

# **Concepts de génie alimentaire**

## **Procédés associés**

### **et applications à la conservation des aliments**

**Laurent Bazinet**

**François Castaigne**



11 rue Lavoisier  
75008 Paris

# Table des matières

Introduction.....	1
-------------------	---

## Première partie

### Principes de conservation et notions préliminaires

#### Chapitre 1

##### L'activité de l'eau en conservation des aliments

1. L'activité de l'eau.....	7
1.1 Définition.....	7
1.2 Relation $a_w$ et humidité relative.....	8
1.3 Loi de Raoult.....	9
1.4 Mesure de l'activité de l'eau.....	10
2. Les isothermes de sorption.....	11
2.1 Définition et relation avec la valeur d' $a_w$ .....	11
2.2 Courbes de désorption et d'adsorption.....	11
2.3 Hystérésis.....	13
2.4 Détermination théorique de la couche d'eau monomoléculaire.....	14
2.5 Relation entre isotherme de sorption et entreposage d'un aliment.....	16
3. Relation entre l'activité de l'eau et la détérioration des aliments.....	18
3.1 Catégories d'aliments et activité de l'eau.....	18
3.2 Réactions de détérioration des aliments liées à l' $a_w$ .....	20
3.2.1 Oxydation des lipides.....	20
3.2.2 Brunissement non enzymatique.....	21
3.2.3 Réactions enzymatiques.....	21
3.2.4 Croissance des microorganismes.....	22
3.3 Comment baisser l'activité de l'eau.....	23
3.4 Les produits à humidité intermédiaire.....	24
3.4.1 Procédé dit d'infusion humide.....	24
3.4.2 Procédé dit de mélange.....	26
Conclusion.....	29
Bibliographie.....	30

#### Chapitre 2

##### Cinétique de réaction et paramètres de prédiction de la durée de vie des aliments

1. Vitesse et ordre de la réaction.....	32
1.1 Vitesse de réaction.....	32
1.2 Ordre de la réaction.....	33
1.2.1 Réaction d'ordre zéro.....	33
1.2.2 Réaction d'ordre un.....	36
1.2.3 Réaction d'ordre deux.....	38
1.2.4 Réaction d'ordre trois.....	39

2.3	Transfert de masse par migration .....	196
2.3.1	Définition .....	196
2.3.2	Taux de transfert de masse par migration .....	196
3.	Transferts de masse stationnaires.....	197
3.1	Transfert de masse par diffusion dans un corps : cas général .....	197
3.1.1	Cas des liquides .....	198
3.1.2	Cas des gaz.....	199
3.2	Transfert de masse par diffusion à travers des couches successives.....	205
3.2.1	Cas des liquides .....	205
3.2.2	Cas des gaz.....	207
3.3	Transfert de masse par diffusion dans un cylindre .....	209
3.3.1	Cas des liquides .....	209
3.3.2	Cas des gaz.....	211
3.4	Cas de transferts de masse combinés (diffusion-convection) à travers une paroi plane .....	212
3.4.1	Cas des liquides .....	212
3.4.2	Cas des gaz.....	214
3.5	Cas de transferts de masse combinés (diffusion-convection) à travers la paroi d'un tuyau.....	215
4.	Estimation des coefficients de transferts de masse par convection .....	218
4.1	Invariants de similitude .....	218
4.1.1	Le nombre de Reynolds : $N_{Re}$ .....	218
4.1.2	Le nombre de Sherwood : $N_{Sh}$ .....	218
4.1.3	Le nombre de Schmidt : $N_{Sc}$ .....	219
4.1.4	Le nombre de Lewis : $N_{Le}$ .....	219
4.1.5	Le nombre de Biot : $N_{Bi}$ .....	219
4.2.	Équations permettant de calculer le coefficient de transfert de masse par convection.....	220
4.2.1	Cas d'un fluide s'écoulant dans un tuyau.....	220
4.2.2	Cas d'un fluide s'écoulant parallèlement à une paroi plane .....	220
4.2.3	Cas d'un fluide s'écoulant autour d'une sphère .....	221
4.2.4	Cas d'une cuve munie d'un agitateur .....	222
5.	Transferts de masse non stationnaires.....	222
5.1	Diffusion transitoire .....	223
5.2	Diffusion des gaz.....	226
	Bibliographie .....	228

## Seconde partie

### Opérations unitaires et procédés de conservation

#### Chapitre 9

#### Échangeur de chaleur

1.	Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur.....	231
1.1	Fonctionnement d'un échangeur de chaleur .....	231
1.2	Profil de température .....	233
2.	Différents types d'échangeurs de chaleur .....	233
2.1	Les échangeurs de chaleur à plaques .....	233
2.1.1	Généralités .....	233
2.1.2	Modes de fonctionnement.....	234
2.1.3	Configurations .....	234
2.1.4	Autres paramètres importants des échangeurs de chaleur à plaques .....	236
2.2	Les échangeurs de chaleur à spirale.....	237
2.3	Les échangeurs de chaleur à surface raclée .....	237

4.3	Effet des paramètres opératoires.....	495
4.3.1	Pression transmembranaire.....	495
4.3.2	Propriétés des fluides à traiter.....	499
4.4	Rendements en séparation membranaire.....	500
5.	Transport membranaire.....	501
5.1	Rappels et définitions.....	501
5.1.1	Potentiel chimique.....	501
5.1.2	Pression osmotique.....	502
5.2	Mécanismes de rétention.....	505
5.2.1	Rétention stérique.....	505
5.2.2	Rétention chimique.....	506
5.2.3	Rétention électrique.....	506
5.3	Équations de transport membranaire.....	507
5.3.1	Thermodynamique irréversible.....	508
5.3.2	Modèle de solution-diffusion.....	509
5.3.3	Modèle capillaire.....	515
6.	Polarisation de concentration et colmatage.....	516
6.1	Polarisation de concentration.....	517
6.1.1	Description du phénomène.....	517
6.1.2	Modélisation de la polarisation : théorie du film.....	518
6.1.3	Coefficient de transfert de matière.....	521
6.2	Colmatage.....	523
	Conclusion.....	525
	Bibliographie.....	526

## Chapitre 17

### Déminéralisation, enrichissement et stabilisation par procédés électromembranaires

L. Bazinet

1.	Introduction.....	527
2.	L'électrodialyse.....	528
2.1	Définition.....	528
2.2	L'électrodialyseur ou module d'ÉD.....	528
2.3	Les membranes d'électrodialyse.....	532
2.3.1	Les membranes monopolaires.....	532
2.3.2	Les membranes bipolaires.....	533
2.3.3	Les membranes de filtration.....	535
3.	Applications de l'ÉD pour la conservation des aliments.....	536
3.1	Stabilisation tartrique des vins par ED avec membranes monopolaires.....	537
3.2	Inhibition du brunissement enzymatique du jus de pomme frais opalescent par ED avec membranes bipolaires.....	539
3.3	Enrichissement en polyphénols naturels d'un jus de canneberges par ED avec membranes de filtration.....	542
4.	Éléments de théorie électrochimique.....	544
4.1	Quantité d'électricité.....	544
4.2	Équivalent masse transporté.....	546
4.3	Flux molaire.....	547
4.4	Nombre de transport.....	549
5.	Phénomène de transport.....	550
5.1	Transfert de masse.....	551

# Introduction

La diversité des produits alimentaires présents sur les étagères des supermarchés ne surprend pas les consommateurs qui se sont habitués à voir de plus en plus d'aliments fabriqués à l'aide de procédés très différents. En effet, au fur et à mesure que les connaissances augmentent dans les domaines de la microbiologie, de la chimie, du génie et de l'emballage, l'industrie alimentaire met sur le marché des produits de plus en plus nombreux dont la qualité s'améliore constamment.

Il faut reconnaître que l'aliment est un système complexe. Les réactions de détérioration sont intrinsèques ou extrinsèques à l'aliment. Les réactions intrinsèques impliquent les éléments qui composent l'aliment : les protéines (putréfaction), les glucides (fermentation), les lipides (oxydation), les enzymes, les minéraux, les vitamines, les saveurs, les pigments et l'eau. Les réactions extrinsèques impliquent des facteurs non compris dans les aliments : les microorganismes et leurs enzymes, l'oxygène, la lumière, l'humidité, la température d'entreposage. Les détériorations des aliments deviennent compliquées dans la mesure où toutes ces réactions se produisent en même temps, à un rythme différent. Quand on parle de la conservation des aliments, il faut déterminer lesquels de ces facteurs ou de ces réactions sont susceptibles de détériorer l'aliment en premier. Une fois ces facteurs de détérioration de l'aliment identifiés, il faut déterminer les moyens nécessaires pour prolonger la durée de vie de l'aliment.

Les premières opérations liées à la conservation des aliments et qui se rencontrent dans presque toutes les usines alimentaires sont le chauffage et le refroidissement. Il est rare que dans une usine alimentaire, le produit ne soit pas chauffé ou refroidi à un moment ou à un autre. C'est pour cela qu'il est essentiel de bien comprendre ce qu'est le chauffage et le refroidissement. Ceci implique la bonne connaissance des transferts de chaleur et des équipements utilisés pour chauffer ou refroidir, tels que les échangeurs de chaleur. D'autre part, nous introduirons les notions de transferts de masse qui interviennent dans différentes opérations telles que le séchage, la filtration

# **Première partie**

## **Principes de conservation et notions préliminaires**

Dans l'industrie alimentaire, les transferts de chaleur occupent une large place, que ce soit au niveau général tel que l'isolation d'un entrepôt ou d'une chambre froide, qu'au niveau des procédés tels que les opérations de chauffage ou de refroidissement, de pasteurisation, de stérilisation, d'évaporation, de congélation, etc.

### 1. *Les transferts de chaleur*

La chaleur se déplace naturellement d'un milieu chaud à un milieu froid. Autrement dit, pour qu'il y ait un transfert de chaleur, il faut que l'on ait une différence de température.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, cela se traduit par la relation suivante :

$$Q_e = Q_s \pm M C_p \Delta T \quad (\text{Éq. 1})$$

$e$  et  $s$  signifiant entrée et sortie

et  $M$  = masse de l'aliment (en kg)

$C_p$  = chaleur massique de l'aliment (en J/kg.°C)

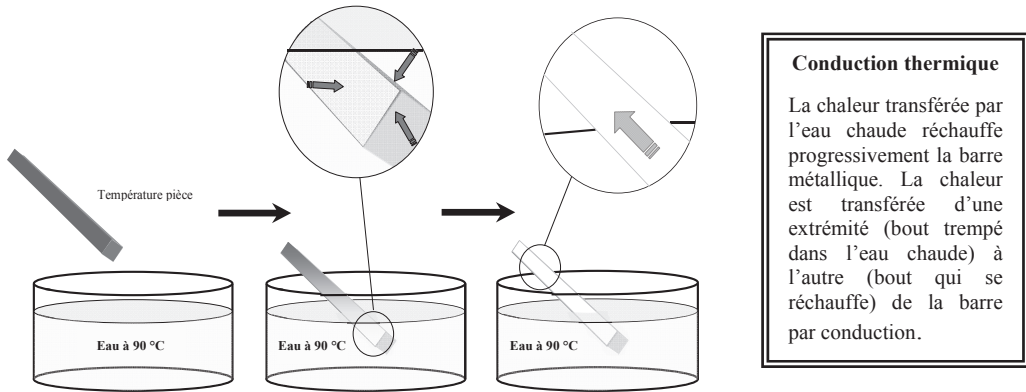
$\Delta T$  = variation de la température (en °C).

Cette relation peut se mettre sous la forme :

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_s \pm M C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{Éq. 2})$$

Le taux d'accumulation de chaleur correspond au terme  $M C_p \frac{\Delta T}{\Delta t}$ .

Lorsque ce terme est nul, nous sommes en régime stationnaire, c'est-à-dire que toute la chaleur qui rentre, sort. Les pertes de chaleur à travers les murs d'une usine, ou à



**Figure 1.** Principe de la conduction thermique. Exemple d'une barre métallique plongée dans l'eau à 90 °C, sans mouvement.

### 2.1.2 Taux de transfert de chaleur par conduction

Le taux de transfert de chaleur par conduction, s'exprime par la loi de Fourier :

$$\dot{Q} = -K A \frac{T_0 - T_1}{X_0 - X_1} \quad (\text{Éq. 3})$$

- où  $K$  = conductivité thermique (en  $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $A$  = surface ou aire considérée (en  $m^2$ )
- $T_0 - T_1$  = variation de température (en  $^\circ C$ )
- $X_0 - X_1$  = distance de transfert ou épaisseur (en m).

Le signe moins est dû au fait que la chaleur se déplace dans le sens de la face la plus chaude vers la plus froide. En effet, le gradient  $\frac{T_0 - T_1}{X_0 - X_1}$  est négatif, car la température baisse au fur et à mesure que la distance de transfert augmente (figure 2). Par conséquent, dans l'équation 3, un signe négatif est utilisé afin d'obtenir une valeur positive pour le taux de transfert de chaleur dans la direction d'une température décroissante (Singh et Heldman, 2008). La conductivité thermique  $K$  de différents matériaux est donnée dans le tableau 1.



- si  $T_{\text{int}} > T_{\text{ext}}$  :

$$\dot{Q} = -K \times 2 \pi r L \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (\text{Éq. 14 bis})$$

car  $\frac{\Delta T}{\Delta r} < 0$ , étant donné que  $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}} > 0$  et  $\Delta r = r_{\text{int}} - r_{\text{ext}} < 0$

où  $K$  = conductivité thermique (en W/m. °C)

$L$  = longueur du tuyau (en m)

$\Delta T$  = variation de température (en °C)

$\Delta r$  = distance de transfert ou épaisseur (en m)

$r$  = variable d'intégration du rayon.

Le transfert se faisant de l'intérieur vers l'extérieur, on obtient après intégration de l'équation 14 bis :

$$\dot{Q} = \frac{2 \pi L}{L \ln \frac{R_{\text{ext}}}{R_{\text{int}}}} K (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad (\text{Éq. 15 bis})$$

où  $T_{\text{ext}}$  = température à l'extérieur du tuyau (en °C)

$T_{\text{int}}$  = température à l'intérieur du tuyau (en °C)

$R_{\text{ext}}$  = rayon externe du tuyau (en m)

$R_{\text{int}}$  = rayon interne du tuyau (en m).

## EXEMPLE

Soit un tuyau en acier inoxydable de 1,5 cm d'épaisseur (conductivité thermique de 42 W/m.°C) avec un diamètre intérieur de 8 cm utilisé pour le transport de vapeur d'un bouilleur vers un échangeur à plaque situé à 30 m. La température de la surface intérieur est de 115 °C, et la température de la surface externe est de 85 °C. Calculer la perte de chaleur totale liée au transport de la vapeur.

### Solution

D'après l'Éq. 15 bis on a :

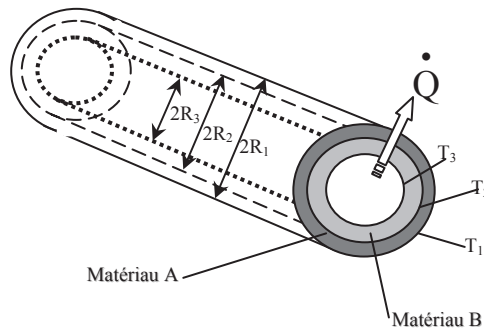
$$\dot{Q} = \frac{2 \times \pi \times 30[\text{m}]}{\text{Ln} \frac{0,055[\text{m}]}{0,04[\text{m}]}} \times 42[\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}] \times (115[^\circ\text{C}] - 85[^\circ\text{C}])$$

$$\text{soit } \dot{Q} = 745\,805,1 \text{ W.}$$

La perte de chaleur totale le long du tuyau de 30 m est de 745 805,1 W ou 745,8 kW.

### 3.4 Transfert par conduction à travers la paroi d'un tuyau multicouche

Comme dans le cas précédent des surfaces constantes multicouches (section 3.2), lorsqu'on évalue le transfert de chaleur à travers des couches successives d'un tuyau, le taux de transfert de chaleur à travers chaque couche successive est le même (figure 8).



**Figure 8.** Transfert de chaleur par conduction à travers un tuyau cylindrique multicouche (de l'intérieur vers l'extérieur car  $T_3 > T_1$ ).

Le taux de transfert de chaleur à travers un cylindre multicouche en utilisant la résistance thermique des deux couches s'écrit de la façon suivante :

$$\dot{Q} = \frac{(T_3 - T_1)}{\frac{\text{Ln} \frac{R_1}{R_2}}{2 \pi L K_A} + \frac{\text{Ln} \frac{R_2}{R_3}}{2 \pi L K_B}} \quad (\text{Éq. 16})$$

- pour une sphère :

$$\frac{f \alpha}{R^2} = \frac{2,30259}{3 N_{Bi}} \quad (\text{Éq. 105})$$

#### 4.1.4 Transfert de chaleur non stationnaire dans des solides ayant la forme d'un parallélépipède rectangle et d'un cylindre fini

Ce que nous avons vu jusqu'ici s'appliquait à la tranche infinie, au cylindre infini et à la sphère. Il est possible d'utiliser cette méthode pour calculer  $f$  et  $j$  dans le cas d'un parallélépipède rectangle et d'un cylindre fini.

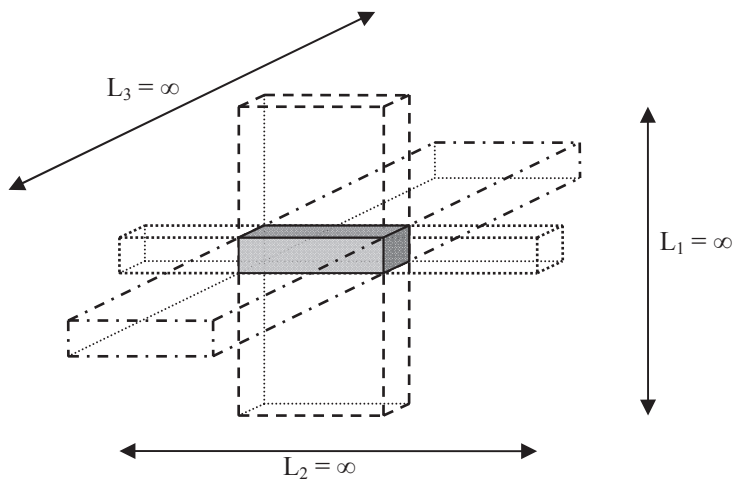
##### a) Cas du parallélépipède rectangle

Un parallélépipède rectangle peut être considéré comme l'intersection de trois tranches infinies (figure 16), on a ainsi :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} \quad (\text{Éq. 106})$$

avec

$$j = j_1 \times j_2 \times j_3 \quad (\text{Éq. 107})$$



**Figure 16.** Représentation de l'intersection des trois tranches infinies du parallélépipède rectangle.

# Seconde partie

## **Opérations unitaires et procédés de conservation**

# Le séchage ou la déshydratation des aliments

## Chapitre 15

Le séchage est l'un des procédés de conservation des aliments les plus anciens dont le principe consiste à abaisser l'activité de l'eau jusqu'à ce que les microorganismes ne puissent plus se développer, et en général jusqu'à ce que la plupart des réactions de dégradation (réaction chimique et enzymatique) soient ralenties. Le séchage ne tue donc pas les microorganismes qui contaminent les aliments mais arrête leur développement. Le séchage, en plus de préserver l'aliment, diminue le poids de l'aliment, ce qui est un avantage important pour le transport.

### *1. Transfert de chaleur et procédés de séchage*

#### **1.1 Transfert de chaleur**

La déshydratation ou le séchage des aliments consiste à chauffer le produit dans des conditions contrôlées afin d'évaporer la majorité de l'eau qu'il contient. Ceci implique deux phénomènes simultanés :

- le transfert de chaleur externe qui apporte l'énergie nécessaire au changement de phase de l'eau (liquide en vapeur) ;
- le transfert de chaleur interne de l'eau en vapeur dans l'aliment.

La vitesse de déshydratation, la qualité du produit déshydraté et le coût de séchage seront fonction de ces phénomènes qui sont influencés par la température de séchage, la vitesse de l'air autour du produit, l'humidité relative et la surface du produit en contact avec l'air.

#### **1.2 Procédés de séchage**

Le séchage des aliments peut se faire selon trois types de procédés :

avec

$$\dot{m} = S \rho \bar{v} = SG \quad (\text{Éq. 9})$$

où  $\dot{m}$  = débit massique de l'air sec (en kg/s)

$S$  = section à travers laquelle l'air est soufflé (en m<sup>2</sup>)

$\bar{v}$  = vitesse moyenne de l'air (en m/s)

$\rho$  = masse volumique de l'air (en kg/m<sup>3</sup>)

$h_c$  = coefficient de transfert de chaleur par convection (en W/m<sup>2</sup>.°C).

La quantité d'eau évaporée pendant la période de séchage à vitesse constante ( $E_c$ ) se calcule selon l'équation :

$$E_c = (\text{m.s.}) \times (M_1 - M_c) \quad (\text{Éq. 10})$$

où  $E_c$  = eau évaporée pendant la période de séchage à vitesse constante (en kg)

m.s. = matière sèche contenue dans l'aliment (en kg)

$M_1$  = kilogramme d'eau par kilogramme de matière sèche à l'entrée du sécheur

$M_c$  = kilogramme d'eau par kilogramme de matière sèche à la fin de la période de séchage à vitesse constante.

Le temps de séchage pendant la période de séchage à vitesse constante,  $t_c$ , s'obtient en divisant la quantité d'eau évaporée ( $E_c$ ) pendant cette période par la vitesse de séchage au taux d'évaporation  $\dot{E}$ , soit :

$$t_c = \frac{E_c}{\dot{E}} \quad (\text{Éq. 11})$$

## EXEMPLE

Dans un four à air chaud, 100 kg de légumes coupés en morceaux sont déshydratés de 80 % à 10 % d'eau. Au point critique, la teneur en eau, trouvée expérimentalement, est de 75 %. L'air est soufflé parallèlement à la surface du produit à une vitesse de 3 m/s, à une température de 90 °C et une teneur en eau  $n_a = 0,01$  kg d'eau /kg d'air sec (la masse volumique de l'air à 90 °C est  $\rho_{\text{air}} = 0,977$  kg/m<sup>3</sup>). La surface du produit en contact avec l'air est de 5 m<sup>2</sup>.



**Si le séchage a lieu des deux côtés, la surface en contact avec l'air est  $2A$ , alors que la surface considérée dans le volume est  $A$ .**

C'est pour ça que lorsque le séchage a lieu des deux côtés on prend  $L$  égal à la demi-épaisseur, alors que lorsque le séchage a lieu d'un côté on considère  $L$  égal à l'épaisseur.

## EXEMPLE

De la pâte de fruits fabriquée à partir de fruits, de pectine et de sucre est déshydratée dans un sécheur à plateaux. Le produit contient au départ 80 % d'eau ; à la fin de la période de séchage à vitesse constante il contient 75 % d'eau ; à la fin du séchage à vitesse décroissante il contient 25 % d'eau. Le produit est mis sous forme de feuille de  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  (roulés aux fruits) et on peut le considérer comme une tranche infinie. On a trouvé expérimentalement que le produit passait de 80 % à 75 % d'eau en 20 minutes, et qu'il se comportait dans la période de séchage à vitesse décroissante comme un produit contrôlé par l'écoulement capillaire. Calculer le temps de séchage pendant la période à vitesse décroissante et le coefficient de transfert de chaleur par convection si l'air est à  $T_a = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n_a = 0,01$  et la masse volumique du produit au départ est de  $\rho_0 = 1\,100 \text{ kg/m}^3$ .

## Solution

1- Calcul du temps de séchage pendant la période à vitesse décroissante.

- Calculer d'abord la teneur en eau initiale de l'aliment  $M_1$ , au point critique  $M_c$  et finale  $M_2$  :

$$M_1 = \frac{80}{20} = 4$$

soit  $M_1 = 4 \text{ kg d'eau/kg m.s.}$

$$M_c = \frac{75}{25} = 3$$

soit  $M_c = 3 \text{ kg d'eau/kg m.s.}$

$$M_2 = \frac{25}{75} = 0,333$$

soit  $M_2 = 0,333 \text{ kg d'eau/kg m.s.}$

# Débactérisation, concentration et purification par procédés baromembranaires

## Chapitre 16

### *1. Introduction*

Au cours des 20 dernières années, des progrès significatifs et continus dans le domaine des procédés baromembranaires ont permis d'accroître le nombre des applications dans l'industrie agroalimentaire et des nutraceutiques. Les principaux avantages motivant l'utilisation des procédés baromembranaires en industrie agroalimentaire sont 1) la possibilité de séparer des molécules selon leurs tailles et cela en adéquation avec les différents produits alimentaires et de façon peu coûteuse, 2) la minimisation des dommages liés aux traitements thermiques, 3) la possibilité de recycler et de diminuer les sous-produits et 4) leur consommation énergétique modérée (Cuperus, 1998). L'application des procédés baromembranaires dans l'industrie agroalimentaire correspond à plusieurs opérations unitaires soit, la concentration, le dessalement, la clarification, la stabilisation microbiologique et le fractionnement. Cependant dans le cadre de ce chapitre sur les applications des procédés baromembranaires à la conservation des aliments, nous nous intéresserons principalement aux opérations de concentration, clarification et de stabilisation microbiologique et aux principaux produits alimentaires sur lesquels ces opérations unitaires peuvent être employées ou sont employées.

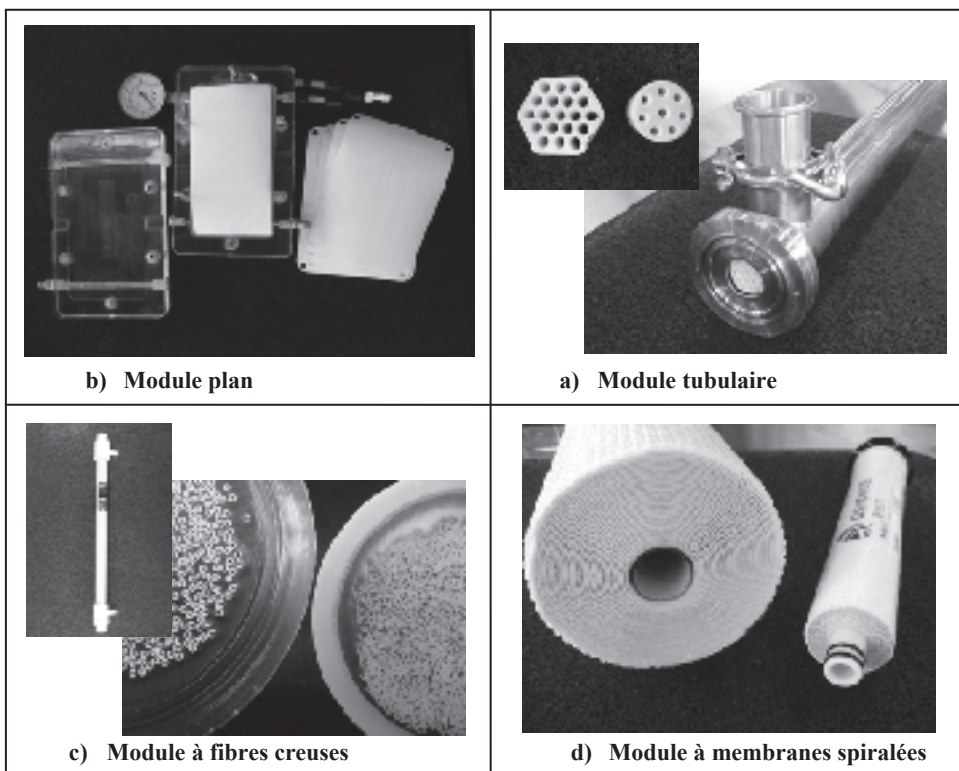
Dans un premier temps, nous définirons les types de procédés baromembranaires et les membranes associées, avant de présenter les différentes applications de ces procédés à la conservation des aliments. Nous présenterons ensuite les phénomènes de transport et les éléments de théorie qui s'appliquent à la séparation baromembranaire, ainsi que les principaux paramètres opératoires. Nous terminerons en présentant les limites de ces procédés dont, entre autres, le colmatage ainsi que les méthodes de nettoyage de ces colmatages.



### 2.2.2 Configurations membranaires

Les membranes sont disponibles commercialement sous 4 configurations différentes, soit les modules plans, les éléments tubulaires, les fibres creuses et les spirales. Des exemples commerciaux de ces configurations sont illustrés à la figure 5.

- *Module plan* : le feuillet de membrane est déposé sur une plaque empilée entre deux plaques de support pour la collecte du perméat. L'empilement de motifs « espaceur-membrane-espaceur » peut être répété plusieurs fois dans une cartouche filtrante.
- *Module tubulaire* : la membrane est déposée (ou laminée) sur un support tubulaire (diamètre interne de 12-25 mm) inerte (PVC, acier inoxydable) non filtrant. Le module peut contenir jusqu'à 24 éléments tubulaires.
- *Module à fibres creuses* : les membranes asymétriques sont extrudées sous forme de fibres (diamètre interne 0,2-1,2 mm). Une cartouche peut contenir entre 50 et 300 fibres.
- *Module à membrane spiralée* : deux feuillets membranaires séparés par un promoteur de turbulence, enroulés et collés sur un tube perforé, le tout retenu par un grillage ou boîtier en PVC ou en acier inoxydable.



**Figure 5.** Configurations membranaires disponibles commercialement.

$$V_d = \frac{V_p}{V_0} \quad (\text{Éq. 3})$$

où  $V_d$  = nombre de diavolumes (nombre sans dimension)

$V_p$  = volume de perméat recueilli pendant la diafiltration (en L ou m<sup>3</sup>)

$V_0$  = volume initial de concentré avant diafiltration (en L ou m<sup>3</sup>).

Le nombre de diavolumes détermine l'efficacité de la diafiltration en termes d'augmentation du degré de pureté des espèces à concentrer.

## EXEMPLE

Le concentré de lait (6 L) obtenu dans l'exemple précédent subit une diafiltration par ajout de 18 L d'eau, suivi d'une re-concentration jusqu'à 6 L. Calculer le nombre de diavolumes utilisés.

### Solution

Une quantité de rétentat de 18 L a été collectée en cours de re-concentration, donc selon l'équation précédente :

$$V_d = \frac{V_p}{V_0} = \frac{18\text{L}}{6\text{L}} = 3 \quad \text{soit 3 diavolumes.}$$

3 diavolumes ont donc été utilisés pour effectuer la diafiltration.

## 3. Applications à la conservation des aliments

Le nombre d'applications des procédés baromembranaires est en croissance constante comme peuvent en témoigner les nombreuses applications actuelles et en développement, dans les secteurs de l'agroalimentaire et des nutraceutiques, présentées ci-après.

### 3.1 Lait et lactosérum

L'application des procédés baromembranaires dans l'industrie laitière en conservation des produits laitiers concerne principalement l'utilisation de la microfiltration pour l'élimination des microorganismes du lait. L'utilisation de la MF permet la production de laits débactérisés de longue conservation et d'épurer le lait de

Comparer les membranes A et B en fonction de 1) la surface de membrane requise pour générer 10 000L/h de lait microfiltré, 2) la charge bactérienne du lait microfiltré et 3) en sachant que le rétentat final n'est pas valorisé, les pertes en protéines, en lactose et en cendres. Quelle membrane serait la mieux adaptée pour le procédé recherché ?

### **Solution**

**Voir la solution sur le site internet du livre.**

## **5. Transport membranaire**

À la base, la filtration est une technique de séparation utilisant un matériau qui permet de séparer des constituants non seulement de phases distinctes (solide-liquide) mais aussi au sein de la même phase (liquide-liquide, gaz-gaz). Dans le cas d'une même phase, on parlera de membrane de filtration qui présenteront des caractéristiques physiques (ex. : pores) et/ou chimiques (ex. : charge, hydrophobicité) permettant une séparation sélective entre constituants.

Le transfert de la matière à travers un module membranaire ne peut avoir lieu que s'il existe des différences physico-chimiques entre les deux phases situées de part et d'autre de la membrane. Cette hétérogénéité constitue la force motrice de transfert. Dans le cas des procédés baromembranaires, cette dernière peut se manifester sous la forme d'un gradient de pression et de potentiel chimique. En plus de ce déséquilibre entre phases, le transfert de matière s'accompagne d'interactions physico-chimiques plus ou moins fortes avec le matériau membranaire.

Dans ce qui suit, nous nous limiterons aux transferts liés aux gradients de pression et de concentration, plus généralement désignés par le gradient de potentiel chimique. Dans un premier temps, nous serons amenés à rappeler les notions du potentiel chimique et des phénomènes osmotiques. Nous aborderons ensuite les mécanismes de rétention et enfin une synthèse d'outils théoriques permettant la description du transport par le biais de modèles de transfert membranaire.

### **5.1 Rappels et définitions**

#### **5.1.1 Potentiel chimique**

Le potentiel chimique représente la somme d'énergies molaires (chimique, de pression, thermique...) acquises sous l'effet des interactions entre l'espèce qui se