans un tableau.
- 2- Déterminer le nombre minimal de plateaux théoriques pour réaliser la séparation à reflux total.
- 3- Déterminer le taux de reflux minimal pour réaliser la séparation demandée.
- 4- Déterminer pour un taux de reflux égal à **1,4**, le nombre de plateaux théoriques nécessaires et le plateau d'alimentation.

Données : courbe d'équilibre eau-méthanol ; $M_{\text{méth}} = 32 \text{ g.mol}^{-1}$; $M_{\text{eau}} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$; $T_{\text{éb(eau)}} = 100^\circ\text{C}$; $T_{\text{éb(méthanol)}} = 65^\circ\text{C}$ à pression atmosphérique.

Chapitre 2 : Evaporation

1. Introduction

Le changement d'état d'un corps qui passe de la phase liquide à la phase gazeuse (vapeur) définit l'évaporation. Généralement, on utilise le terme vaporisation quand le but de l'opération est la récupération du solvant et le terme évaporation quand il s'agit de séparer un solide ou d'élever sa concentration. Le solvant vaporisé est le plus souvent de l'eau, ce qui explique que, par la suite, on parlera généralement d'eau évaporée.

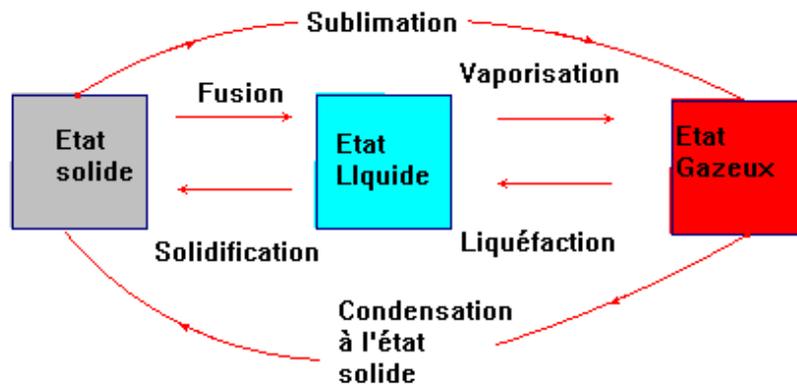


Figure 1 : Les cas changements d'état d'un corps.

2. Vaporisation de l'eau : évaporation et ébullition

La vaporisation est un terme général désignant deux phénomènes différents correspondant tous les deux au changement d'état liquide à vapeur : l'évaporation et l'ébullition. Les raisonnements sont applicables à tous les corps purs.

L'ébullition a lieu à la température du liquide pour laquelle la pression de vapeur saturante du liquide devient égale à la pression totale qui surmonte le liquide. L'eau bout à 100 °C sous la pression atmosphérique car à 100 °C la tension de vapeur de l'eau est de 1atm.

L'évaporation et l'ébullition présentent en résumé les différences suivantes :

- ✓ L'évaporation a lieu à toutes les températures (même inférieures à la température d'ébullition) ; elle s'effectue à la surface du liquide.
- ✓ L'ébullition a lieu à une température fixe pour une pression totale donnée. Elle se déroule au sein du liquide avec formation de bulles.

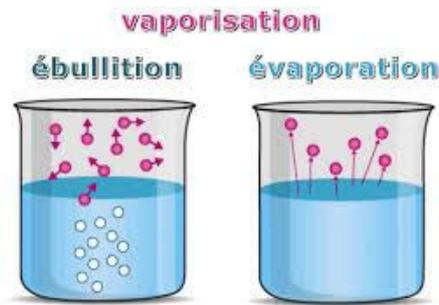


Figure 2 : La représentation de l'ébullition et d'évaporation.

3. Définition de l'évaporation

L'évaporation est une opération unitaire appartenant à la famille des opérations de séparation : Le solvant est séparé du soluté en le faisant passer de l'état liquide à l'état vapeur.

L'évaporation est l'opération fondamentale et principalement utilisée dans les industries agroalimentaires qui a pour but de concentrer une solution d'un soluté solide ou liquide, par vaporisation du solvant, à la pression atmosphérique ou sous vide.

L'évaporation est une opération de transfert de matière et d'énergie (chaleur) entre une solution et une vapeur. Partant d'une solution diluée, elle fournit une solution concentrée sous forme d'un liquide plus ou moins visqueux, appelé concentrât.

L'évaporation est utilisée dans :

- ✓ La concentration des jus de fruits et du lait
- ✓ La cristallisation du sucre
- ✓ La fabrication de la pâte à papier
- ✓ La concentration de bioproduits
- ✓ La fabrication des engrais (nitrates)

4. Principe d'évaporation

- Un apport de chaleur (échangeur) va permettre l'ébullition de cette solution
- L'eau ou le solvant constituant la solution initiale va être vaporisée
- La vapeur générée est évacuée puis condensée
- La solution non vaporisée est ainsi concentrée d'où le nom de concentrât

Le produit fini peut être :

- ✓ **La vapeur** : cas de la production de l'eau potable à partir de l'eau de mer
- ✓ **La solution concentrée** : laiterie, sucrerie, production de jus d'orange

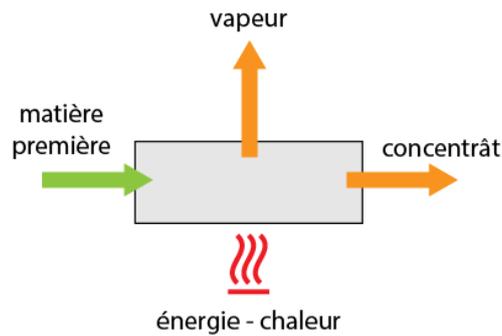


Figure 3 : Schéma de principe des évaporateurs.

5. Le but d'évaporation

Généralement la matière première contient plus d'eau qu'il en faut dans le produit fini :

- ✓ Pour réduire les coûts de transport et du stockage en réduisant le poids et le volume (cas des jus de fruits)
- ✓ Pour préparer le produit à une opération unitaire ultérieure : l'évaporation précède la cristallisation de certains produits (ex : saccharose) ou le séchage d'autres produits (l'atomisation du lait, tomate, café)
- ✓ Pour assurer la préservation d'un produit alimentaire en diminuant son activité de l'eau (lait concentré)

6. Facteurs influençant l'évaporation

6.1. Concentration

La dissolution d'un solide mis en contact avec un liquide (solvant) donne un mélange liquide homogène appelé solution. Le solide dissout est le soluté (la concentration augmente au cours de l'évaporation).

6.2. Solubilité

Le solvant ne peut dissoudre plus d'une certaine quantité de solide. Lorsque la dissolution absorbe de la chaleur, la solubilité augmente avec la température (solubilité normale). Si, au contraire, la solubilité diminue lorsqu'on augmente la température (solubilité inverse)

6.3. Sensibilité à la température

Il arrive que certains produits, surtout d'origines organiques, soient décomposés s'ils sont soumis à une très haute température. L'évaporation de ce type de solutions doit se dérouler de manière que les conditions critiques (température, temps de séjour) de décomposition ne soient pas atteintes.

6.4. Viscosité

On peut diminuer la valeur de la viscosité des solutions par l'élévation de température, mais uniquement si elles ne sont pas sensibles à la température

6.5. Ecart de température

La force motrice ΔT de l'opération d'évaporation correspond à la différence entre la température de chauffage et la température de la solution à l'ébullition.

7. Evaporateur simple effet et équations bilans

7.1. Définition

On appelle évaporateur simple effet, un évaporateur dans lequel la vapeur (de solvant) générée n'est pas réutilisée. Cette vapeur peut être soit rejetée à l'atmosphère, soit condensée, soit subir un autre traitement. Évaporateur simple est utilisé quand les quantités et le débit sont petites.

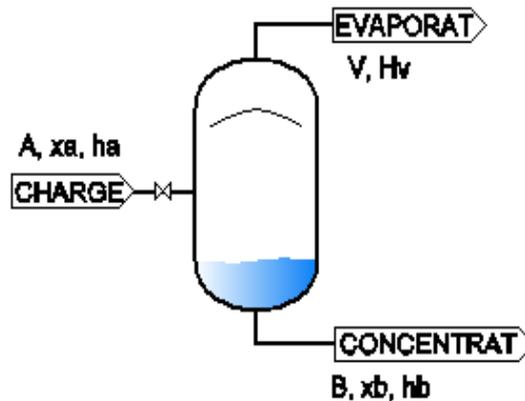


Figure 4 : Evaporateur simple effet.

- **A** débit massique de la charge (kg/s)
- **B** concentrât (kg/s)
- **V** vapeur (kg/s)
- x_A concentration du la charge
- x_B concentration du concentrât
- H_v enthalpie massique de la vapeur de chauffe (KJ/Kg)
- h_A enthalpie massique de la charge (KJ/Kg)
- h_B enthalpie massique du concentrât (KJ/Kg)

7.2. Equations de bilan matière

$$A = V + B \dots \dots \dots (1)$$

$$A x_A = B x_B \dots \dots \dots (2)$$

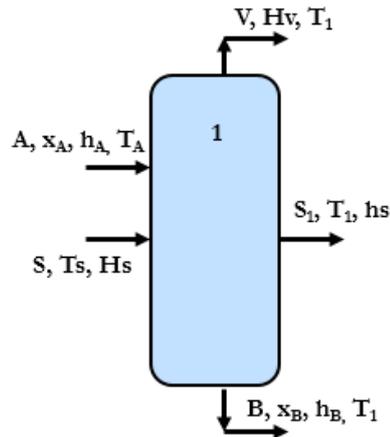


Figure 5 : Le principe de l'évaporateur simple effet.

7.3. Equations de bilan d'énergie

$$A \cdot h_A + S \cdot H_s = V H_V + S \cdot h_s + B h_B \text{ avec ;}$$

$$(H_s = n \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ } (\Delta T = T_2 - T_1))$$

$$A \cdot h_A + S (H_s - h_s) = V H_V + B h_B; \text{ avec}$$

$$(\Delta H_s = H_s - h_s)$$

$$A \cdot h_A + S \cdot \Delta H_s = V H_V + B h_B \dots\dots\dots(3)$$

- **ΔH_s**: chaleur latente du Steam (KJ/Kg)
- **S · ΔH_s = Q_c** : la chaleur de chauffant (KJ)
- **S** : la quantité de vapeur consommée

$$Q_T \text{ (totale)} = Q_c + Q_{\text{vap}} ; Q_{\text{vap}} = A \cdot h_A - V H_V + B h_B ; Q = n \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ ou bien } Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

L'économie d'une installation d'évaporation

$$E = V/S \cdot 100 \dots\dots\dots(4)$$

8. Evaporateur Multiple Effet

On appelle évaporateur multiple-effet un ensemble d'évaporateurs dans lesquels la vapeur (de solvant) générée dans un évaporateur (i) est réutilisée comme vapeur de chauffage dans l'évaporateur suivant (i+1). Seul le premier évaporateur est chauffé à l'aide de vapeur vive. Ce principe de fonctionnement est obtenu en décalant les pressions de chacun des évaporateurs, de façon à obtenir dans l'évaporateur (i) une vapeur se condensant à une température supérieure à la température d'ébullition de l'évaporateur (i+1) (de 1 à 20°C par exemple).

8.1. Principe de fonctionnement

Le multiple effet consiste en à mettre en série plusieurs évaporateurs à simple effet, chaque évaporateur fonctionnant à une pression différente. L'intérêt de ce type d'évaporateur est de pouvoir multiplier le nombre d'effets et de diminuer d'une façon presque proportionnelle le coût énergétique en fonction du nombre d'effets.

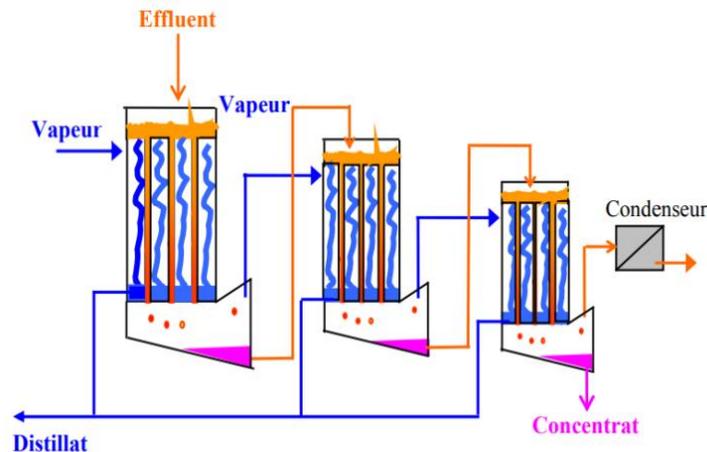


Figure 6 : Principe de fonctionnement d'un évaporateur multiple effet.

8.2. Les différents types d'évaporation multiples effet

Les différents types d'évaporation multiples effet sont :

8.2.1. Evaporation triple effet à co-courant

- ✓ Évaporateur 1^{er} effet à gauche (pression et température la plus élevée)
- ✓ Évaporateur 3^{ème} effet à droite (pression et température la plus faible, éventuellement sous vide)
- ✓ Solution la plus concentrée sortant de l'évaporateur à la plus basse température
- ✓ Minimise le risque de dégradation pour les produits thermosensibles
- ✓ Peut générer des problèmes si le concentrât est visqueux à faible température

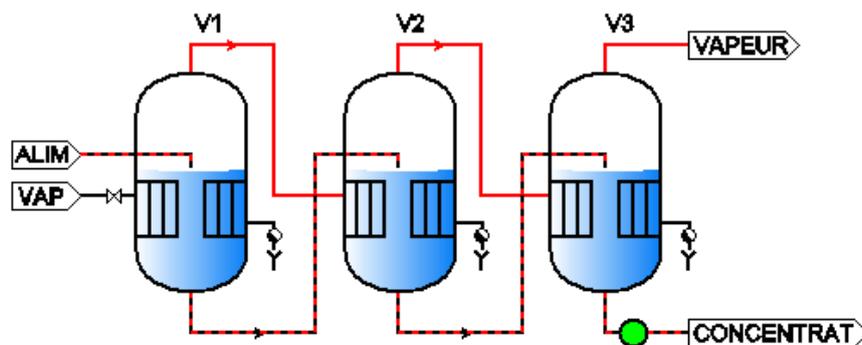


Figure 7 : Evaporateur triple effet à co-courant.

8.2.2. Evaporation triple effet à contre-courant

- ✓ Évaporateur 1^{er} effet à droite (pression et température la plus élevée).
- ✓ Évaporateur 3^{ème} effet à gauche (pression et température la plus faible, éventuellement sous vide).
- ✓ Solution la plus concentrée sortant de l'évaporateur à la température la plus élevée
- ✓ Risque de dégradation pour les produits thermosensibles.
- ✓ Avantageux dans le cas où le concentrât est visqueux à faible température.
- ✓ Nécessité d'une pompe de reprise des concentrâts de chaque évaporateur vers le suivant, à pression plus élevée

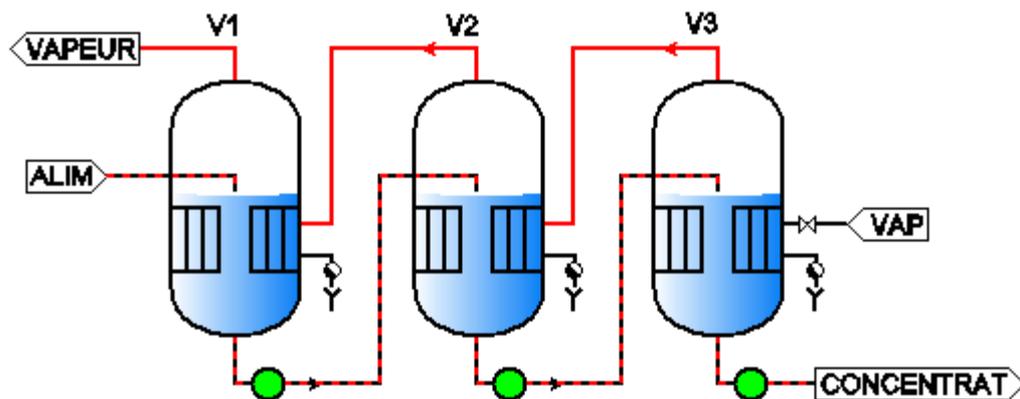


Figure 8 : Evaporateur triple effet à contre-courant.

8.2.3. Evaporation triple effet à alimentations parallèles

- ✓ Alimentation de chaque évaporateur réglable indépendamment.
- ✓ Possibilité de régler plusieurs qualités de concentrâts.

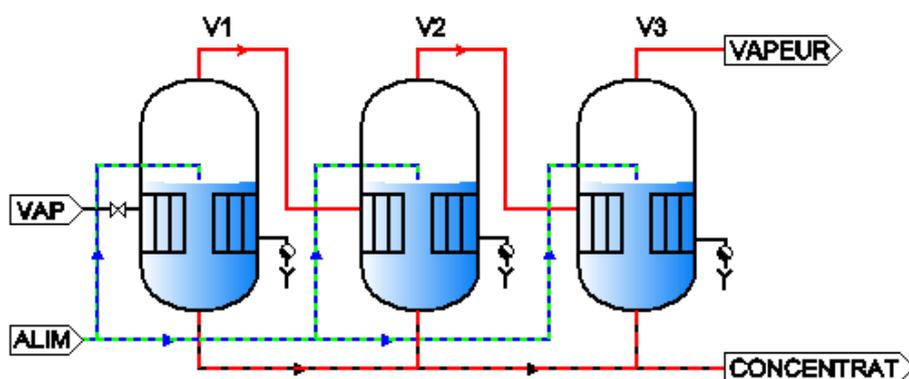


Figure 9 : Evaporateur triple effet à alimentations parallèles.

8.3. Équations bilans des matières et énergétiques

8.3.1. Cas Arrangement en contre-courant

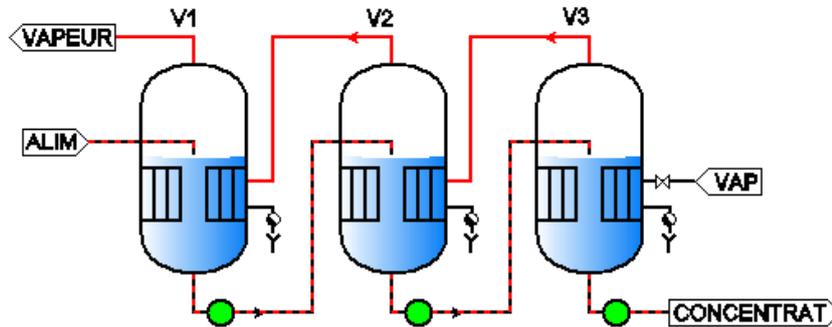


Figure 10 : Le principe de l'arrangement en contre-courant.

a) Bilan de matière

$$A = V_1 + V_2 + V_3 + B_3 \dots \dots \dots (5)$$

$$A x_A = B_3 x_3 \dots \dots \dots (6)$$

b) Bilan énergétique

$$A \cdot h_A + S \cdot H_s = V_1 H_1 + B_3 h_3 \dots \dots \dots (7)$$

8.3.2. Cas Arrangement en co-courant

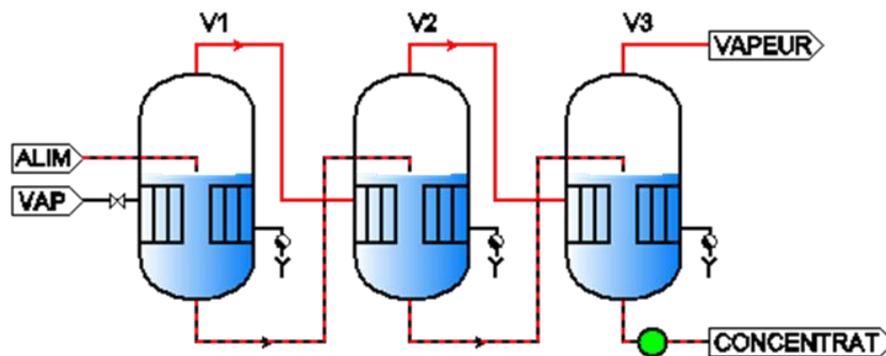


Figure 11 : Le principe de l'arrangement en co-courant.

a) Bilan de matière

$$A = V_1 + V_2 + V_3 + B_3 \dots \dots \dots (8)$$

$$A x_A = B_3 x_3 \dots \dots \dots (9)$$

b) Bilan énergétique

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T \dots \dots \dots (10)$$

Tel que :

- ✓ **U** : Le coefficient de transfert thermique
- ✓ **A** : La surface de transfert de chaleur
- ✓ **Q** : La chaleur de chauffant
- ✓ **ΔT** : La différence des températures

Cas 1 : S'il n'y a pas des pertes de chaleur :

$$Q_1 = A_1 \cdot U_1 \cdot \Delta T_1 ; \text{ avec } \Delta T_1 = T_0 - T_1$$

$$Q_2 = A_2 \cdot U_2 \cdot \Delta T_2 ; \text{ avec } \Delta T_2 = T_1 - T_2$$

$$Q_3 = A_3 \cdot U_3 \cdot \Delta T_3 ; \text{ avec } \Delta T_3 = T_2 - T_3 ; \text{ avec } \sum \Delta T = T_0 - T_3$$

Cas 2 : Si $Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$ et $A = A_1 = A_2 = A_3$

$$Q = A \cdot U_1 \cdot \Delta T_1 = A \cdot U_2 \cdot \Delta T_2 = A \cdot U_3 \cdot \Delta T_3$$

$$\Delta T_1 = \frac{Q}{A \cdot U_1} ; \Delta T_2 = \frac{Q}{A \cdot U_2} ; \Delta T_3 = \frac{Q}{A \cdot U_3}$$

$$\Sigma \Delta T = \frac{Q}{A \cdot U_1} + \frac{Q}{A \cdot U_2} + \frac{Q}{A \cdot U_3} = \frac{Q}{A \left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} \right)}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Sigma \Delta T}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}}$$

$$\Delta T_1 = \Sigma \Delta T \frac{\frac{1}{U_1}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} ; \text{ avec } \Delta T_1 = T_0 - T_1 \dots \dots \dots (11)$$

$$\Delta T_2 = \Sigma \Delta T \frac{\frac{1}{U_2}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} ; \text{ avec } \Delta T_2 = T_1 - T_2 \dots \dots \dots (12)$$

$$\Delta T_3 = \Sigma \Delta T \frac{\frac{1}{U_3}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} ; \text{ avec } \Delta T_3 = T_2 - T_3 \dots \dots \dots (13)$$

$$\text{avec } \Sigma \Delta T = T_0 - T_3$$

Série de TD 2

Exercice 1 :

Un évaporateur à simple effet concentre 1 tonne par heure de solution aqueuse de chlorure de sodium NaCl à 10% en poids, de manière à obtenir une solution à 30% en poids.

- Calculer : a) la quantité de solution à 30% obtenue
b) la quantité d'eau évaporée.

Solution: a) $L = 333,333 \text{ kg/h}$

b) $V = 666,667 \text{ kg/h}$

Exercice 2 :

On veut concentrer 9,07 tonne/h d'une solution de sel de 20% à 50% en masse à l'aide d'un évaporateur à un seul effet en utilisant la vapeur d'eau saturée sous une pression et température de 2,37 atm et 126,09°C respectivement.

- Calculer : a) la quantité de vapeur consommée,
b) l'économie
c) la surface de transfert de chaleur.

Données :

$U = 1400 \text{ (KW/m}^2 \cdot \text{°C)}$, $T_{\text{ebm}} = 91,5^\circ\text{C}$, $T_s = 126,09^\circ\text{C}$, $h_A = 128 \text{ (KJ/kg)}$, $h_B = 294 \text{ (KJ/kg)}$,
 $H_v = 2667 \text{ (KJ/kg)}$, $\Delta H_s = 2184,9 \text{ (KJ/kg)}$,

Solution: a) $S = 6599,61 \text{ kg/h}$

b) $E = 0,82; (82\%)$

c) $A = 0,082 \text{ m}^2$

Exercice 3 :

Un évaporateur triple effet concentre un liquide sous une pression atmosphérique, si la température de Steam entré dans le premier effet est 395K et la température dans le troisième effet est de 325K.

- Quelles sont les températures dans le premier et le deuxième effet.

Chapitre 2 : Evaporation

Données : Les coefficients de transfert de chaleur globaux sont :

$$U_1 = 3,1 \text{ (KW/m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$U_2 = 3,2 \text{ (KW/m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$U_3 = 1,1 \text{ (KW/m}^2 \cdot \text{K)}$$

Solution : $T_1 = 380 \text{ }^\circ\text{K}$, $T_2 = 360 \text{ }^\circ\text{K}$

Chapitre 3 : Cristallisation

Introduction

La cristallisation est l'opération qui consiste, à partir d'une solution (solvant+soluté) ou d'un solide fondu, à former un solide cristallisé. Le soluté cristallise en général sous une forme géométrique prédéfinie (cubique, cubique a face centrée, etc...), incluant ou non des molécules de solvant (par ex Na_2SO_4 pur ou $[\text{Na}_2\text{SO}_4, 10\text{H}_2\text{O}]$). La forme ou formule chimique des cristaux peut dépendre de la température de cristallisation.

1. Définition

La cristallisation est une opération unitaire du génie chimique consistant à isoler un produit sous forme de cristaux. La cristallisation est l'une des opérations physiques les plus anciennes pratiquées, avec l'évaporation de l'eau de mer pour isoler du sel.

L'objectif de la cristallisation peut être :

- Isoler un produit pour le récupérer sous forme solide ;
- Purifier un produit : lors de la cristallisation, les impuretés sont rejetées dans la phase liquide.

2. Les types de cristallisation

On distingue deux types de cristallisation :

- **"voie sèche"** : on part d'un solide fondu, et on opère la cristallisation par refroidissement de ce solide. L'alimentation est un solide fondu (donc un liquide ou une pâte), pur ou mélange de plusieurs constituants. La sortie du procédé est constituée d'une ou plusieurs phases solides.

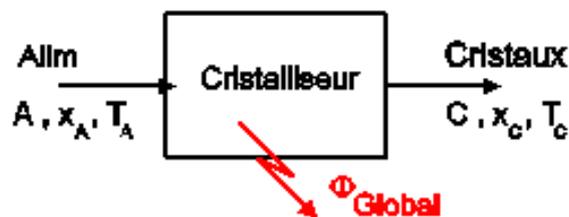


Figure 1 : Cristallisation par voie sèche.

- **"voie humide"** ou cristallisation en solution : le soluté est initialement en phase liquide dans un solvant. Il est cristallisé au sein de la solution soit par évaporation de solvant, soit par refroidissement de la solution, soit les deux. En sortie de procédé, on obtient ainsi 2 ou 3 phases : une phase vapeur (constituée de solvant pur), une phase solide cristallisée (qui peut contenir ou

non du solvant), et une phase liquide contenant du solvant et du soluté dissous, en général à saturation et appelée "eaux mères" ou "liqueur mère".

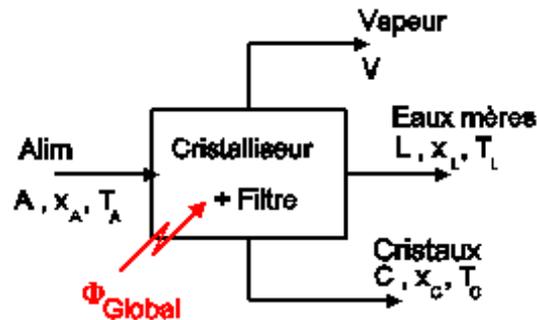


Figure 2 : Cristallisation par voie humide.

3. La cinétique de cristallisation

Le phénomène de cristallisation en solution n'est pas instantané, il suit une cinétique complexe qui peut se représenter par les deux mécanismes suivants :

- **Nucléation** (ou Germination) : c'est la formation de tout petits cristaux (appelés germes), de quelques dizaines de microns, à partir d'une solution sursaturée. La nucléation ne se produit spontanément qu'à partir d'un certain taux de sursaturation, qui dépend du sel considéré mais aussi des conditions opératoires (pureté de la solution, contenant, agitation, etc...)
- **Grossissement** : la cristallisation se produit à la surface des germes, avec accroissement de leur taille. Ce phénomène se poursuit jusqu'à ce que la solution rejoigne la courbe d'équilibre. La solution obtenue en fin de cristallisation est ainsi (théoriquement) à exactement à saturation (à la limite de solubilité du sel). La **qualité** finale des cristaux formés (taille et répartition) dépend des vitesses de germination et de grossissement.

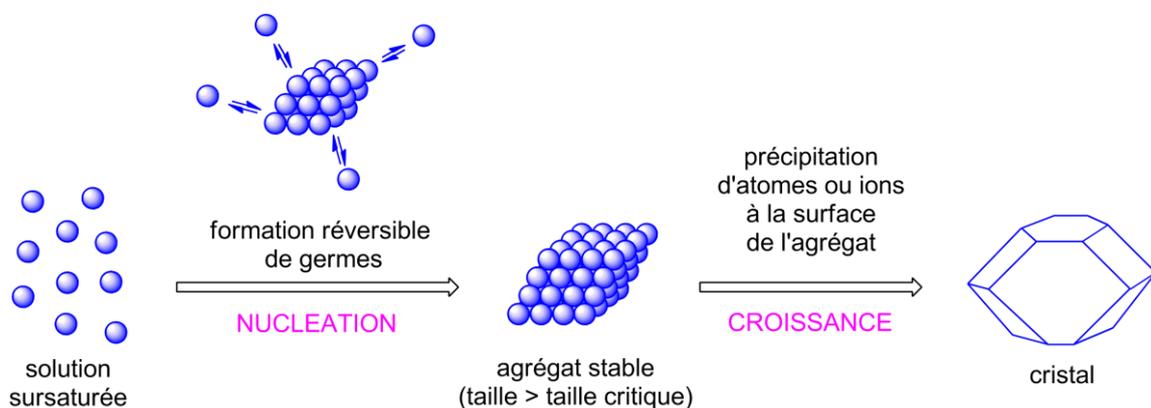


Figure 3 : Formation d'un cristal par évaporation d'une solution sursaturée – phénomènes de nucléation et croissance.

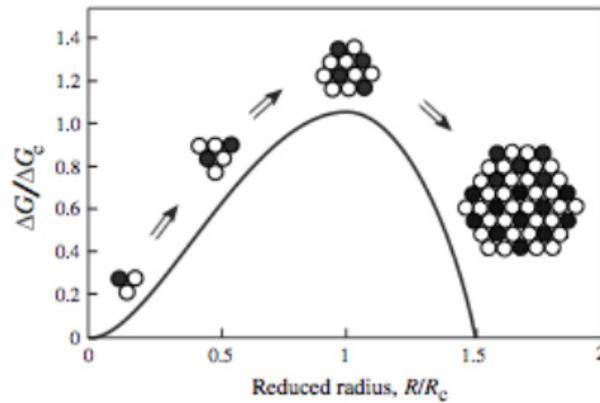


Figure 4 : Phénomènes de nucléation et croissance.

3.1. La courbe de solubilité

On distingue sur le diagramme ci-contre deux courbes (concentration en g/100g de solvant en fonction de la température), ces deux courbes délimitant trois domaines.

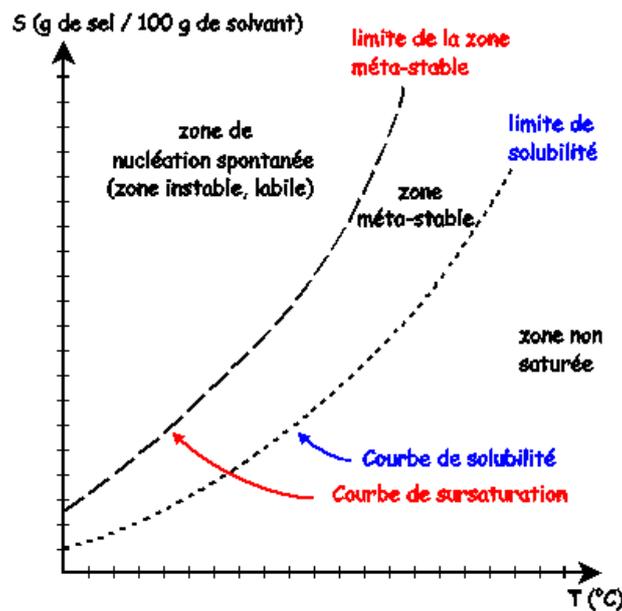


Figure 5 : La courbe de solubilité.

- **Courbe de solubilité (ou courbe de saturation)** : elle donne la limite de solubilité d'un sel en fonction de la température. C'est une courbe d'équilibre.
- **Courbe de nucléation spontanée (ou courbe de sursaturation)** : elle marque la limite au-delà de laquelle la solution donne naissance spontanément à des germes de cristaux, initiant ainsi la cristallisation.
- **Zone non saturée** : délimitée par la courbe de solubilité : dans cette zone, la solution n'est pas saturée, et elle peut dissoudre du sel.

- **Zone méta-stable :** entre la courbe de solubilité et la courbe de nucléation spontanée : en présence de germes, il y a cristallisation par grossissement. En l'absence totale de germes, la solution peut rester claire (une seule phase, sans cristallisation et sans nucléation).

- **Zone labile :** délimitée par la courbe de nucléation spontanée : la nucléation a lieu spontanément, les germes ainsi formés étant alors sujets au grossissement. La solution va alors rejoindre la courbe de solubilité à une vitesse dépendant des conditions opératoires (agitation, échange thermique, vitesse de grossissement et de nucléation, etc....).

3.2. Exemples de lectures sur la courbe de solubilité

Température de saturation de la solution en M : elle est lue en reportant le point M sur la courbe de solubilité selon une horizontale (même composition). La température de saturation de M est alors lue sur l'axe ox, T_{sat}.

Solubilité de la solution saturée à la même température : elle est lue en reportant le point M sur la courbe de solubilité selon une verticale (même température). La solubilité à saturation de M S_M* est alors lue sur l'axe oy.

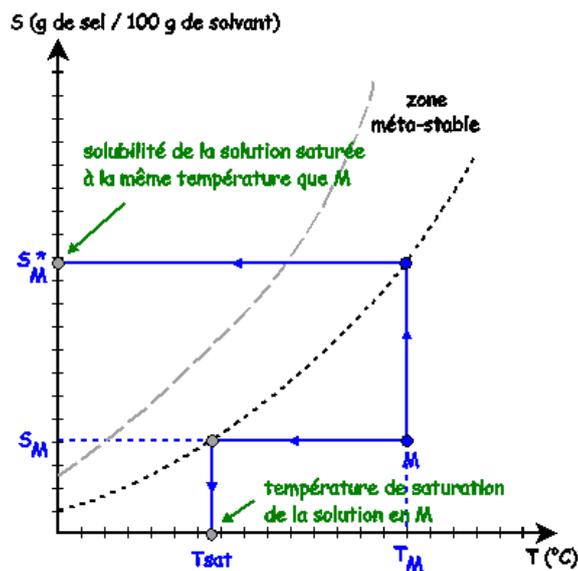


Figure 6 : La lecture sur la courbe de solubilité.

3.3. Taux de saturation (τ) :

Il est défini comme le rapport de la composition « S » et la composition à saturation « S* » la température (T) ; soit

$$\tau = S_M / S^*_M \dots\dots\dots(1)$$

Si : τ > 100%, la solution est dite **sursaturée**.

Si : $\tau = 100 \%$, la solution est dite **saturée**.

Si : $\tau < 100 \%$, la solution est dite **n'est pas saturée**.

4. Bilans matière et énergétique

En cristallisation (voie humide) : on considère pour l'ensemble de l'installation, les entrées et sorties suivantes :

- Alimentation : débit **A (Kg/h)**, titre massique x_A , température T_A (°C), enthalpie h_A
- Vapeur (uniquement en cas de cristallisation avec évaporation) : débit **V**, enthalpie H_V
- Eaux mères : débit **L**, titre massique x_L , température T_L , enthalpie h_L
- Cristaux (phase solide) : débit **C**, titre massique x_C , température T_C , enthalpie h_C

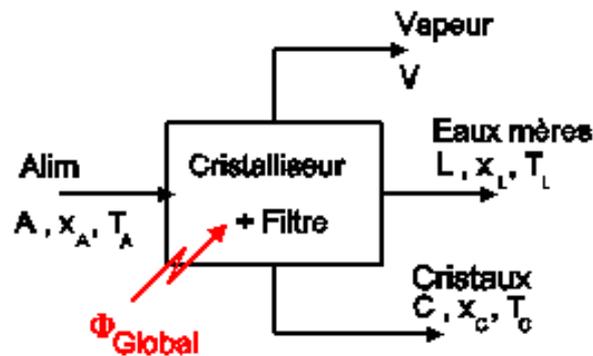


Figure 7 : Le principe de cristallisation en solution

4.1. Bilans de matière

• **Détermination de x_A** : si l'alimentation est saturée à la température T_A , et que S_A en g/100g de solvant est la solubilité à saturation à la température T_A lu sur la courbe de solubilité, on détermine x_A par :

$$x_A = S_A / (100 + S_A), \text{ avec } S_A \dots\dots\dots(2)$$

Dans les autres cas x_A est donné.

• **Détermination de x_L** : les eaux mères sont dans le cas général considérées comme saturées à la température de cristallisation T_L . Soit S_L en g/100g de solvant la solubilité à saturation à la température T_L , on détermine x_L par :

$$x_L = S_L / (100 + S_L), \dots\dots\dots(3)$$

Avec S_L lu sur la courbe de solubilité.

• **Détermination de x_C** : dans le cas où les cristaux sont formés du sel non hydraté, leur titre est soit 100%, soit il est donné en tenant compte des eaux mères mouillant encore le solide. Par exemple, pour le sel Na_2SO_4 non hydraté :

$$x_C = M_{[Na_2SO_4]} / (M_{[Na_2SO_4]}) = 1 \text{ (100\%)} \dots\dots\dots(4)$$

Dans le cas où les cristaux sont hydratés, leur titre massique est calculé comme le rapport des masses molaire du sel sur la masse molaire du sel hydraté.

Par exemple, pour le sel Na₂SO₄ décahydraté, on prend :

$$x_C = M_{[Na_2SO_4]} / (M_{[Na_2SO_4]} + 10 \times M_{[H_2O]}) = 142 / (142 + 10 \times 18) = 44.1\% \text{ (Cas hydrate)}$$

4.1.1. Cristallisation standard sans recyclage

Les bilans peuvent être écrits sur le cristalliseur seul sans séparation des phases solide et liquide, ou sur l'ensemble cristalliseur - filtre (ou autre appareil de séparation)

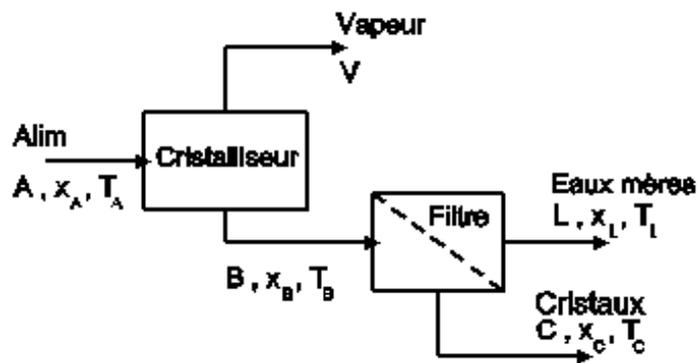


Figure 8 : Le principe de cristallisation sans recyclage

Bilan matière Global : $A = V + L + C \dots\dots\dots(5)$

Bilan matière en Sel : $A x_A = L x_L + C x_C \dots\dots\dots(6)$

En cas de cristallisation par évaporation, V est déterminé par le bilan énergétique.

En cristallisation par refroidissement, **V=0**.

On écrit alors : $L = A - C \dots\dots\dots(7)$

D'où : $A x_A = A x_L - C x_L + C x_C \dots\dots\dots(8)$

Soit : $C = A (x_A - x_L) / (x_C - x_L) \dots\dots\dots(9)$

Le rendement de cristallisation s'écrit :

$$\eta = (C x_C / A x_A) * 100 \dots\dots\dots(10)$$

4.1.2. Cristallisation avec recyclage

La figure 9 de principe d'une cristallisation avec recyclage partiel des eaux mères. Ce recyclage est intéressant dans une cristallisation avec évaporation, car il permet d'augmenter le rendement

global de cristallisation, jusqu'à 100% en l'absence de purge. La purge sert à éviter l'accumulation d'impuretés insolubles présentes dans la solution d'alimentation.

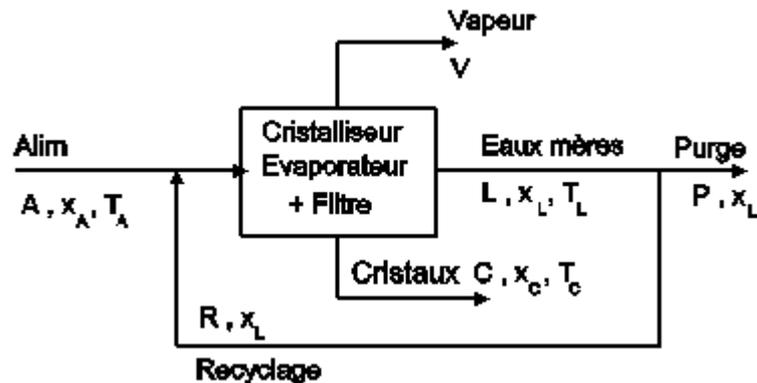


Figure 9 : Le principe de cristallisation avec recyclage

Bilan matière global : $A = V + P + C$(11)

Bilan matière en sel : $A x_A = P x_L + C x_C$(12)

V est déterminé par le bilan énergétique. Si la purge P est fixée, on a :

$$C = A - V - P \text{(13)}$$

$$\text{ou } C = (A x_A - P x_L) / x_C \text{(14)}$$

Le rendement de cristallisation s'écrit : En cas de P=0

$$A x_A = C x_C \text{(15)}$$

$$\eta = C x_C / A x_A \text{(16)}$$

$$\eta = 100\% \text{ si } P = 0$$

4.2. Bilan énergétique

Les effets thermiques à prendre en compte lors d'une cristallisation sont :

Le flux énergétique à enlever à la solution pour la refroidir (cristallisation par refroidissement)

Le flux énergétique consécutif à la vaporisation d'une partie du solvant (pris sur l'enthalpie de la solution, donc entraînant son refroidissement, ou apporté par une source externe tel un réchauffeur à la vapeur).

Le flux énergétique correspondant à la cristallisation (passage du soluté dissous en phase liquide à une structure solide ordonnée, ou cristallisation d'un composé pur), qui est fourni à la solution si la cristallisation est exothermique, ou pris à la solution si endothermique (moins fréquent).

Equation générale de bilan d'énergie :

$$\mathbf{A h_A + \Phi_{global} = C h_C + L h_L + V H_V + pertes} \dots\dots\dots(17)$$

Avec Φ_{global} flux fourni au cristalliseur-évaporateur.

$$\Phi_{global} = \Phi_{refroidissement} + \Phi_{\text{évaporation}} + \Phi_{\text{cristallisation}} \dots\dots\dots(18)$$

- $\Phi_{\text{refroidissement}} = \mathbf{A h_A} = \mathbf{A C_{pA} (T_L - T_A)}$. (C_{pA} désigne la chaleur massique à pression Constante)
- $\Phi_{\text{évaporation}} = \mathbf{V L_V}$. (L_V désigne la chaleur latente de vaporisation)
- $\Phi_{\text{cristallisation}} = \mathbf{C x_C (\Delta H_C) / M_{SEL}}$ ($si < 0$, cristallisation exothermique. (ΔH_C est la chaleur molaire de cristallisation ; M_{SEL} est la masse molaire du sel cristallisé)

Autrement

$$\Phi_{global} = \mathbf{D_s. C_{ps} (T_s - T_e)} \dots\dots\dots(19)$$

$$\Phi_{global} = \mathbf{k_t S_f \Delta T_m} \dots\dots\dots(20)$$

S_f : surface d'échange (m²)

D_s : débit de saumur

k_t : coefficient globale d'échange (kg/h.m².°C)

Série de TD 3

Exercice n°1 :

On cristallise 1000 kg de solution aqueuse de nitrate de sodium de titre massique de 52%, prise à 60°C, en la refroidissant à 10°C.

- 1°) Calculer le taux de saturation de la solution d'alimentation à 60°C
- 2°) Calculer la masse de cristaux formés et le rendement de la cristallisation.

Données :

- Solubilité à 10°C : 80g de NaNO_3 / 100g d'eau
- Solubilité à 60°C : 124g de NaNO_3 / 100g d'eau

Solution : 1°) : $\tau = 0,874$ (87,4%). La solution n'est pas saturée.

2°) : $C = 863,9$ kg ; $\eta = 0,262$ (26,2%)

Exercice n°2 :

On cristallise en continu 1000 kg.h⁻¹ d'une solution de sulfate de sodium saturée à 50°C, en la refroidissant à 10°C dans un cristalliseur à auge. Le refroidissement est réalisé par de la saumure circulant à contre-courant, entrant à 0°C et sortant à 45°C.

- 1°) Déterminer le débit massique horaire de sulfate de sodium décahydraté formé.
- 2°) Calculer la chaleur à éliminer dans le cristalliseur.
- 3°) Calculer le débit de saumure ainsi que la surface d'échange nécessaire.

Données :

- Solubilité à 10°C : 9g de Na_2SO_4 /100g d'eau ; Solubilité à 50°C : 46,7g de Na_2SO_4 / 100g d'eau
- $M_{(\text{Na}_2\text{SO}_4)} = 142$ g. mol⁻¹, $M_{(\text{H}_2\text{O})} = 18$ g.mol⁻¹
- Enthalpie de cristallisation molaire à 10°C de (Na_2SO_4 , 10 H_2O) : $\Delta H_c = 78.42$ kJ/mol,
- Chaleur massique moyenne de la solution : $C_{pA} = -3,55$ kJ.kg⁻¹. °C⁻¹, de la saumure $C_{pS} = 3,7$ kJ.kg⁻¹. °C⁻¹
- Coefficient global d'échange $K_t = 2926$ kJ.h⁻¹m⁻²K⁻¹, $\Delta T_m = 7,21$ °K

Solution: 1°): $C = 342,3 \text{ kg.h}^{-1}$
2°): $\Phi = 302154 \text{ kJ.h}^{-1}$
3°): $D_s = 1814, \text{ kg.h}^{-1}; S = 14,3 \text{ m}^2$

Exercice n°3 :

1000 kg.h^{-1} d'une solution d'acétate de sodium à 20% dans l'eau est introduite dans un évaporateur continu fonctionnant à 60°C et sous vide partiel. Le concentrat sortant de l'évaporateur, titrant 50% en $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$, alimente un cristalliseur fonctionnant à 20°C. Une filtration en aval permet de séparer l'acétate de sodium tri-hydraté solide des eaux mères saturées à 20°C, qui sont intégralement recyclées vers l'évaporateur.

1°) Calculer les débits massiques de cristaux filtrés.

2°) Calculer le débit d'eau à évaporer dans l'évaporateur

3°) Calculer le débit d'eaux mères recyclées vers l'évaporateur.

4°) Calculer le rendement de cristallisation du cristalliseur seul, et de l'ensemble de l'installation.

Données :

- Solubilité du $(\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2, 3 \text{ H}_2\text{O})$: à 20°C 46.5 g/100g, à 60°C 139 g/100g
- $M_{\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2} = 82 \text{ g.mol}^{-1}$, $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$.

Solution: 1°): $C = 331,7 \text{ kg.h}^{-1}$
2°): $V = 668,3 \text{ kg.h}^{-1}$
3°): $L = 187,0 \text{ kg.h}^{-1}$ ($B = 518,7 \text{ kg.h}^{-1}$)
4°): $\eta = 100\%$; $\eta = 0,771$ (77,1%)

Exercice 4 :

On charge dans un cristalliseur adiabatique fonctionnant en discontinu 1000 kg d'une solution aqueuse de KNO_3 de titre massique moyen 60%, prise à 60°C. On met progressivement le cristalliseur sous vide, et le mélange refroidit jusqu'à une température finale de 10°C, à une pression d'environ 12mbar. On casse alors le vide et on relève la masse indiquée par le peson du cristalliseur, qui est de 874 kg.

1°) Calculer le taux de saturation de la solution d'alimentation (S/S à saturation à 60°).
Discuter.

2°) Calculer la masse et la composition des cristaux et des eaux mères que l'on devrait obtenir après filtration du mélange contenu dans le cristalliseur.

3°) Calculer les quantités d'énergies mises en jeu pendant l'opération, afin de vérifier que le cristalliseur est bien adiabatique.

Données :

- $C_{p \text{ Moyen}} = 2,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, Chaleur latente de vaporisation moyenne de l'eau entre 10 et 60°C : $2418 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,
- Enthalpie de cristallisation $\Delta H_{C, \text{KNO}_3} = -35321,4 \text{ kJ} \cdot \text{Kmol}^{-1}$,
- Solubilité du KNO_3 : 20,9 g/100g à 10°C, 110 g/100g à 60°C.
- Masse molaire $M_{\text{KNO}_3} = 101,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Solution : 1°) : $\tau = 1,36$ (136%). La solution est sursaturée.

2°) : $C = 542,8 \text{ kg}$, $L = 331,2 \text{ kg}$

3°) : $\Phi = 29 \text{ kJ}$.

Chapitre 4 : La filtration

1. Définition

La filtration est une opération unitaire dont le but est de séparer une phase contenant des matières solides ou liquides (phase dispersée) qui y sont présentes en suspension, par l'aide d'un entonnoir, elle se réalise par le passage de la suspension à travers un milieu filtrant et poreux adéquat capable de retenir par action physique, plus rarement chimique, les particules solides.

Le milieu filtrant est constitué par des particules solides, elles sont mêmes déposées sur un support qui peut être selon les cas, des feuilles de papier spécial, des tissus, des toiles métalliques, du sable, des gravières.

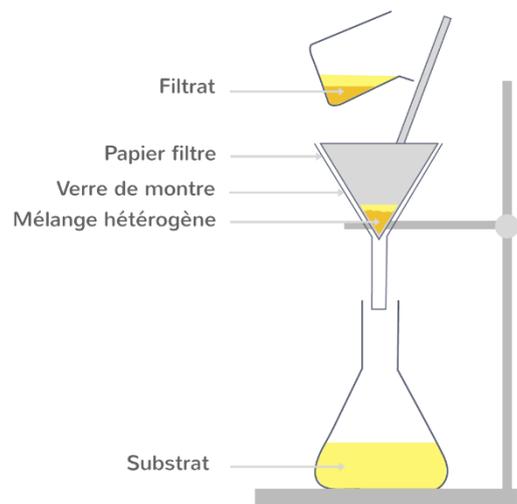


Figure 1 : Montage de filtration simple.

2. Principe de la filtration

La filtration est une technique qui permet de séparer les constituants d'un mélange lorsqu'un des constituants est sous la phase liquide et l'autre est sous la phase solide. Pour ce faire on utilise un filtre, ce filtre permet de retenir les particules solides qui sont plus grosses que les pores (trous) du filtre. Le liquide qui passe au travers du filtre est appelé **filtrat** et le solide que l'on recueille dans le filtre est appelé **résidu**.

La filtration est souvent accompagnée de deux phénomènes :

Le colmatage : est provoqué par des particules qui se déposent à la surface du filtre mais surtout par leur pénétration dans les interstices (petits espaces vides entre les parties du filtre) de la matière filtrante. Ce colmatage modifie totalement la porosité et ralentit la filtration.

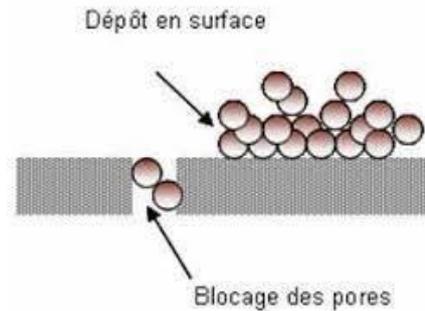


Figure 2 : Le colmatage de la membrane.

L'adsorption : La matière filtrante possède une certaine charge électrique. Ainsi, certains produits peuvent être retenus bien que leurs dimensions permettent leur passage à travers les pores du filtre.

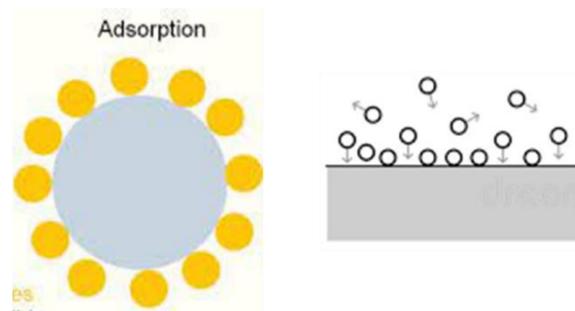


Figure 3 : L'adsorption.

3. Méthode de filtration

Pour établir un écoulement au travers du milieu filtrant, une différence de charge doit être appliquée. La filtration porte différents noms selon la source de pression : gravitationnelle, sous vide, sous pression et centrifuge.

3.1. Filtration gravimétrique (filtration par gravité)

On utilise pour cela des filtres, généralement en papier, coniques ou plissés, à travers lequel le liquide s'écoule sous l'action de son propre poids. Dans cette méthode, l'entonnoir de laboratoire équipé d'un papier filtre est utilisé. La différence de pression est créée par la hauteur du liquide sur le filtre.

3.1.1. Principe

Elle repose sur l'utilisation d'un filtre constitué de mailles qui laissent passer l'eau mais retiennent les particules qu'elle contient. La filtration permet donc d'obtenir un liquide homogène. Les trous d'un papier filtre sont si petits qu'ils ne laissent passer aucune particule plus grosse qu'une bactérie. Les grosses particules retenues sur le papier filtre constituent le résidu tandis que ce qui traverse le filtre s'appelle le filtrat.

3.1.2. Montage

Pour réaliser une filtration, il faut un filtre et un dispositif pour le soutenir : le porte filtre. La plupart du temps on utilise un entonnoir.

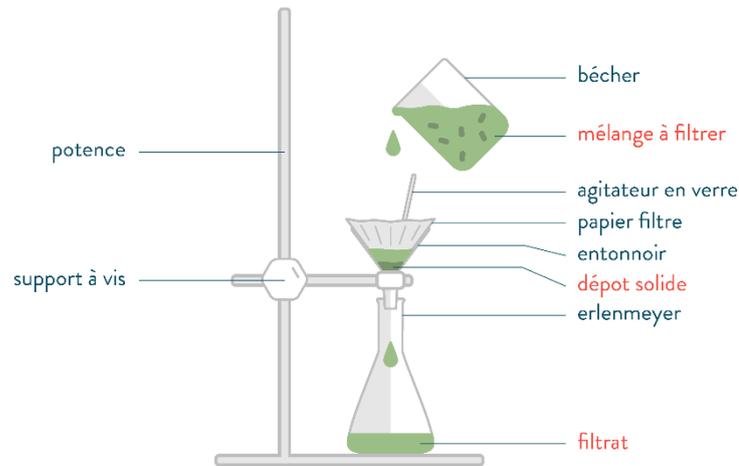


Figure 4 : Montage de filtration par gravité.

La filtration gravimétrique présente les inconvénients suivants :

- ✓ La filtration est lente.
- ✓ La difficulté de récupération de la phase solide isolée surtout lorsqu'elle est peu abondante.
- ✓ La séparation est incomplète : le solide retient une quantité non négligeable de liquide.

Cette méthode est généralement lente et ne permet pas une séparation optimale du solide et du liquide. Pour pallier ces inconvénients, une filtration sous vide est souvent utilisée.

3.2. Filtration sous vide

La vitesse de filtration est augmentée par la création d'une dépression en aval du matériau filtrant. C'est le mode de filtration utilisé d'une manière courante pour les verres frittés et les membranes filtrantes. Des entonnoirs Büchner spéciaux adaptés sur une fiole à succion, dans laquelle on crée une dépression, sont utilisés. L'entonnoir est adapté sur la fiole par l'intermédiaire d'un cône en caoutchouc, Il s'agit d'un entonnoir en porcelaine ou en plastique qui collera à la fiole et l'entonnoir lorsque la dépression est établie.

Parfois le solide est constitué de particules trop fines qui risquent de passer à noirs à travers le filtre. Un entonnoir en verre fritté, sur lequel est versé directement le mélange, peut alors être utilisé. Différentes porosités de verre fritté existent, il convient de choisir celle qui est adaptée à la taille des particules de solide à filtrer.

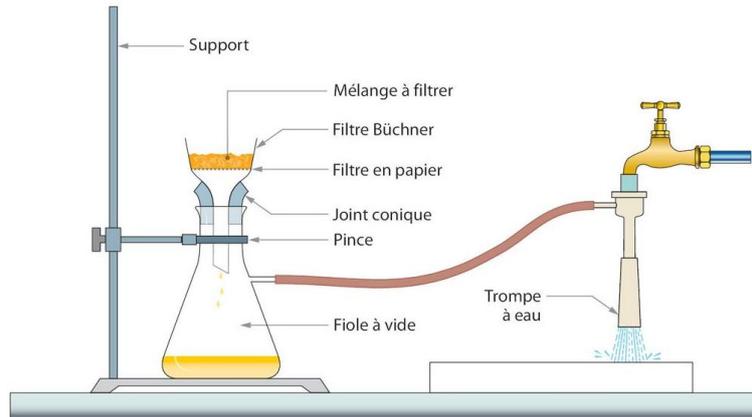


Figure 5 : Schéma d'une filtration sous vide.

✓ *Le filtre de type 'Büchner'*

En porcelaine, de forme cylindrique avec un tamis à gros trous, on place dessus un filtre circulaire en papier, suffisamment grand pour couvrir la totalité du tamis.



Figure 6 : Le filtre de type 'Büchner'.

✓ *Le filtre en verre fritté*

Il s'agit d'un entonnoir en verre qui contient un disque en verre fritté, de porosité fixée. On utilise ce type de filtre dans des conditions de pH extrêmes où le papier ne résisterait pas. Cependant, on ne pourra pas utiliser ce type de filtre avec des solutions d'acide fluorhydrique qui réagit avec la silice du verre.



Figure 7 : Le filtre en verre fritté.

3.3. Filtration sous pression

La vitesse de filtration est augmentée en exerçant une pression sur le liquide à filtrer en amont du matériel filtrant représenté par une membrane filtrante. La filtration sous pression évite le moussage et l'évaporation du solvant ; elle est d'un emploi fréquent dans l'industrie. Ce système de filtration sous pression avec membranes filtrantes existe également sous forme de cartouches filtrantes (millipore) adaptable sur une seringue pratique pour la filtration des petits volumes de solution à filtrer. Au laboratoire, la microfiltration stérilisante à l'aide du dispositif Swinnex Millipore est une filtration sous pression. Ce dispositif est constitué de deux pièces plastiques, que l'on visse l'une sur l'autre en serrant une membrane filtrante.



Figure 8 : Filtration sous pression.

3.4. Filtration centrifuge

La filtration centrifuge utilise la force centrifuge pour pousser le liquide au travers du milieu filtrant. Contrairement à la centrifugation, qui fait intervenir la différence de densité entre le liquide et le solide, la filtration centrifuge utilise une enceinte circulaire filtrante en rotation à de très hautes vitesses. Cette rotation permet d'augmenter le poids apparent de la suspension et ainsi de faire passer le fluide au travers du filtre. Cette technique est plutôt utilisée à très petite échelle en biotechnologie.

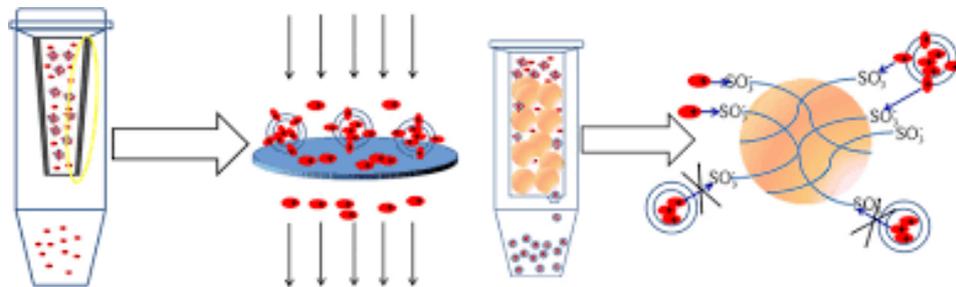


Figure 9 : La filtration centrifuge.

4. Types de filtration

En pratique, il existe deux types de filtration : la filtration sur gâteau, où les particules solides sont déposées sur la surface du filtre pour former un gâteau et la filtration à lit profond, où la déposition des particules s'effectue à l'intérieur du milieu poreux.

4.1. Filtration sur gâteau

La filtration sur gâteau est largement utilisée dans l'industrie minière. La filtration sur gâteau utilise un milieu filtrant qui possède des pores plus petits que les particules solides. Ainsi, les particules s'accumulent en surface du filtre pour former un gâteau à haute concentration en particules solides. Initialement, les pertes de charge dans le filtre sont plutôt faibles. Par contre, une fois que le gâteau est formé en surface du filtre, celui-ci possède une perte de charge supérieure au milieu filtrant. À ce stade, le filtre ne sert que de support.

4.2. Filtration à lit profond

Dans la filtration à lit profond, les particules solides sont captées à l'intérieur du milieu poreux. Les pores du filtre sont donc supérieurs aux particules solides et le milieu filtrant est généralement plus épais. Ce type de filtration permet de traiter seulement les fluides avec de très faibles concentrations en particules solides.

5. Réalisation d'une filtration

- ✓ La première étape est le choix d'un filtre adapté dont les mailles soient assez resserrées pour retenir les particules solides sans que le débit de l'écoulement ne soit pas trop réduit.
- ✓ Le filtre peut être disposé dans un entonnoir afin de faciliter la récupération du filtrat.
- ✓ Le mélange hétérogène à filtrer est versé lentement et par étape afin de ne pas endommager le filtre ou de le submerger. Le mélange peut par exemple être versé en le laissant s'écouler le long d'une baguette en verre.
- ✓ Le résidu solide est récupéré dans le filtre, si son obtention est l'objectif de la filtration alors il peut être mis à sécher dans une étuve.
- ✓ Le filtrat peut être récupérer dans un erlenmeyer.

6. Exemples d'application

Fabrication de produits alimentaires à base de café : Dans le processus de production, le café est transféré d'un réservoir à l'autre, pendant la lyophilisation. Au cours de cette étape, il est nécessaire d'enlever tout café aggloméré du système pour maintenir la qualité du produit et pour protéger la pompe. L'échelle et la conception de l'opération ont nécessité l'utilisation de dix filtres de transfert pour cette application. Les filtres devaient être de conception hygiénique / sanitaire et résister à un traitement agressif (nettoyage par voie chimique).

7. Débit de filtration

Pour préciser le choix du matériel et des conditions de la filtration, il est important de connaître l'évolution du débit et de la perte de charge au cours de la filtration en fonction des caractéristiques de la suspension et du milieu poreux.

✓ **Loi de Darcy** : pour un écoulement laminaire (dit de Darcy ou de poiseuille) dans une paroi ou un corps poreux, que l'on peut considérer comme une juxtaposition de petits canaux.

On a :

$$V^\circ = \frac{S \cdot \Delta P}{\eta \cdot r} \quad \text{ou} \quad \Delta P = \frac{\eta \cdot r \cdot V^\circ}{S} = \eta \cdot r \cdot v \dots \dots \dots (1)$$

Où :

- **ΔP** : La perte de charge,
- **r** : Facteur de résistance de la paroi (m⁻¹) (résistance hydrolique),
- **S** : Section de passage,
- **v** : Vitesse d'écoulement.

« r » augmente au cours de la filtration par colmatage du milieu en filtration en profondeur, ou augmentation de l'épaisseur du gâteau en filtration sur support.

✓ **Résistance spécifique (α)** : est la résistance d'une unité de masse de gâteau sec répondu sur une unité de surface filtrante. Permet de nous donne des caractéristiques de la structure du gâteau, fondamentale pour prévoir une filtration. Calculée en (m/kg).

$$r = \frac{\alpha \cdot C \cdot V}{S} \quad \text{et} \quad \Delta P = \frac{\alpha \cdot \eta \cdot v \cdot C \cdot V}{S} \dots \dots \dots (2)$$

Où :

- **V** : Volume de suspension passée ;
- **C** : Concentration en solide (Kg/m³).

8. Equation générale de fonctionnement d'un filtre sur support

$$(P_2 - P_0)(t) = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot C \cdot V \cdot V^\circ}{S^2} + \frac{\eta \cdot r_s \cdot V^\circ}{S} \dots \dots \dots (3)$$

Où :

r_s : Résistance du support ;

Si l'on considère que $V^\circ = dV/dt$, l'équation (I) devient une équation différentielle, qui trouve une solution analytique simple, dans deux cas limites de fonctionnement du filtre : à débit constant ou à pression constante.

8.1. Filtration à débit constant

On prend $V = V^\circ \cdot t$, d'où

$$(P_2 - P_0)(t) = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot C \cdot V^{\circ 2}}{S^2} t + \frac{\eta \cdot r_s \cdot V^\circ}{S} \dots \dots \dots (4)$$

- La perte de charge dans le filtre, évolue linéairement au cours du temps.
- L'ordonnée à l'origine, représente l'influence de la résistance du support.
- La pente représente l'influence de la résistance du gâteau.

8.2. Filtration à pression constante

C'est le cas le plus fréquent, les filtres sous vides et les filtres alimentés par gravité à partir d'un bac à niveau constant, ils fonctionnent sous différence de pression constante. En prenant $(P_2 - P_0)(t)$: constante, $V^\circ = dV/dt$ et en intégrant l'équation (I) on aura :

$$(P_2 - P_0) \cdot t = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot C \cdot V^2}{2S^2} + \frac{\eta \cdot r_s \cdot V^\circ}{S} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{ou } \frac{t}{V} = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot C \cdot V}{2S^2 \cdot (P_2 - P_0)} + \frac{\eta \cdot r_s}{S \cdot (P_2 - P_0)} \dots \dots \dots (6)$$

8.3. 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 $\dot{\alpha}$. $\dot{\alpha} = \alpha_0 \cdot (P_2 - P_1)^n$ 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 (I), en négligeant le terme r , dû au support devient :

$$V^\circ = \frac{S^2 \cdot (P_2 - P_1)^{1-n}}{\eta \cdot \alpha_0 \cdot C \cdot V} \dots \dots \dots (7)$$

- 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.

9. Technologie des filtres

Les filtres sont subdivisés en deux groupes : les filtres discontinus et les filtres continus.

9.1. Filtres discontinus

9.1.1. Filtres à sable

Les filtres à sable sont d'un emploi courant en traitement des eaux ou d'effluents. Le lit de 1 à 2 m de hauteur comporte un matériau de granulométrie croissante du haut vers le bas. Le décolmatage s'effectue à contre-courant avec le filtrat ou l'eau.

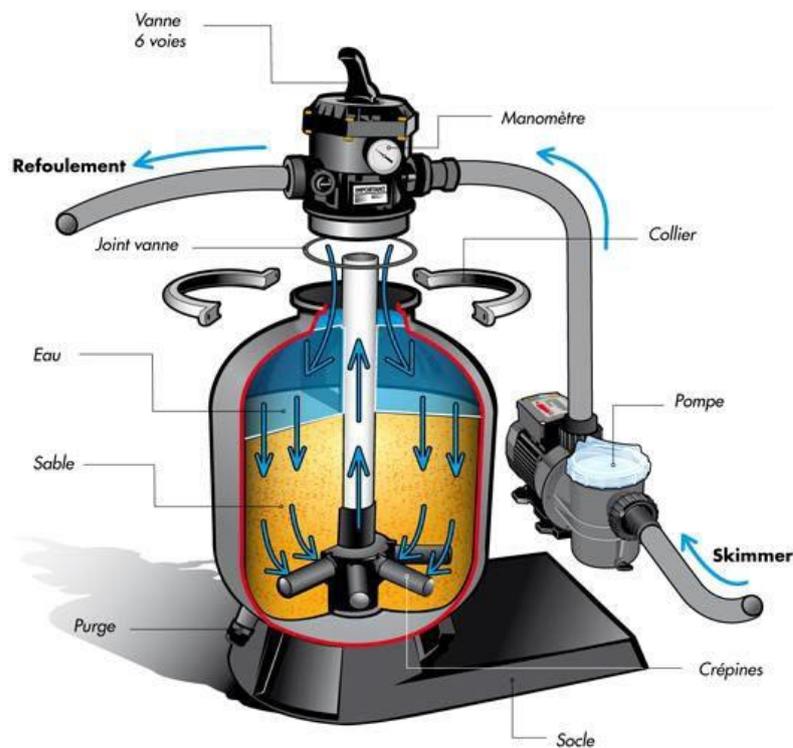


Figure 10 : Les filtres à sable.

9.1.2. Filtres à cartouches

Ce sont des filtres en profondeur, généralement utilisés pour un traitement de finition de liquides avant conditionnement, en utilisant des débits faibles. Selon le type de cartouches utilisées on distingue une finesse de filtration de 0,25 à 100 μm (cartouches consommables de matériaux filés) et de 1 à 200 μm (cartouches régénérables de toile métallique ou de céramique ou de métaux frittés).



Figure 11 : Filtrés à cartouches.

9.1.3. Filtrés – presses

Les filtres – presses sont constitués d'une série de plateaux verticaux juxtaposés en alternance avec des cadres creux dans lesquels le gâteau s'accumule. Les plateaux sont garnis par des toiles. Le serrage du filtre est assuré soit manuellement ou par un dispositif hydraulique. Lorsque les cadres sont remplis de gâteaux, la filtration est terminée, donc on procède au lavage des gâteaux afin de récupérer les extraits restant dans le résidu humide. Les filtres-presses présentent l'intérêt de pouvoir traiter aussi bien des suspensions diluées que des suspensions concentrées (5 à 50 %).

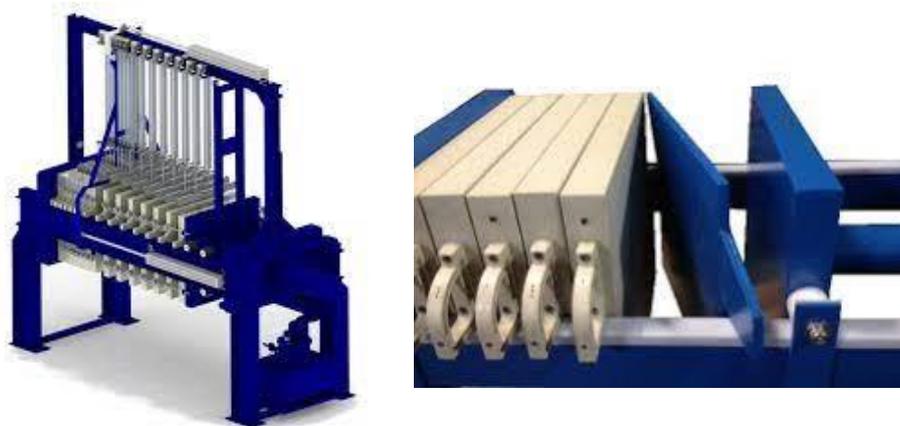


Figure 12 : Les filtres – presses.

Les filtres presses possèdent d'autres avantages qui sont les suivants :

- Grande surface filtrante pour un faible encombrement (30 m² au sol pour 400 m² de surface filtrante ;
- Les filtres supportent des pressions élevées jusqu'à 25 bars ;

- Donnent de meilleurs rendements : c'est pour cette raison qu'ils sont utilisés ou l'épuisement du gâteau est essentiel par exemple (en brasseries, sucreries, cidreries, huileries) ;
- Obtention des filtrats plus limpides ;
- Faible prix d'investissement.

9.2. Filtres continus

Ils permettent d'évacuer le solide et le filtrat sans interruption. Ces filtres sont destinés particulièrement au traitement de suspensions chargées. Ils fonctionnent sous vide ou sous pression.

9.2.1. Filtres rotatifs à tambour sous vide

Ces filtres sont constitués d'un cylindre tournant à axe horizontal, partiellement immergé dans un bac (auge), contenant la suspension à filtrer. Le tambour est compartitionné en secteurs, recouverts d'une toile servant de support de filtration. Les secteurs sont reliés à un distributeur de vide. Lorsque le secteur pénètre dans la suspension à filtrer, le liquide aspiré par le vide traverse la toile et s'écoule dans le secteur. Il est évacué du filtre par le distributeur.

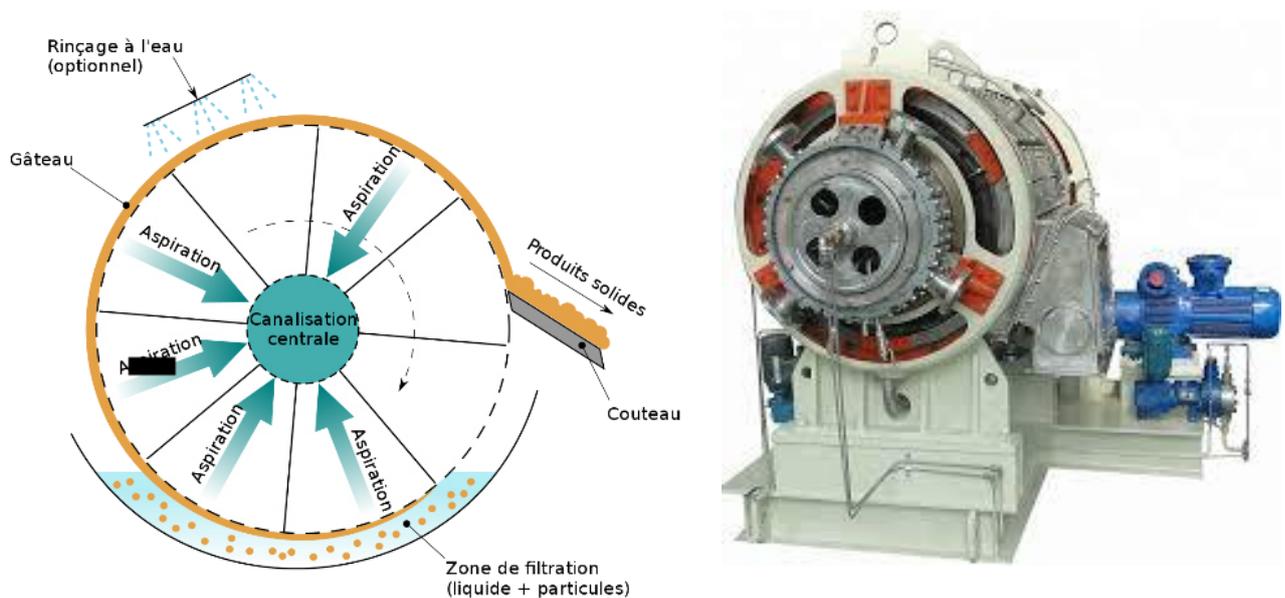


Figure 13 : Filtre rotatif à tambour sous vide.

Ces filtres sont principalement utilisés en sucrerie et pour les suspensions difficiles à filtrer en raison de leur pouvoir colmatant ou de la forte compressibilité du solide.

Ces filtres présentent des inconvénients et des avantages qui sont les suivants :

Inconvénients :

- Risque d'ébullition du filtrat ;

- Surface de filtration faible (35% utilisée) ;
- Faible débit ;
- Ce type de filtration est précédé généralement d'une décantation ou préfiltration pour améliorer la filtrabilité de la suspension.

Avantages :

- Travail en continu.
- Pas de main d'œuvre.
- Les trois phases de travail : filtration, lavage et débâtissage se font d'une manière mécanique très simple.

9.2.2. Filtres rotatifs à tambour sous pressions

Le principe de la filtration reste alors le même sauf que le vide est remplacé par une pression de 1 à quelques bars exercés sur la toile.

Inconvénients :

- Prix onéreux.
- Evacuation discontinue du gâteau.
- Entretien du tambour difficile.

Chapitre 5 : Les séparations membranaires

1. Introduction

Les procédés de séparation par membranes sont impliqués dans de nombreuses opérations industrielles. Le domaine d'application de ces techniques est très étendu et concerne en particulier : l'agroalimentaire, la pharmacie, le traitement de l'eau et des effluents, la chimie et les biotechnologies.

2. Définition

Un procédé membranaire est un procédé qui permet de séparer des constituants d'un mélange à l'aide d'un matériau synthétique appelé membrane. La membrane va permettre de laisser passer certains constituants et d'en retenir d'autres. La membrane va ainsi jouer le rôle de séparateur. Différents potentiels peuvent être appliqués pour faire passer le mélange à travers la membrane : une différence de pression (procédé baro-membranaire), une différence de potentiel électrique (procédé électro-membranaire) ou une différence de concentration (dialyse). Les buts de ce type de procédé peuvent être divers :

- Purification : des impuretés doivent être extraits du composé d'intérêt.
- Concentration : élimination d'une partie du solvant.
- Fractionnement : séparation d'un mélange complexe en plusieurs mélanges différents.

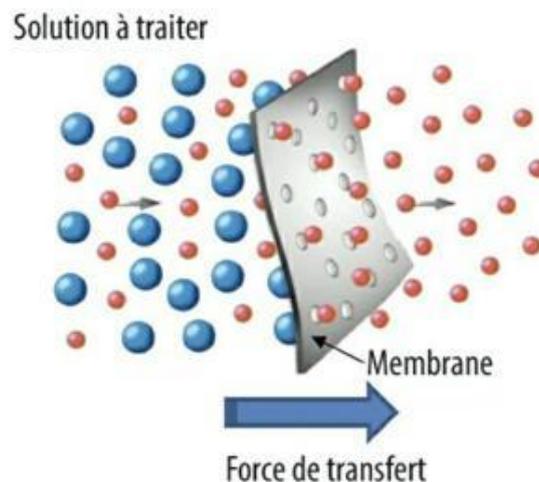


Figure 1 : Principe de la filtration membranaire.

3. Classement des différentes techniques membranaires

La technologie membranaire est devenue une véritable technologie de séparation lors de la dernière décennie. La force principale de la technologie membranaire est le fait que cela fonctionne sans ajout de produits chimiques, avec une conduction de procès facile et bien arrangée.

Le procédé de séparation membranaire est basé sur la présence de membranes semi-perméables. Le principe est assez simple : la membrane agit comme un filtre très spécifique qui laisse passer l'eau, tandis qu'elle retient les solides en suspension et d'autres substances.

Dans la filtration sur membrane on peut distinguer d'une part la micro et l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse.

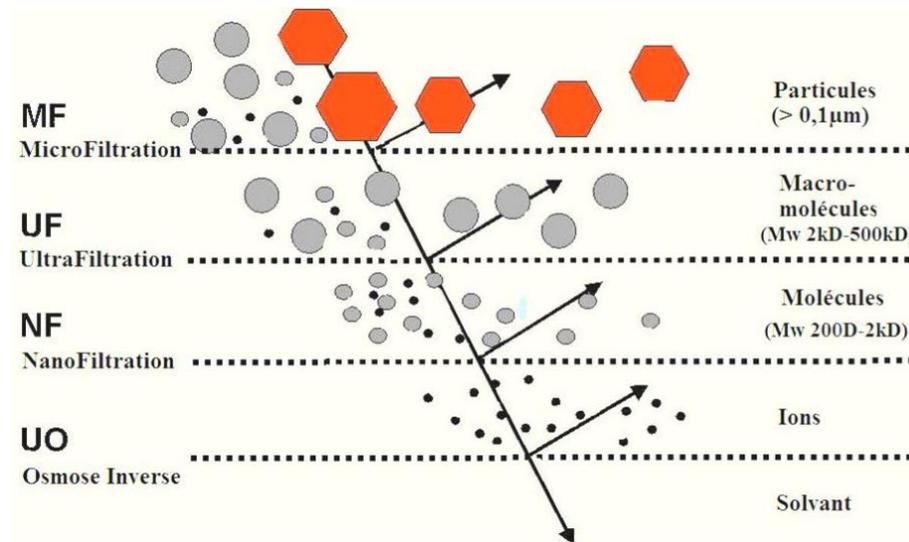


Figure 2 : Les différentes techniques membranaires.

Les différentes techniques membranaires peuvent être classées selon la nature de la force motrice mise en jeu.

Tableau 1 : Techniques membranaires utilisées dans le domaine de la filtration des eaux.

Force Motrice	Domaine d'application
Différence de pression	Microfiltration, Ultrafiltration, Nano Filtration, Osmose Inverse
Différence de concentration	Dialyse
Différence de potentiel électrique	Électrodialyse

3.1. Les techniques membranaires à gradient de pression

Ces techniques, appelées également techniques Baro-membranaires, reposent sur une différence de pression totale de part et d'autre de la membrane, en ordre décroissant de taille de pores de membrane on distingue :

- ✓ La microfiltration (MF) ;
- ✓ L'ultrafiltration (UF) ;
- ✓ La nano filtration (NF) ;

✓ L'osmose inverse (OI).

Elles sont classées selon le diamètre moyen de leurs pores pour les membranes poreuses (MF, UF, NF) ou sur la taille des particules et molécules dont elles assurent la séparation. La figure ci-dessous présente le champ d'application des différentes techniques de séparation par membrane :

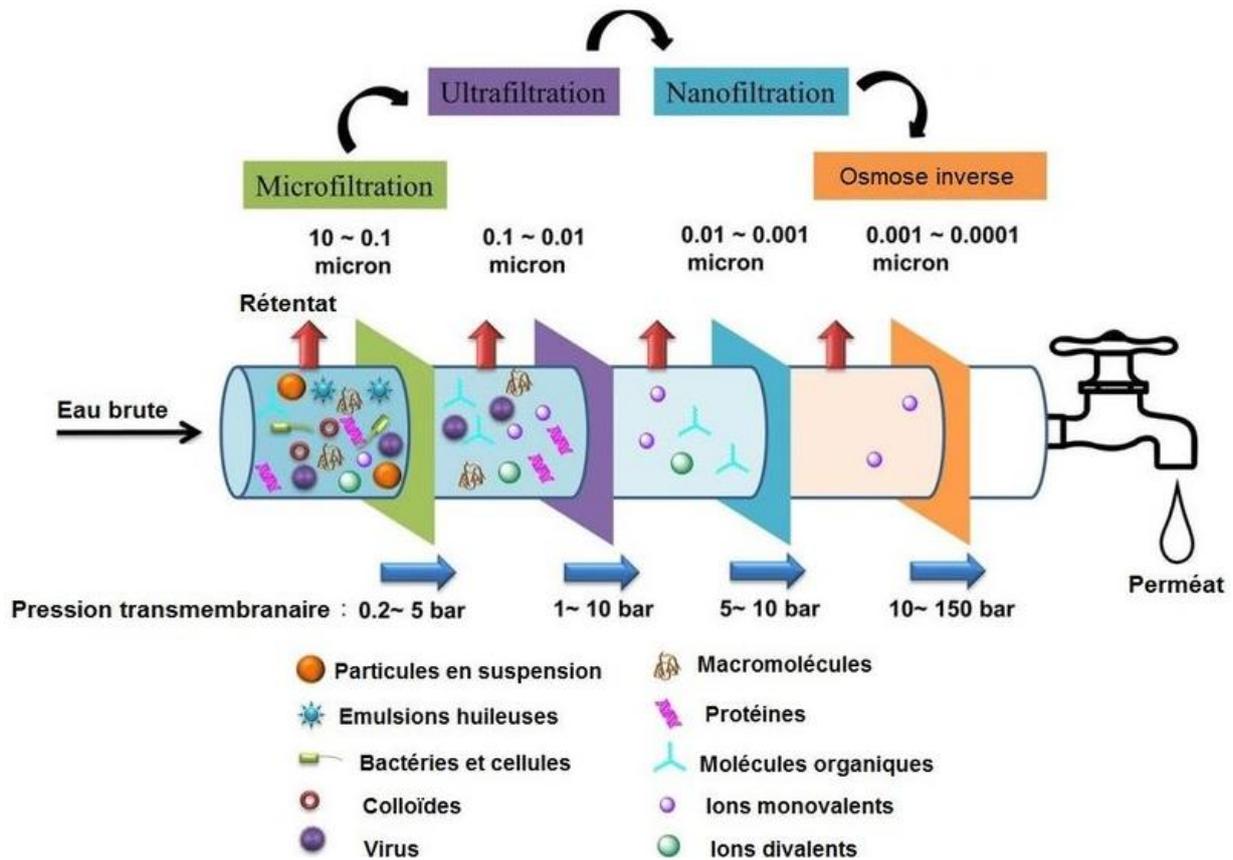


Figure 3 : Le champ d'application des différentes techniques de séparation par membrane.

3.1.1. La microfiltration

Ce procédé de séparation solide-liquide met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0,1 et 10 μm . Les membranes de microfiltration (diamètre de pore de 0,1 à quelques micromètres). Il permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des plus grosses particules obtenues par complexassions, précipitation ou floculation. Ce procédé inclut la récupération de cellules issues de bouillons de fermentation, le fractionnement de protéines de lait, la clarification du sirop de maïs et la récupération de produits chimiques utilisés dans les phases de Nettoyage en Place (NEP).

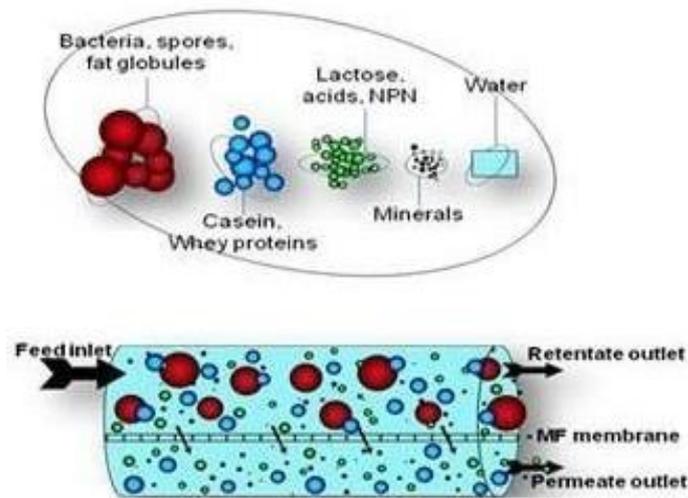


Figure 4 : La représentation de la microfiltration.

3.1.2. L'ultrafiltration

L'UF utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. Les membranes d'ultrafiltration (diamètre de pore de 2 à 100 nm). De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes). Les domaines d'application sont notamment la concentration des protéines sériques, la concentration et la déminéralisation des gélatines et la clarification des jus de fruit.

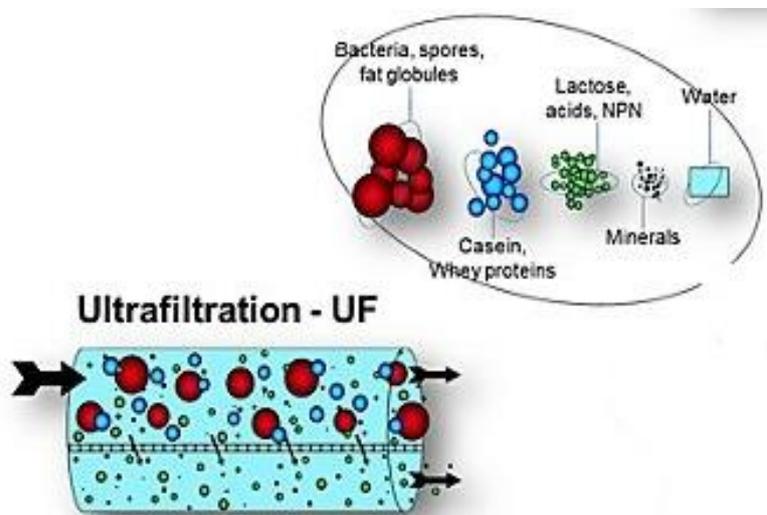


Figure 5 : La représentation de l'ultrafiltration.

3.1.3. La nanofiltration

La nanofiltration est un procédé de filtration unique dont le domaine d'application se situe entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse. Elle est conçue pour obtenir une séparation très spécifique de composés à faible poids moléculaire, tels que les sucres, des minéraux dissous et des sels. Les membranes de nanofiltration possèdent une structure moins dense qui permet d'obtenir des flux

de perméation supérieurs pour des pressions inférieures. Ce procédé sera moins coûteux car il impliquera une consommation d'énergie moindre. Ce procédé inclut la déminéralisation des produits laitiers, la récupération des protéines hydrolysées, la concentration des sucres ainsi que la purification des colorants solubles et des pigments.

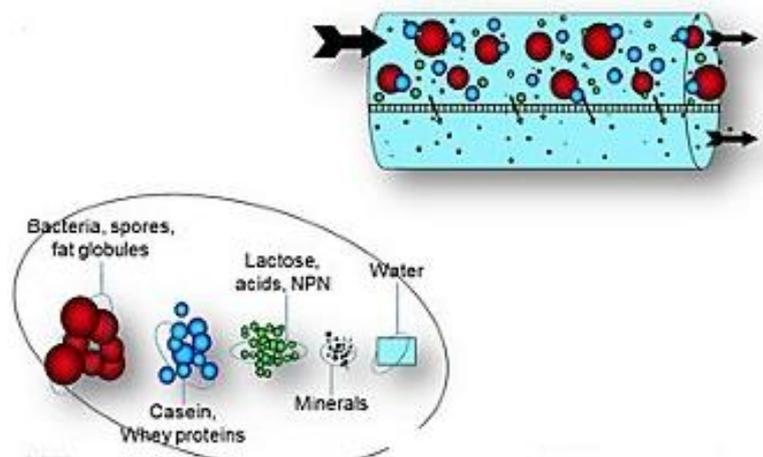


Figure 6 : La représentation de la nanofiltration.

3.1.4. L'Osmose Inverse

L'osmose inverse (OI) est un procédé déjà ancien qui met en œuvre des membranes denses qui ne laissent passer que le solvant et qui arrêtent tous les sels. La séparation solvant-soluté se fait par un mécanisme de solubilisation-diffusion : le solvant s'adsorbe dans la phase membranaire puis diffuse à travers le matériau. La pression appliquée doit être supérieure à la pression osmotique exercée en amont de la membrane par la solution filtrée pour observer un flux de perméat à travers la membrane. Les pressions appliquées varient de 20 à 80 Bar.

L'Osmose Inverse est un procédé haute pression, énergétiquement performant, utilisé pour l'élimination de l'eau par concentration de composés à faible poids moléculaire. L'Osmose Inverse peut aussi être utilisé pour le traitement des eaux usées. Ce procédé est couramment utilisé pour la pré-concentration des produits laitiers ou alimentaires avant l'évaporation, le traitement des condensats des évaporateurs et la purification des eaux de process.

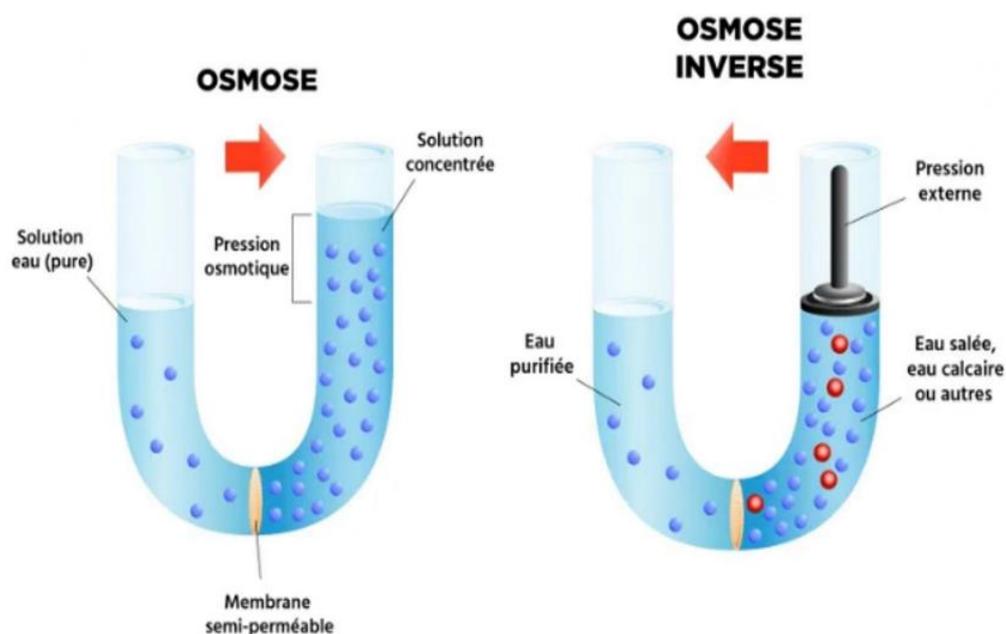


Figure 7 : La représentation d'osmose inverse.

3.2. Techniques membranaire à gradient de potentiel électrique

L'électrodialyse est une technique électro-membranaire qui désigne le transfert d'ions à travers une membrane, sous l'effet d'un champ électrique. Lors de l'action du champ électrique, la membrane anionique autorise le passage des anions et la membrane cationique laisse passer les cations. Les procédés membranaires s'utilisent en général dans une cascade de procédés de traitement. Ce sont des procédés facilement intégrables et contrôlables ; ils n'altèrent pas la qualité des produits et sont respectueux de l'environnement. Un certain nombre de procédés se révèlent concurrents des procédés membranaires. Ils sont résumés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Procédés concurrents aux différentes techniques membranaires.

Osmose inverse	Nanofiltration	Ultrafiltration	Microfiltration
Evaporation	Echange d'ions	Précipitation chimique	Centrifugation
Electrodialyse	Chromatographie	Chromatographie sur gel	Filtration sur diatomées
Echange d'ions		Dialyse	Décantation

4. Classification des membranes

4.1. Définition

La membrane constitue l'élément-clef du procédé membranaire. Barrière semi-perméable, elle autorise le passage préférentiel de certaines substances entre deux phases : l'alimentation et le perméat.

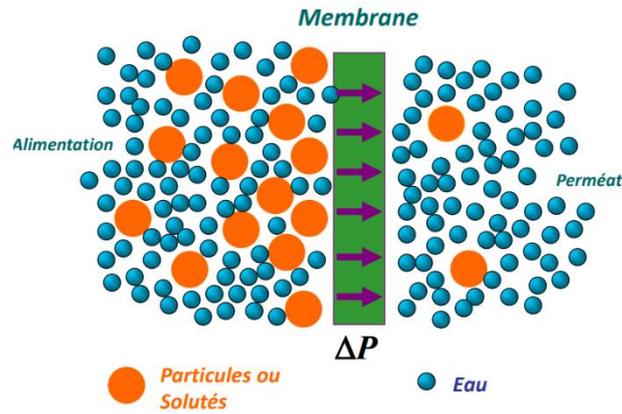


Figure 8 : Schéma de principe de fonctionnement d'une membrane.

4.2. Classification des membranes

Les membranes peuvent être classées d'après plusieurs critères :

- Classification d'après le mécanisme de séparation ;
- Classification d'après la morphologie ;
- Classification d'après la géométrie de préparation des membranes ;
- Classification d'après la nature chimique.

4.2.1. Classification d'après le mécanisme de séparation

La classification la plus répandue des membranes d'après le mécanisme de séparation est la suivante :

4.2.1.1. Membranes poreuses

Membranes poreuses (MF, UF, NF), où les effets de tamisage et de friction jouent des rôles importants. Ce type de membrane est similaire par sa structure au filtre conventionnel, mais elle diffère par la taille de ses pores 0.01 à 1 micron. Les particules plus grosses que les pores sont toutes retenues, celle taille comprise entre les plus gros pores et les plus petits sont partiellement retenus, et les particules de plus petites tailles passent en totalité.

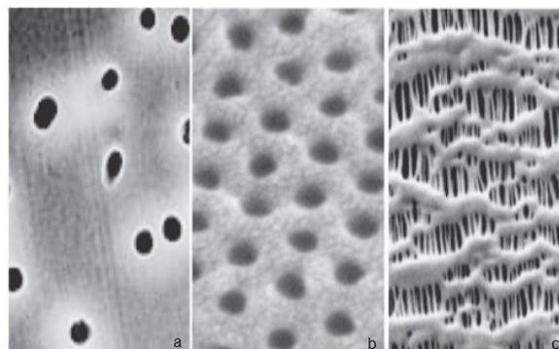


Figure 9: Membranes poreuses. Les pores sont formés (a) par irradiation, (b) par inversion de phases ou (c) par étirement suivie de traitement thermique.

Généralement, en vue d'une meilleure sélectivité, une membrane poreuse est confectionnée de façon à comporter une distribution des diamètres des pores centrés autour d'une seule valeur :

- Soit un diamètre inférieur à 2 nm environ dans le cas de micropores ;
- Soit un diamètre compris entre 2 et 50 nm dans le cas des méso pores ;
- Soit une taille supérieure à 50 nm dans le cas des macros pores ;

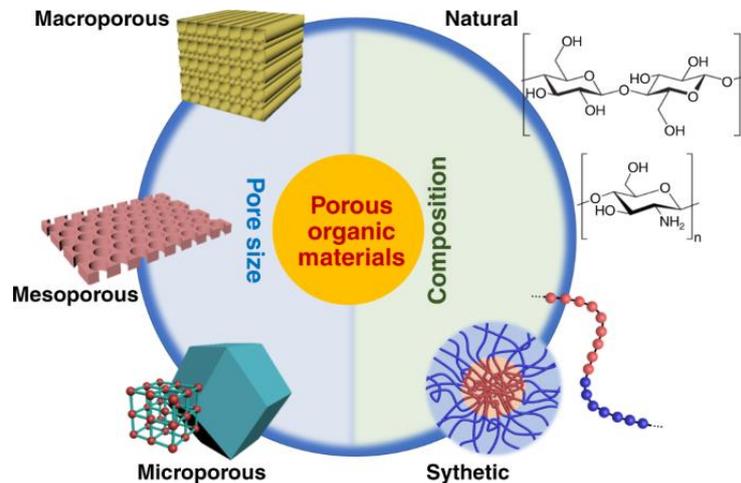


Figure 10: Membranes, Micropores ; Méso pores et Macros pores.

Le mécanisme de transfert de matière sous l'effet de la pression est exclusivement convectif pour le solvant, celui n'entraîne avec lui que les espèces dont la taille est plus petite que celle des pores.

4.2.1.2. Membranes denses

Membranes non poreuses (perméation de gaz, pervaporation, osmose inverse); ces membranes consiste en un film dense à travers lequel le perméat est transporté par diffusion sous l'effet d'une force de pression, de concentration ou de gradient de potentiel électrique. La séparation des composés d'un mélange est directement liée à leur diffusivité et leur solubilité a travers la membrane. Ainsi, une membrane dense peut séparer des composés de taille voisine si leur solubilité (concentration dans la membrane) diffère.

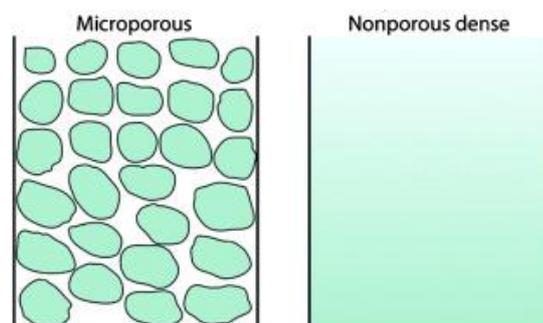


Figure 11: Membranes non poreuses (denses).

4.2.1.3. Membranes échangeuses des ions

Ces types de membranes considérées comme un type spécial de membranes non poreuses, consistant dans des gels denses ayant une charge positive (échangeuses des anions) ou négative (échangeuses des cations).

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-désionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.

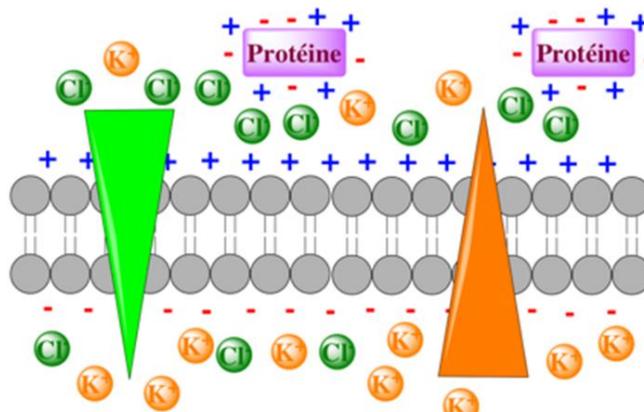


Figure 12: Membranes échangeuses des ions.

4.2.2. Classification d'après la morphologie

Les membranes peuvent être classées en fonction de leur structure ; Trois types de structures sont définis : symétriques, asymétriques ou composites. Les deux premières sont élaborées à partir d'un même matériau, alors que la dernière est composée d'un assemblage de matériaux.

4.2.2.1. Membranes symétriques ou isotrope

Membranes à structure symétrique ont la même structure sur toute leur épaisseur (structure isotrope). Elles sont composées d'un même matériau ayant une porosité sensiblement uniforme dans toute l'épaisseur. Elles possèdent des pores réguliers et cylindriques. Ces membranes ne sont presque plus utilisées de nos jours à cause de leur faible perméabilité. Elles peuvent être denses (absence de pores) ou poreuses. Dans ce cas la membrane dans toute son épaisseur, forme la couche sélective.

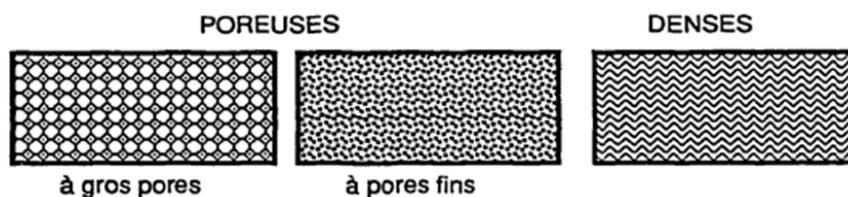


Figure 13: Membranes symétriques ou isotrope.

4.2.2.2. Membranes asymétriques ou anisotropes

Les membranes asymétriques ont une porosité variable dans l'épaisseur de la membrane. Cette structure leur permet de répondre à des exigences contradictoires en matière de filtration à savoir réaliser une séparation avec une sélectivité élevée, assurer un débit de perméation important et présenter une résistance mécanique suffisante. On distingue deux parties bien distinctes : la (ou les) peau(x) et la sous-couche poreuse. La peau est la partie sélective de la membrane. Elle possède la porosité la plus faible et les pores les plus petits. Son épaisseur est très faible devant celle de la membrane : de l'ordre de 1 μ m ou moins. Cette faible épaisseur permet d'associer une haute sélectivité à une haute perméabilité. Les performances en filtration de la membrane ne dépendent donc que des performances de la peau. La peau sera donc mise directement en contact avec le fluide à filtrer. La sous-couche poreuse forme la plus grande partie de la membrane. Elle possède une porosité souvent très importante (60 à 80 %), associée à des pores de grandes dimensions. Elle n'offre pas de sélectivité et n'influe pas sur la perméabilité. Son rôle est d'assurer la résistance mécanique de la membrane.

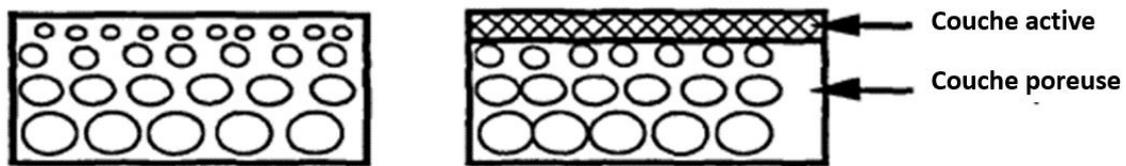


Figure 14: Membranes asymétriques ou anisotropes.

4.2.2.3. Les membranes composites

Les membranes composites sont constituées d'un assemblage de deux ou plusieurs couches de matériaux de différentes porosités et de différentes compositions chimiques. Elles ont été développées afin d'augmenter la perméabilité des membranes en diminuant l'épaisseur de la couche active sélective. Des épaisseurs de l'ordre de 10 à 100 nm sont utilisées. Les autres couches ont une porosité croissante et permettent de garantir la tenue mécanique de la couche active.

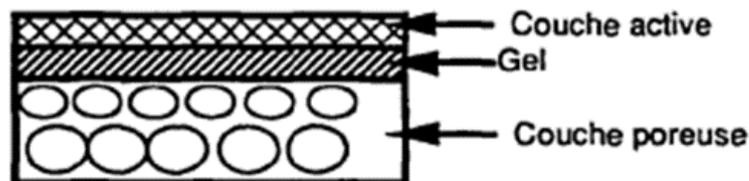


Figure 15: Membranes composites.

4.2.3. Classification d'après la géométrie de préparation des membranes

Les membranes peuvent être classées en fonction de la forme sous laquelle elles sont fabriquées :

- Membranes planes ;
- Membranes cylindriques ;
- Membranes tubulaires ;
- Membranes fibres creuses.

4.2.4. Classification d'après la nature chimique

Les membranes sont fabriquées à partir de polymères organiques et de matières inorganiques. Bien qu'il existe des membranes mixtes faites de polymères et de matériaux inorganiques, la plupart des membranes disponibles commercialement sont faites à partir de polymères ou de matériaux inorganiques.

4.2.4.1. Les membranes organiques

Elles sont fabriquées, pour la plupart d'entre elles, à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, poly sulfones, polyamides...). Les dérivées cellulosiques restent encore très utilisées, ainsi que les polyamides (en osmose inverse et nano filtration); sont de plus en plus répandus car ils résistent mieux à l'oxydation, au pH ou à la température. Les qualités de ces matériaux leur confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications.

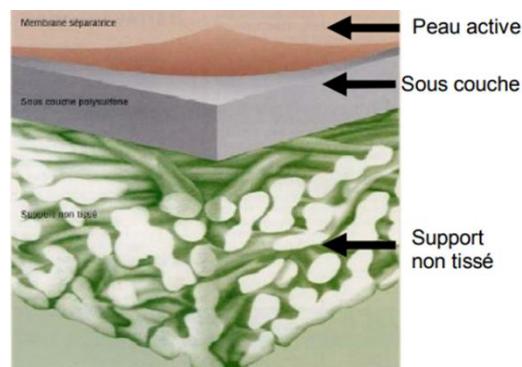


Figure 16: Membranes organiques.

4.2.4.2. Les membranes inorganiques (minérales)

Les membranes minérales sont fabriquées à partir de poudres déposées par un procédé sol-gel en général sur un support poreux (céramique, carbone graphite, alumine) puis traitées thermiquement. Elles présentent une résistance chimique, thermique et mécanique plus grande que les membranes organiques.



Figure 17: Membranes inorganiques multi-canaux.

Les membranes minérales sont largement répandues car elles sont très sélective, très perméables et peuvent être soumises plus facilement à des procédés de nettoyages assez agressifs sans trop être altérées. Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux (matières céramiques, métal fritté, verre).

Tableau 3 : Comparaison des membranes organiques et minérales.

Propriétés	Membranes minérales	Membranes organiques
Applications	MF, UF	MF, UF, NF, OI
Résistance thermique	>100°C	<100°C
Résistance chimique	PH de 0 à 14	PH de 2 à 12
Résistance mécanique	Bonne	Moins bonne
Tolérance aux oxydants	Oui	Fonction du polymère
Compactage	Insensibles	Sensible
Durée de vie	10 ans	5 ans

4.3. Performances des membranes

Les performances et l'efficacité des membranes sont caractérisées par :

4.3.1. Perméabilité

Elle représente le flux volumique ou massique traversant la membrane par unité de surface membranaire.

$$J = \frac{Q_P}{S} \dots \dots \dots (1)$$

4.3.2. Résistance

La résistance hydraulique (R_m) d'une membrane peut être définie comme étant sa résistance à l'écoulement du fluide à filtrer à travers cette membrane. La résistance d'une membrane est l'inverse de sa perméabilité :

$$R_m = \frac{1}{J} = \frac{S\Delta P_m}{Q_p} \dots \dots \dots (2)$$

En supposant que les pores d'une membrane soient cylindriques et rectilignes, la loi de Poiseuille permet d'exprimer la résistance d'une membrane comme :

$$R_m = \frac{8\delta}{n_p \pi r_p^2} \dots \dots \dots (3)$$

δ : est l'épaisseur de la couche active de la membrane ; n_p : est le nombre de pores par unité de surface ; r_p : est le rayon des pores.

4.3.3. Durée de vie

Chaque membrane a une durée de vie, au-delà de laquelle, la membrane ne sera pas performante (chute de rendement et de performances, dégradation de l'état, usures...).

4.3.4. Taux de conversion

Le taux de conversion est par définition la fraction du débit de liquide qui traverse la membrane

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f} \dots \dots \dots (4)$$

Q_p : débit du perméat (m^3/h) ; Q_f : débit de la solution à traiter (m^3/h).

4.3.5. Sélectivité

La sélectivité d'une membrane est, en général, définie par le taux de rejet (appelé aussi taux de rétention) de l'espèce (sel, macromolécule, particule) que la membrane est censée retenir :

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} = 1 - \frac{C_p}{C_f} \dots \dots \dots (5)$$

C_f = concentration de l'espèce à retenir dans la solution et C_p = concentration de la même espèce dans le perméat

Il y a deux valeurs particulières du R (valeurs exprimées en pourcentages) :

R= 0% signifie que le soluté n'est pas du tout retenu par la membrane

R= 100% signifie que le soluté est entièrement retenu par la membrane

4.3.6. Taille des pores

Taille des pores varie de quelques microns en microfiltrations à un nanomètre en nano filtration, à quelques Angströms dans le cas d'une membrane d'OI, la porosité d'une membrane n'est jamais parfaitement uniforme.

4.3.7. La porosité membranaire

La porosité volumique d'une membrane est définie comme le rapport du volume des pores sur le volume total de la membrane. Elle a un impact considérable sur les densités de flux de matière à travers la membrane.

4.3.8. Seuil de coupure

Le Seuil de coupure est défini comme étant la masse molaire critique pour laquelle 90% des solutés sont retenue par la membrane. Plus le seuil de coupure d'une membrane est faible et plus cette membrane peut retenir de petites molécules ou colloïdes. Le seuil de coupure est relié principalement à la taille de pores de la membrane, mais aussi à sa charge, à son degré d'hydratation du pH et au pouvoir ionique de la solution à filtrer, de la pression d'opération et le flux de perméation, l'élasticité et la charge de la membrane.

5. Différents types de géométrie des modules membranaires

5.1. Définition

Un module est la plus petite unité qui peut être changée dans un système industriel. Il s'agit d'un assemblage de membranes avec une entrée d'alimentation commune et des sorties communes de perméat et de concentré. Les modules supportent les membranes, 4 grands types de modules sont commercialisés :

- Les modules tubulaires ;
- Les modules fibres creuses ;
- Les modules plans ;
- Les modules spiralés.

Leur utilisation est fonction de leur application, de leur facilité de montage et de nettoyage, de la maintenance

5.2. Les modules tubulaires

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. Les modules tubulaires sont constitués d'une ou

plusieurs membranes inorganiques ou organiques de forme tubulaire, ayant des diamètres internes entre 4 et 25 mm.

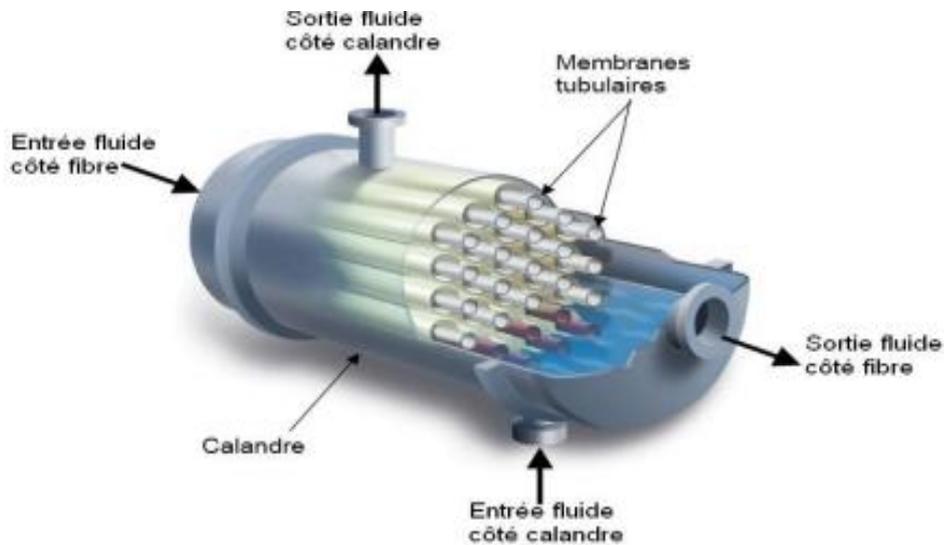


Figure 18: Les modules tubulaires.

5.3. Les modules fibres creuses

Les modules à fibres creuses peuvent contenir des dizaines de milliers de fibres creuses cylindriques obtenues par filage. Leur diamètre externe varie de 500 à 2000 microns tandis que leur diamètre interne varie de 350 à 1000 microns. La peau de la membrane peut être soit à l'intérieur soit à l'extérieur des fibres. Dans le premier cas, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est recueilli à l'extérieur de celles-ci. Dans le deuxième cas, l'eau à traiter circule à l'extérieur et le perméat est recueilli à l'intérieur.

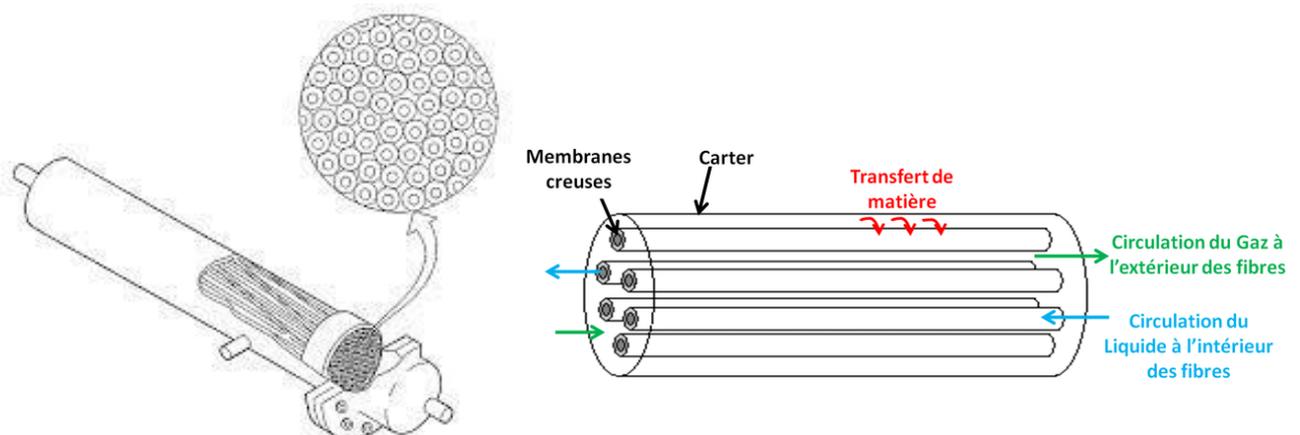


Figure 19: Modules à fibres creuses.

5.4. Les modules plans

Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides.

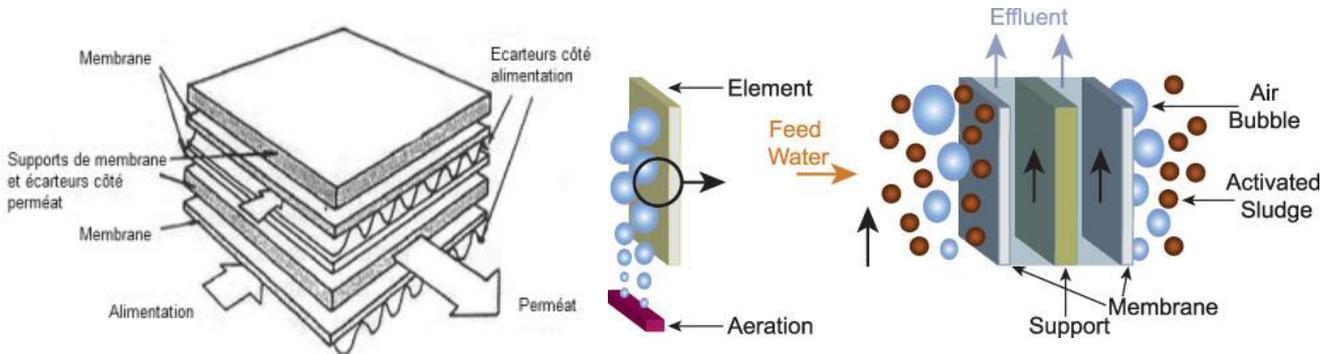


Figure 20: Les modules plans.

5.5. Les modules spiralés

Au sein des modules spiraux, une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multicouche où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.

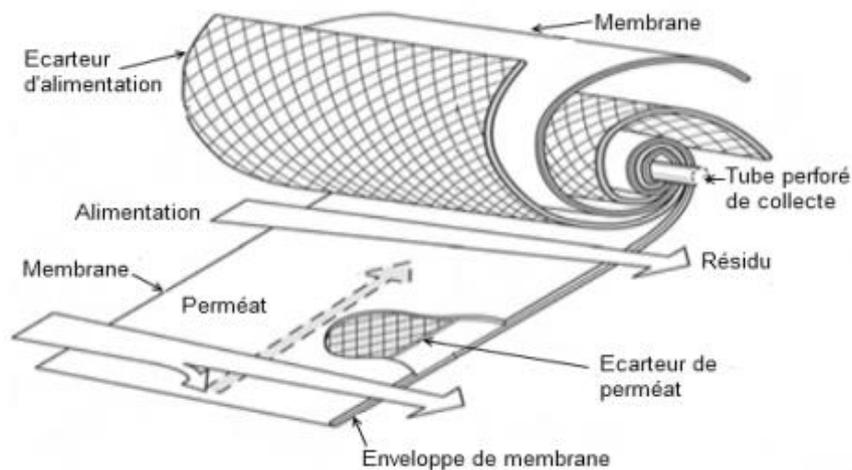


Figure 21: Les modules bobinés en spirale.

6. Matériaux de fabrication

Une grande variété de polymères est utilisée pour la fabrication des membranes. Pour des raisons bien compréhensibles de protection de leur secret de fabrication, les fabricants hésitent à dévoiler avec précision la nature chimique des constituants de leurs membranes et préfèrent en indiquer les principales propriétés en termes :

- De résistance mécanique (déterminant la durée de vie et l'intégrité des membranes) ;
- D'hydrophilicité (déterminant la résistance au colmatage) ;
- De stabilité chimique (résistance aux agents lavant).

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des matériaux de fabrication des membranes.

	Avantages	Inconvénients
Acétate de cellulose	Perméabilité élevée Sélectivité élevée Mise en œuvre assez aisée Adsorption des protéines faible => colmatage moindre	Sensible à la température Sensible au pH Sensible au chlore Sensible au compactage Sensible aux microorganismes
Type polyamide	Bonne stabilité chimique, thermique et mécanique.	Grande sensibilité au chlore Faible perméabilité Phénomènes d'adsorption
Type polysulfone	Bonne stabilité thermique et au pH Résistance au chlore 5 mg/l fonctionnement normal 50 mg/l stockage 200 mg/l traitement de choc	Sensible au compactage Adsorptions
Matériaux acryliques	Bonne stabilité thermique et chimique Stockage à sec possible	Faible résistance mécanique Pores de diamètres assez élevés
Matériaux fluorés	Bonne stabilité thermique et chimique	Faible perméabilité Microfiltration uniquement
Membranes composites	Bonnes caractéristiques : perméabilité et sélectivité Stabilité de pH 2 à 11 Bonne tenue en température	

7. Mise en œuvre des membranes

Il existe deux grands types de mise en œuvre des membranes : l'écoulement frontal et l'écoulement tangentiel.

7.1. Écoulement frontal

Ce mode de filtration consiste à amener la solution à filtrer perpendiculairement à la membrane. Les molécules retenues se concentrent au niveau de la surface membranaire ce qui provoque une diminution du flux.

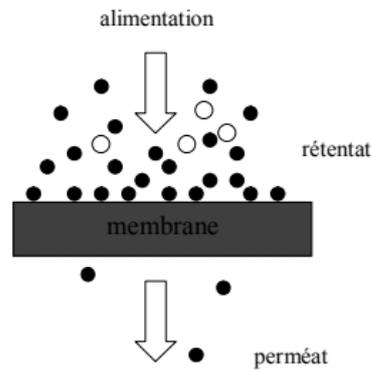


Figure 22: Schéma de la filtration frontale.

7.2. Écoulement tangentiel

Dans ce cas, la solution à filtrer circule parallèlement à la membrane. Le fonctionnement du système de filtration s'effectue en continu : l'accumulation à la paroi des espèces retenues à la surface de la membrane est moins importante qu'en filtration frontale.

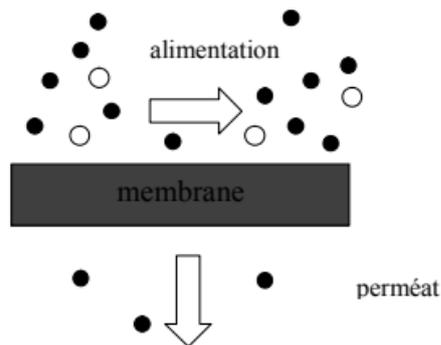


Figure 23: Schéma de la filtration tangentielle.

8. Les avantages et les inconvénients des procédés membranaires

D'un point de vue général, les procédés membranaires présentent par rapport aux technologies séparatives alternatives (distillation, cristallisation, centrifugation, ...) divers avantages et inconvénients il nous a donc semblé intéressant de résumer, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients.

8.1. Avantages

Les avantages de ces procédés, comparés aux techniques conventionnelles, sont nombreux :

- ✓ Grande qualité du produit final obtenu : performances de séparation élevées, traitement doux (basse température).
- ✓ Facilité d'emploi et d'extrapolation : automatisation, compacité, conception modulaire...
- ✓ Economies d'énergie (par rapport aux procédés thermiques).

- ✓ Elles opèrent à température ambiante en général, d'où l'absence de dénaturation des molécules fragiles telles que les protéines et le respect des qualités organoleptiques grâce à l'absence de choc thermique.
- ✓ La séparation est fondée sur des critères physiques (diamètres de pores) et ne fait pas intervenir de réactifs chimiques comme extractant (solvants, acides, bases...).
- ✓ Les procédés peuvent fonctionner en continu et sont simples et faciles à automatiser, du moins en principe.
- ✓ Une absence de changement de phase, donc une moindre dépense énergétique comparée à des opérations comme la distillation ou l'évaporation ;
- ✓ Accumulation nulle de constituants dans la membrane, d'où un fonctionnement quasiment en continu, n'ayant pas besoin de cycle régénération comme en échange d'ion. Des arrêts sont cependant nécessaires pour le nettoyage périodique des membranes ;

8.2. Inconvénients

- ✓ Colmatage des membranes, qui se traduit, en général, par une baisse de la perméabilité et une modification de la sélectivité qui n'est pas toujours souhaitable ;
- ✓ Sélectivité imparfaite des membranes : elle n'est jamais égale à 100 % sauf peut-être en microfiltration.
- ✓ Durée de vie des membranes limitée, soit par perte de résistance mécanique, soit par suite d'une mauvaise tenue aux réactifs utilisés pour le nettoyage ;
- ✓ Nécessité de faire circuler le liquide à filtrer tangentiellement à la membrane à des vitesses relativement élevées, ce qui implique des pompes de grande taille et de consommations d'énergie élevées.
- ✓ Niveau d'investissement et temps de retour en amortissement élevé avec un coût de fonctionnement "membrane" important,
- ✓ Limitations technologiques, en général liées aux caractéristiques du fluide à traiter et à la non-disponibilité de membranes adaptées.

9. Applications industrielles

Les procédés membranaires sont très utilisés dans l'industrie :

- ✓ En agroalimentaire pour concentrer des jus de fruit, pour séparer les protéines du lait, pour clarifier les produits.
- ✓ En biomédical pour extraire le plasma du sang (plasmaphérèse).
- ✓ En pharmacie pour filtrer après une étape de cristallisation.

- ✓ En biotechnologie pour clarifier les moûts de fermentation.
- ✓ En environnement pour traiter les eaux usées ou pour potabiliser de l'eau douce ou salée.

Chapitre 6 : Electrodialyse

Introduction

Les procédés électromembranaires concernent tous les transferts de matières contenues dans un fluide, effectués avec des membranes à perméabilité sélective aux entités chargées par apport d'énergie électrique. Nous nous intéressons à l'électrodialyse, technique la plus répandue industriellement. Cette technique utilise l'énergie électrique seulement pour le transfert des espèces, en aucun cas pour leur transformation chimique.

1. La dialyse

Cette technique est initialement développée dans le secteur médical pour la dialyse rénale ou sanguine puis étendue à des techniques de purification. Le principe de la dialyse repose sur la diffusion de substances hydrosolubles, ioniques (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-) ou moléculaires (glycoses), de faible poids moléculaire du plasma dans le dialysat au travers d'une membrane semi-perméable sous l'effet de leurs gradients de concentration. La membrane séparant les deux compartiments, sang et liquide de dialyse, comporte des milliers de pores microscopiques qui permettent le passage d'eau (osmose) et de certaines substances dissoutes (diffusion) de petit volume, mais pas celui de substances de volume plus important.

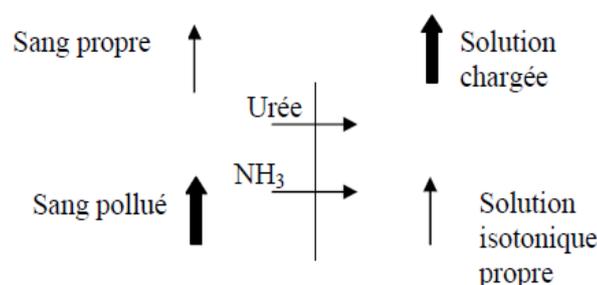


Figure 1 : Principe de la dialyse.

2. Les membranes échangeuses d'ions

Les membranes ioniques sont constituées d'un matériau macromoléculaire (squelette) portant des groupes ionisables. La membrane contient des ions fixes, solidaires du squelette, électriquement neutralisés par des charges mobiles de signe opposé appelés les contre-ions. Ces derniers sont positifs dans le cas d'une membrane cationique et négatifs pour une anionique.

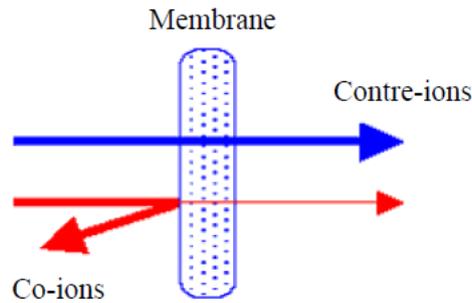


Figure 2 : Représentation schématique d'une membrane échangeuse d'ions.

Il existe trois types différents de membranes échangeuses d'ions.

3.1. Les membranes échangeuses de cation (membranes cationiques)

Les membranes échangeuses de cations contiennent des groupes chargés négativement fixés sur une matrice polymère hydrophobe. Elles sont perméables aux cations uniquement.

3.2. Les membranes échangeuses d'anions (membranes anioniques)

Les membranes échangeuses d'anions contiennent des groupes chargés positivement fixés à une matrice polymère hydrophobe. Ce type de membrane est uniquement perméable aux anions.

3.3. Les membranes bipolaires

Les membranes bipolaires correspondent à un type spécial de membrane échangeuse d'ions. Elles sont composées de deux couches de polymère portant des charges fixes, une couche anionique et une couche cationique. Contrairement aux membranes utilisées pour des fins de séparation, rien ne devrait être transporté d'un côté à l'autre de la membrane. Le seul transfert désiré est celui des molécules d'eau en vue d'une réaction dans la jonction bipolaire de la membrane dans laquelle l'eau est séparée en ions hydroxyles et en protons. Sous l'effet du champ électrique, les protons et les ions OH^- migrent à travers la face cationique et anionique respectivement.

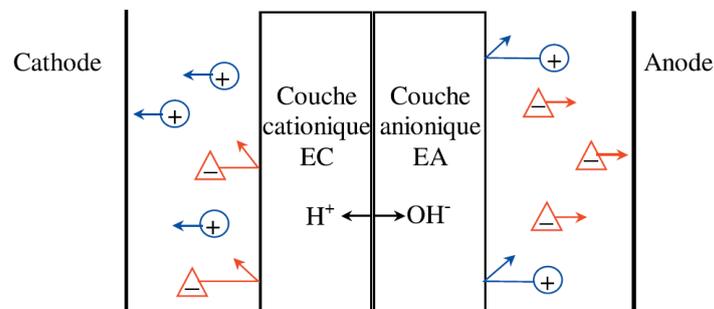


Figure 3 : Principe de la membrane bipolaire.

3. L'électrodialyse (ED)

4.1. Définition

L'électrodialyse d'une façon générale est un procédé membranaire basé sur le transport des ions à travers une membrane semi-perméable avec comme force motrice un potentiel électrique. Les membranes utilisées sont appelées des membranes échangeuses d'ions ou membranes ioniques. Au départ, l'électrodialyse a été employée à grande échelle pour le dessalement d'eaux de mer pour les rendre aptes à la consommation. Parmi les premières utilisations industrielles figure aussi la production d'acides et de bases à partir de leur sel.

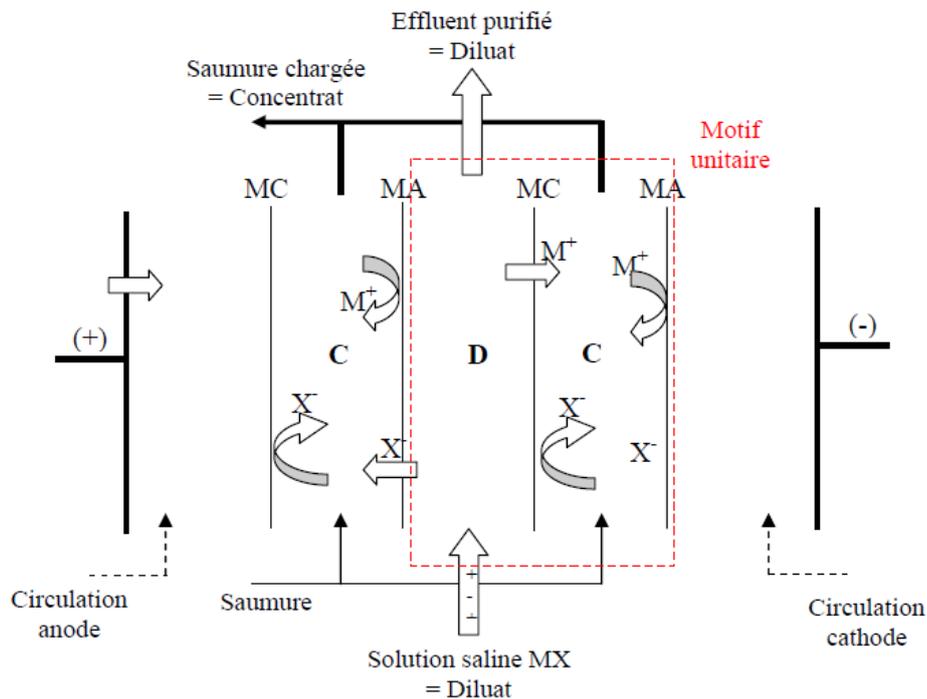


Figure 4 : Schéma de principe de l'électrodialyse à deux compartiments.

4.2. Principe de l'Electrodialyse

Cette technique d'électrodialyse permet l'extraction et la reconcentration d'espèces ionisées, dans le but, soit de dépolluer ou dessaler un effluent, soit d'en récupérer des produits valorisables. Le principe de l'ED est basé sur la sélectivité des membranes pour le transfert de certains ions sous l'effet d'un champ électrique. Il s'agit de placer sur le trajet des ions une série alternée de membranes permselectives aux anions et aux cations.

En général, l'électrodialyse est effectuée dans une cellule constituée de 3 compartiments principaux ; un compartiment pour l'électrolyte, dont la fonction est d'éliminer les produits se formant au niveau des électrodes tout en maintenant un milieu conducteur, un deuxième pour le concentrat et un troisième pour le diluât.

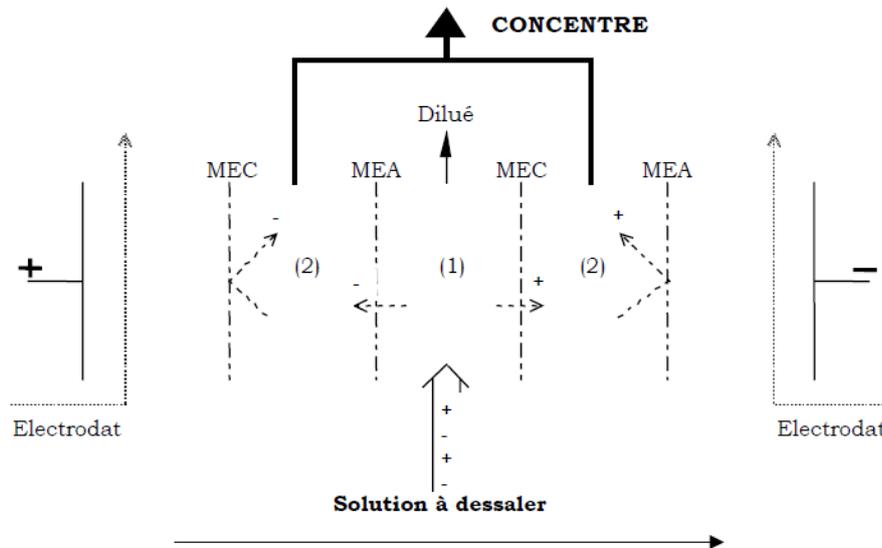


Figure 5 : Principe de l'électrodialyse.

4.3. Les variantes de l'électrodialyse

Le procédé d'électrodialyse à deux compartiments (deux circuits) est de loin le plus répandu industriellement.

4.3.1. Electrolyseur à trois compartiments (trois circuits)

Un électrolyseur à trois compartiments a pour objectif d'assurer une substitution d'ions (cation ou anion) sur l'effluent circulant dans le compartiment central. Les applications de ce procédé sont diverses, parmi lesquelles :

- ✓ Acidification
- ✓ Basification
- ✓ Neutralisation d'une base

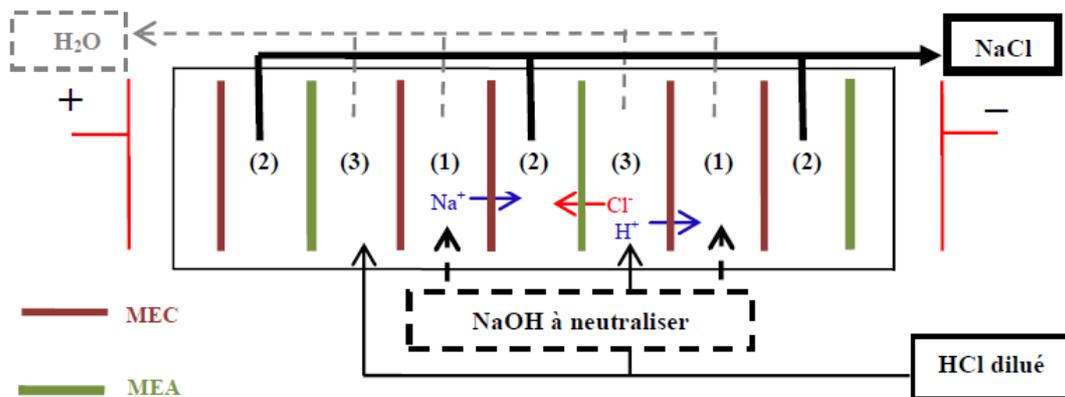


Figure 6 : Montage d'électrodialyse à trois compartiments pour la neutralisation de la soude caustique.

4.3.2. Electrolyseur à quatre compartiments (quatre circuits)

Un électrolyseur à quatre compartiments a pour objectif d'assurer une double substitution entre les ions de deux solutions alimentées dans les compartiments 1 et 3.

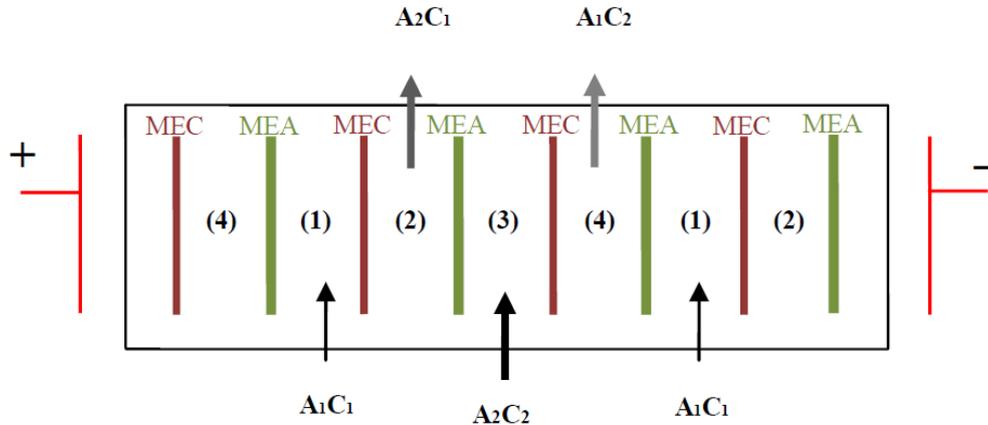


Figure 7 : Montage d'électrodialyse à quatre compartiments.

5. L'électrodialyse et ses nombreuses applications

5.1. Électrodialyse conventionnelle (EDC)

5.1.1. Définition

L'électrodialyse conventionnelle permet de déminéraliser, de concentrer ou de purifier des molécules organiques ionisées, de poids moléculaire généralement inférieur à 200 g.mol^{-1} .

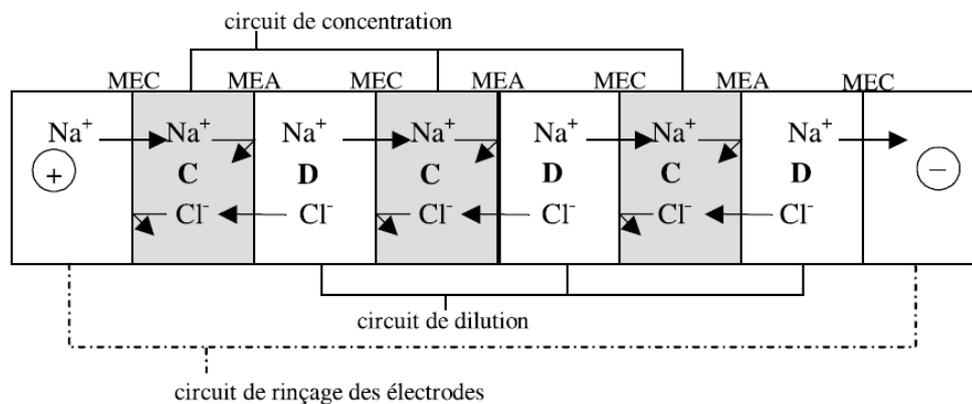


Figure 8 : Schéma de montage d'un empilement d'électrodialyse conventionnelle.

5.1.2. Applications de l'électrodialyse conventionnelle

5.1.2.1. Industries chimiques et pharmaceutiques

En chimie, certaines extractions liquide-liquide qui nécessitent l'emploi de solvants nocifs peuvent être remplacées par l'EDC. Elle peut être aussi envisagée dans des procédés de recyclage de molécules organiques.

Dans l'industrie du traitement de surface, l'EDC est parfois intégrée dans des procédés de recyclage des bains de nickelage contenant des sels d'hypophosphites.

Dans les industries chimiques et pharmaceutiques, plusieurs unités d'électrodialyse conventionnelle ont été implantées pour purifier des molécules organiques :

- ✓ Extraction d'acide nitrique d'une solution de glyoxal,
- ✓ Purification de phénylacétate et recyclage de celui-ci au cours de la production de pénicilline,
- ✓ Purification de lactate de sodium ou d'ammonium à partir d'un jus de fermentation.

5.1.2.2. Industries agroalimentaires

Dans l'industrie agroalimentaire, l'électrodialyse est principalement utilisée pour la déminéralisation. De nombreuses unités d'électrodialyses sont intégrées dans des procédés de déminéralisation de lactosérum.

5.1.2.3. Traitement d'eau

De nombreuses installations d'électrodialyse ont été commercialisées à travers le monde pour la concentration de l'eau de mer et le dessalement de l'eau saumâtre. Parmi les unités de moyenne taille, on peut citer en exemple une unité de dessalement d'eau saumâtre en Algérie (région de Biskra) produisant 120 m³/h d'eau potable. L'électrodialyse permet d'abattre de 80 % la teneur en TDS (« Total Dissolved Solids ») (de 2 700 à 700 ppm) avec un taux de récupération d'eau de 80 %. La déminéralisation est obtenue en un seul étage, chaque empilement d'EDC pouvant traiter 40 m³/h.

5.2. Électrodialyse bipolaire (EDBM)

L'électrodialyse bipolaire (EDBM) permet la conversion d'un sel en forme acide et en base associée.

5.2.1. Principe et définition

Une membrane bipolaire est constituée de trois couches : une face échangeuse de cations (EC), une face échangeuse d'anions (EA) et une interface hydrophile de jonction. Sous l'effet d'un champ électrique dans des conditions spécifiques, l'eau contenue dans la membrane est dissociée en ions H⁺ et OH⁻. L'utilisation d'une membrane bipolaire permet donc de réaliser une titration physique, directement sans ajout d'acide ou de base. En effet, elle produit simultanément des ions H⁺ qui provoquent une titration acide dans le compartiment proche de la cathode, et des ions OH⁻ qui provoquent une titration basique dans le compartiment proche de l'anode.

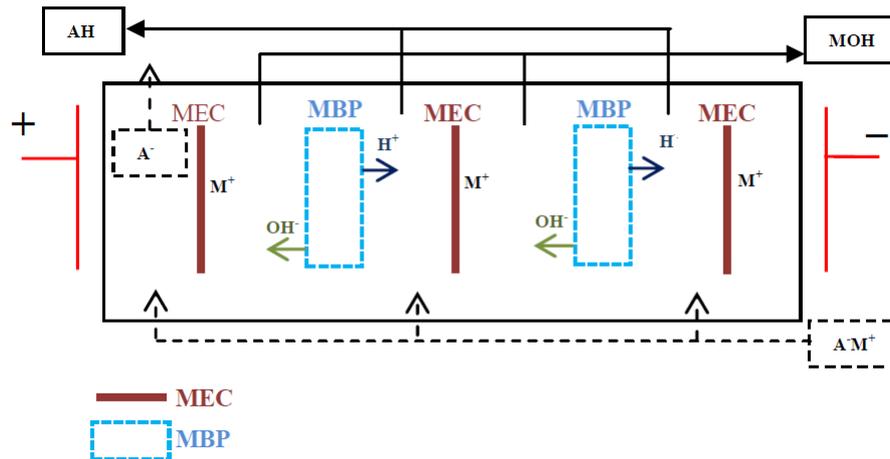


Figure 9 : Electrodialyse à membranes bipolaires.

5.2.2. Applications de l'électrodialyse bipolaire

L'électrodialyse bipolaire (EDBM) permet la conversion d'un sel en forme acide et en base associée.

5.2.2.1. Production d'acides organiques

Depuis 1997, plusieurs unités d'électrodialyse bipolaire ont été installées principalement dans l'industrie de production d'acides organiques : lactique, gluconique, acétique. Une durée de vie de la membrane bipolaire supérieure à 18 000 h a permis de réduire très significativement les coûts d'exploitation et le remplacement des membranes représente aujourd'hui environ 30 % du coût d'exploitation global. L'électrodialyse bipolaire est le plus souvent intégrée dans un procédé qui inclut d'autres techniques séparatives ou échangeuses d'ions : microfiltration, ultrafiltration, résines.

5.2.2.2. Industrie agroalimentaire

On peut imaginer utiliser l'électrodialyse bipolaire pour l'ajustement de pH de certaines boissons, comme les jus de fruits, sans aucun ajout de produit chimique. Pour pallier à ce problème, l'ajout d'acide tartrique est la principale alternative utilisée. Contrairement à l'ajout d'acide tartrique, cette nouvelle technique permet un pilotage précis de la baisse du pH.

5.2.2.3. Traitement des effluents salins

Dans le contexte environnemental actuel, les demandes se font plus nombreuses pour trouver une solution au traitement des effluents salins. Une des solutions consiste à traiter le sel par électrodialyse bipolaire afin de le valoriser en base et acide qui peuvent être réutilisés sur le site de production. En considérant les contraintes de rejet de plus en plus strictes et le coût global de cette technologie qui a tendance à baisser, l'électrodialyse bipolaire à trois compartiments paraît de plus en plus attractive.

Dr. KSOURI Rabah
Département de Génie des Procédés
ksourira@hotmail.com

Guelma, le 16 /11/ 2023

A Mme la présidente du comité scientifique du département de Génie des Procédés

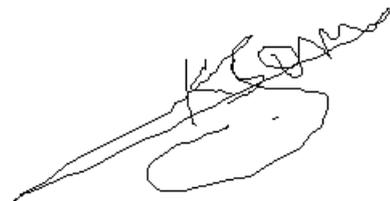
Objet : Modification et levée des réserves dans le polycopié de cours du Dr. I. KOUADRI

Madame,

Après les modifications apportées au polycopié et la levée de toutes les réserves citées dans le rapport d'expertise, je recommande favorablement l'approbation du polycopié par le comité scientifique du département de génie des procédés.

Veillez agréer Madame la présidente du comité scientifique, l'expression de mes meilleures salutations.

Dr. Rabah KSOURI

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'KSOURI', written over a faint, irregular stamp or mark.