



Membre du Réseau Eiffel



*Office  
International  
de l'E a u*

## **L'EAU ULTRAPURE OBTENTION ET APPLICATIONS**

**COMBESCURE Mathieu  
FAGES An  
NIEZBORALA Cécile  
VAUR Mathieu**

Février 2002

**OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU**  
**Service National d'Information et de Documentation sur l'Eau**  
**(SNIDE)**  
15 RUE Edouard Chamberland  
87065 LIMOGES CEDEX  
Tél.: 05 55 11 47 47 Fax: 05 55 11 47 48  
E-mail: [snide@oieau.fr](mailto:snide@oieau.fr) Web: <http://www.oieau.org>

*Ce document n'engage que la responsabilité de leurs auteurs*

## RESUME

Il existe différentes techniques pour obtenir de l'eau ultrapure. Les procédés membranaires sont les plus répandus, particulièrement l'osmose inverse. L'eau ultrapure est utilisée dans des domaines variés, dont la micro-électronique et le milieu médical et pharmaceutique.

## ABSTRACT

There are various techniques to get ultrapure water. The membrane processes are most widespread, particularly reversible osmosis. Ultrapure water is used in varied fields, of which micro-electronics and medical environment and pharmaceutical.

## MOTS-CLE

Eau ultrapure, osmose inverse, industrie micro-électronique, hémodialyse.

## SOMMAIRE

Présentation des différentes méthodes d'obtention d'eau ultrapure	
o Nanofiltration.....	p3
o Ultrafiltration.....	p3
o Distillation.....	p4
o Echanges ioniques.....	p4
o Electrodéionisation.....	p4
o Adsorption sur charbon actif.....	p4
Mécanismes généraux des traitements par osmose inverse.....	p5
Choix des membranes	
o Qualités nécessaires.....	p8
o Matériaux utilisés.....	p8
Les paramètres qui influent sur la performance	
o Facteurs physiques.....	p8
o Facteurs chimiques.....	p9
Rôle épurateur des membranes.....	p9
Présentation d'une unité d'osmose inverse	
o Le montage en parallèle.....	p10
o Le montage en série.....	p10
Utilisation de l'eau ultrapure dans le domaine de la santé : l'hémodialyse	
o Principe de l'hémodialyse.....	p11
o La préparation de l'eau pour une hémodialyse.....	p12
o Les étapes.....	p12
o Le point sur la consommation d'eau.....	p13
o Conclusion.....	p13
Les applications de l'eau ultrapure dans l'industrie	
o L'industrie micro-électronique.....	p14
o D'autres applications de l'eau ultrapure.....	p16
Conclusion.....	p17
Bibliographie.....	p17

L'eau ultra pure est l'eau qui approche au mieux les niveaux théoriques de la pureté en terme de résistivité, concentrations en matière organique, particules, et bactéries. Ce niveau de pureté peut être obtenu par différentes techniques qui peuvent parfois être combinées. Certaines de ces techniques sont l'échange ionique, l'osmose inverse, la distillation et différents types de filtration. De nos jours l'eau ultra pure est utilisée dans de nombreux domaines qui vont de la médecine à la biologie en passant par l'électronique.

## **PRESENTATION DES DIFFERENTES METHODES D'OBTENTION D'EAU ULTRA PURE**

### **○ NANOFILTRATION**

Il s'agit d'une variante des membranes d'osmose inverse. Elle se caractérise par :

- Un taux de passage de sels monovalents de 30 à 60% supérieur à celui des membranes d'osmose.
- Un taux de passage des sels bivalents de 5 à 15 % supérieur.
- Un taux de passage des solutés organiques équivalent.

Le passage de sels monovalents étant plus important, la pression osmotique est moindre. La pression de fonctionnement est donc moins importante, ce qui implique un coût énergétique plus faible pour obtenir malgré tout :

- un dessalement partiel associé à un bon adoucissement d'une eau de faible salinité.
- une bonne élimination des polluants organiques (bactéries, colloïdes, pyrogènes, virus).

Ce procédé est surtout utilisé en potabilisation ou dans les chaînes de traitement des eaux résiduaires. Il est à ce jour peu utilisé pour la production d'eau ultra-pure ou pour la production d'eau pour l'hémodialyse.

### **○ ULTRAFILTRATION**

Les membranes d'ultrafiltration, de structure plus lâche (asymétrique ou composite), ne permettent plus de rejeter que les solutés les plus grossiers (macro-molécules) et à fortiori tous éléments particuliers tels que bactéries, virus et pyrogène (en partie).

Elles sont communément caractérisées par leur 'point de coupure' : taille de la protéine de plus faible masse molaire rejetée par la membrane. On trouve ainsi des membranes industrielles à point de coupure allant de  $2 \cdot 10^3$  à  $10^5$  daltons (0,006 à 0,06 m).

Généralement, en traitement d'eau ultra-pure, les membranes utilisées sont en poly sulfone, double paroi, à point de coupure de 6000 daltons (0,02 m ).

- La double paroi assure une bonne résistance mécanique. Pression différentielle maximale de 3 bars.
- La membrane peut être sous forme tubulaire ou spiralée comme les membranes d'osmose.
- Le matériau poly sulfone autorise une température d'utilisation de 80 à 121 °C.
- Le faible point de coupure permet l'élimination totale des endotoxines (< 0,125 UI/ml).

On trouve ce procédé dans la production d'eau pour l'hémodialyse en association avec l'osmose inverse. Il s'agit de système double étage avec un étage d'ultra filtration (UF) suivi par un étage d'osmose inverse (Reversible Osmosis RO).

#### ○ **DISTILLATION**

La distillation est un long processus établi pour la purification d'eau dans laquelle l'eau est chauffée jusqu'à ce qu'elle s'évapore et que la vapeur condensée soit recueillie. Le matériel est relativement peu coûteux, mais il demande beaucoup d'énergie. En effet il faut 1KW d'électricité par litre d'eau produite. Selon la conception du distillateur, l'eau distillée peut avoir une résistivité d'environ 1 MW-cm et elle sera stérile.

#### ○ **L'ECHANGE IONIQUE**

L'échange ionique est largement répandu dans les laboratoires pour fournir de l'eau épurée sur demande. Les déionisateurs de laboratoire incorporent invariablement des cartouches à lit mixte composées de résines d'échange ionique, qui retournent à une station de régénération pour se recharger lorsque elles sont épuisées.

Quels sont les avantages de l'échange ionique? Celui-ci en a beaucoup par rapport à la distillation pour la production de l'eau épurée. En effet quand on utilise des matériaux en résine de grande pureté, tout le matériel ionique est enlevé de l'eau pour donner une résistivité maximum de 18,2 MW-cm (à 25°C).

L'échange ionique doit être utilisé en même temps que des filtres si l'eau est chargée en particules libres. La mise en place de l'osmose inverse suivie de l'échange ionique est un traitement efficace.

#### ○ **L'ELECTRODEIONISATION**

L'électrodéionisation est un processus de purification qui est piloté électriquement et qui comporte une combinaison de résines d'échange ionique et de membranes sélectives d'ions. L'électrodéionisation, est normalement couplée à l'osmose inverse, cela fournit une alternative utile aux méthodes de purification.

Comment l'électrodéionisation fonctionne-t-elle?

Le principe est le suivant : les membranes définissent des compartiments verticaux, limités alternativement par une membrane sélective aux anions et une membrane sélective aux cations. Sous l'effet d'un champ électrique, les ions présents dans l'eau migrent au travers des membranes. La progression des cations vers la cathode est arrêtée par la rencontre avec une membrane perméable aux anions. La progression des anions vers l'anode est, elle, arrêtée par une membrane perméable aux cations.

La partie centrale est donc efficacement déionisée puisque les ions ont migré et se sont concentrés dans les parties adjacentes.

#### ○ **L'ADSORPTION SUR CHARBON ACTIF**

L'adsorption est un phénomène physique par lequel un solide fixe les molécules d'un corps sur sa surface sous l'action des forces de Van der Waals.

Le charbon actif, se présentant sous forme de grains, de tissus ou de feutre, est un carbone micro poreux obtenu à partir par exemple de tourbe, bois, lignite, charbon bitumineux ou noix de coco. Au cours de l'activation, se forment des micro pores qui confèrent au charbon actif sa grande surface spécifique. Celle-ci est responsable des grandes forces d'attraction qui s'exercent sur les molécules des liquides et des gaz ambiants. La puissance de ces forces est en partie déterminée par la nature des molécules présentes dans le milieu environnant. Un certain nombre de molécules sont puissamment

attirées par le charbon actif, les autres à un moindre degré. Il a fait l'objet de nombreuses études, et outre ses propriétés de désodorisation et de décoloration, il permet d'éliminer de nombreux polluants tels que les composés organiques volatils, les composés aromatiques, les pesticides, les métaux,...

## MECANISMES GENERAUX DES TRAITEMENTS PAR OSMOSE INVERSE

Afin de comprendre ce qu'est l'osmose inverse, il est nécessaire de définir l'osmose. Cela peut se résumer de la manière suivante : C'est un mouvement de solvant qui se produit entre deux solutions d'inégales concentrations à travers une membrane hémiperméable qui ne laisse passer que le solvant et pas les solutés.

Le phénomène d'osmose fut découvert par Dutrochet (1826) qui constata, dans un récipient à deux enceintes remplies d'eau sucrée et d'eau pure, et séparées par une membrane en vessie de porc, que les échanges se produisaient comme si les molécules de sucres attiraient l'eau extérieure. Le niveau d'eau s'élevait alors dans une des deux enceintes jusqu'à ce que la pression engendrée vienne s'opposer à ce flux d'eau. Ainsi l'équilibre était atteint et la valeur de cette pression fut appelée pression osmotique de la solution chargée.

On peut relier cette pression à la concentration des espèces en solution :

$$\Pi = \sum_i C_i R.T$$

avec :

$\Pi$  : Pression osmotique en Pa

$\sum C_i$  : Somme des concentrations de chaque ion en mol/l =  $\frac{\text{conc}^\circ \text{ massique}}{\text{masse molaire}}$

R : Constante des gaz parfaits R= 8.314 J/mol.K

T : Température en K

On constate déjà que plus la molécule est petite (donc masse molaire faible) plus la pression osmotique sera grande.

L'osmose inverse est née de la constatation de la réversibilité de ce phénomène d'osmose.

Si une pression supérieure à la pression osmotique est appliquée au-dessus de la solution concentrée, on observe un échange d'eau pure dans le sens inverse du précédent.

Explication du phénomène :

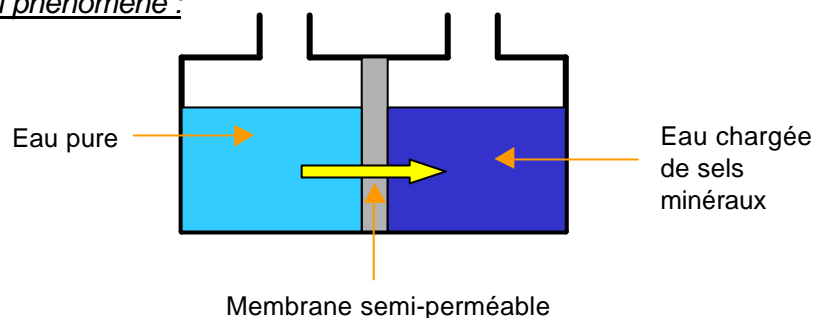
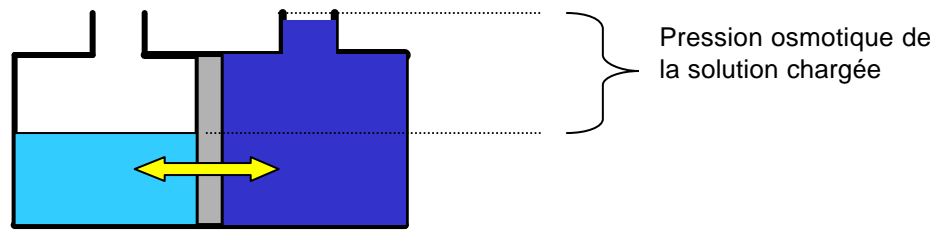
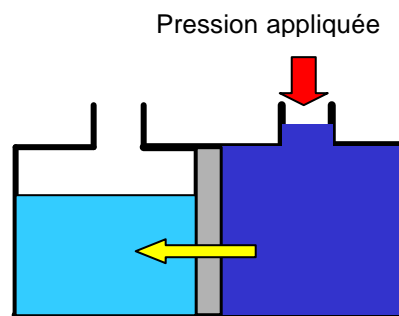


Fig.1 Osmose directe



*Fig.2 Equilibre osmotique*



*Fig.3 Osmose inverse*

Il y a plusieurs théories qui peuvent expliquer ce transport. Cependant, parmi celles-ci, la théorie de la solution-diffusion est la plus utilisée. Elle repose sur la double utilisation des lois de Fick et d'Henry :

Le **flux d'eau** à travers la membrane s'exprime de la façon suivante :

$$Q_e = K_p \cdot \frac{S}{e} \cdot (\Delta p - \Delta \Pi) \cdot K_t \cdot K_c \quad (\text{formule 1})$$

- avec
- $Q_e$  : Débit d'eau qui traverse la membrane
  - $K_p$  : Coefficient de perméabilité de la membrane
  - $S$  : surface de la membrane
  - $e$  : épaisseur de la membrane
  - $\Delta p$  : différence de pression entre chaque côté de la membrane
  - $\Delta \Pi$  : différence de pression osmotique entre chaque côté de la membrane
  - $K_t$  : Coefficient de température
  - $K_c$  : Coefficient de compaction

Remarques :  $K_t$  est un coefficient correctif qui tient compte de la viscosité de l'eau. C'est pour cela qu'il est fonction de la température : si  $T$  augmente, la viscosité de l'eau diminue, le débit échangé est alors plus important.

Kc tient compte de la diminution de la perméabilité de la membrane au cours de son utilisation.

Par ailleurs, il existe une formule analogue pour le **flux de sels** :

$$Q_s = K_s \cdot \frac{S}{e} \cdot \Delta C \cdot K_t \cdot K_c \quad (\text{formule 2})$$

avec  $\Delta C$  la variation de concentration en ions de part et d'autre de la membrane.

Remarque : On constate une différence essentielle avec le flux d'eau, c'est le fait que le débit de sel soit indépendant du gradient de pression, donc de la pression appliquée. Par contre, il est proportionnel au gradient de concentration.

Il est alors possible de calculer la concentration en sel dans le filtrat avec les deux expressions précédentes :

$$C_s = \frac{Q_s}{Q_e} = \frac{K_s}{K_p} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta p - \Delta \Pi} \quad (\text{formule 3})$$

Trois constatations intéressantes apparaissent alors :

- La concentration en sel dans le filtrat est indépendante de l'épaisseur de la membrane
- Elle est proportionnelle au gradient de concentration donc, plus une eau est saline, plus le filtrat le sera.
- Elle est inversement proportionnelle au gradient de pression effective, donc, plus on pourra augmenter cette pression, moins les sels passeront et plus le débit d'eau sera grand.

Remarque : Ces observations restent très générales et résultent d'une étude simplifiée des mécanismes de diffusion à travers les membranes. Des phénomènes qu'il faudra prendre en compte viennent compliquer ce fonctionnement ; c'est le cas de la **polarisation de la membrane**.

A proximité immédiate de la membrane, du fait du passage de l'eau, il se crée, du côté de la solution saline, une accumulation de sels dissous, donc un gradient de concentration sur la couche limite.

Cela provoque :

- une augmentation de la concentration au niveau de la membrane, donc une augmentation de la pression osmotique, ce qui diminue la pression effective et par conséquent le débit d'eau pure produite. ( cf. formule 1)

Il faut donc augmenter la pression de travail pour conserver le même flux d'eau.

- une moins bonne rétention des sels car le gradient de concentration augmente. (cf. formule 2)

## LE CHOIX DES MEMBRANES

### ○ QUALITES NECESSAIRES

Les lois théoriques qui gèrent le phénomène d'osmose inverse permettent déjà, a priori d'appréhender un certain nombre de qualités que devront posséder les membranes utilisées dans les procédés industriels de fabrication d'eau ultra-pure.

Auparavant, il faut savoir que ces membranes sont souvent chères et qu'elles ne seront donc pas utilisées en tête de traitement. Des filtrations préliminaires moins fines seront nécessaires afin d'éviter tout colmatage.

La membrane devra :

+ avoir un haut pouvoir de rétention des sels tout en permettant un flux d'eau le plus grand possible avec une pression d'utilisation la plus faible possible.

+ être compatible chimiquement avec les sels dissous présents dans les eaux à traiter.

+ posséder une bonne résistance à la compaction.

### ○ MATERIAUX UTILISES

L'ensemble des qualités qui sont demandées aux membranes nécessite l'utilisation de matériaux adaptés, afin de résister aux contraintes qu'impose l'utilisation industrielle de l'osmose inverse.

Les membranes utilisées sont formées de deux couches et sont donc dites **asymétriques**.

La face en contact avec l'eau à traiter est fine et dense. C'est la **couche active** qui constitue une véritable barrière aux sels dissous.

La deuxième couche est la **couche support** qui est beaucoup plus épaisse et assure la résistance de la membrane.

Les matériaux utilisés pour leur conception sont actuellement les suivants :

+ l'acétate de cellulose

Ces membranes acceptent des pH allant de 4 à 7. Elles peuvent être dégradées biologiquement et résistent à une eau chlorée.

+ les polyamides aromatiques

Elles autorisent des pH allant de 4 à 11. Le contact avec les oxydants forts doit être évité.

+ les composites

Ce nom vient du fait que les deux couches constitutives de la membrane sont faites de matériaux différents. Ces membranes plus récentes sont caractérisées par une couche active très fine. (0.04 à 0.1  $\mu\text{m}$ ) Elles permettent ainsi le passage d'un flux plus important que les membranes précédentes et autorisent une large gamme de pH (de 2 à 11)

## LES PARAMETRES QUI INFLUENT SUR LA PERFORMANCE

### ○ FACTEURS PHYSIQUES

#### • La température

Nous avons déjà vu que le débit s'accroît avec la température.

Dans la pratique, la température maximale acceptable est entre 40 et 50°C.



- **Les matières en suspension dans l'eau à traiter**

Les membranes perdent toute leur efficacité si le dépôt est trop important et empêche le passage de l'eau. Il faudra donc éliminer ces particules, dans le cas d'une eau très chargée, par l'utilisation de pré-traitements (floculation, filtration...)

- **FACTEURS CHIMIQUES**

- **Le pH**

Il peut provoquer des hydrolyses dans ses valeurs extrêmes. On maintient donc un pH entre 4 et 7, voire de 2 à 11 avec les membranes composites.

- **La précipitation**

Certains sels peu solubles tels les sulfates de calcium ou de baryum peuvent précipiter et boucher les pores de la membrane. Là encore, des pré-traitements tels la décarbonatation, le désiliciage ou la déferrisation peuvent être mis en œuvre avant le traitement par osmose inverse.

## **ROLE EPURATEUR DES MEMBRANES**

Il est tout d'abord évident de constater l'épuration physique de l'osmose inverse. Ce procédé permet de retenir des particules d'une taille minimale de **0.005 mm** alors que les moyens de filtration classiques utilisés actuellement ne retiennent que les particules de taille supérieure à 0.02 µm.

Par ailleurs, d'un point de vue chimique, l'osmose inverse permet d'obtenir un perméat possédant une salinité jusqu'à 100 fois plus faible que l'eau de départ. Cette qualité sera essentielle pour l'utilisation industrielle de l'osmose inverse, notamment pour la production d'eau ultra pure dans le domaine de la microélectronique.

Enfin, de nombreux composés organiques peuvent être retenus. (Hydrates de carbone, glycols, acides organiques, alcools...) Dans tous les cas, l'efficacité de rétention sera proportionnelle à la masse molaire et fonction du pH.

## **PRESENTATION D'UNE UNITE D'OSMOSE INVERSE**

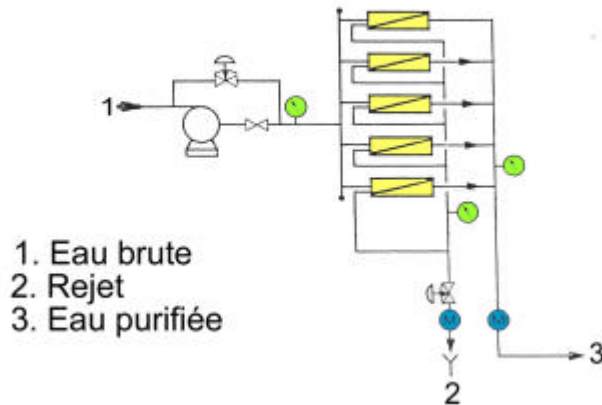
Le principe d'une unité de traitement est la juxtaposition de différents postes élémentaires, selon un ordre choisi suivant les contraintes et la qualité voulue.

Il existe deux montages principaux :

- Le montage en parallèle
- Le montage série-rejet

## ○ LE MONTAGE EN PARALLELE

Ce montage est le plus simple. Tous les postes élémentaires opèrent dans les mêmes conditions (même pression, même eau en entrée)

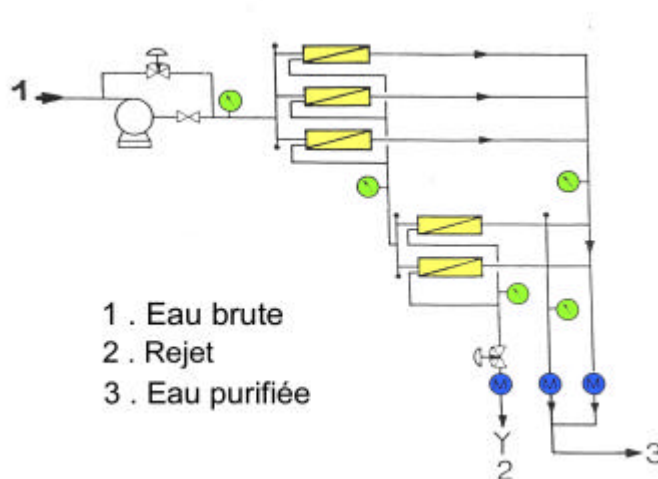


*fig.4 Montage en parallèle (Par L.Daniel Société DEGREMONT)*

Le taux de conversion est suivi grâce aux deux manomètres branchés sur le rejet et sur la sortie d'eau traitée.

## ○ LE MONTAGE EN SERIE

Ce modèle est utilisé pour augmenter le taux de conversion pour la production d'une eau de plus haute qualité.



*Fig.5 Montage en série (Par L.Daniel Société DEGREMONT)*

Ce poste se compose de deux étages de modules élémentaires. La caractéristique est l'alimentation du deuxième étage par les rejets du premier étage. Ce processus a pour effet d'augmenter le taux de conversion qui peut atteindre 70 à 90% pour des séries de 2 ou 3 étages. [1]

## UTILISATION DE L'EAU ULTRAPURE DANS LE DOMAINE DE LA SANTE : L'HEMODIALYSE

Dans le cas d'insuffisances rénales l'**hémodialyse** consiste à **épurer le sang** des déchets accumulés et à assurer le maintien de l'équilibre hydro-électrolytique de l'organisme [2].

Elle se pratique deux à trois fois par semaine à raison de 4 à 8 heures par séance grâce à un circuit sanguin extra-corporel qui nécessite la création chirurgicale d'un abord vasculaire (rein artificiel).

### o PRINCIPE DE L'HEMODIALYSE

Le sang est mis en contact, au travers d'une membrane semi-perméable artificielle (en sulfate de poly carbonate par exemple) ou naturelle (en cellulose), avec un soluté aqueux de composition électrolytique voisine du liquide extra-cellulaire normal : le **dialysat** (voir composition du dialysat dans le tableau à la fin du paragraphe).

La membrane semi-perméable (dialyseur) sépare deux compartiments ; le sang traverse un compartiment et le dialysat l'autre compartiment, la direction des deux flux étant opposée pour permettre lors de l'échange un gradient de concentration maximum. Les solutés de bas poids moléculaires (toxines urémiques) qui s'accumulent dans le sang urémique sont absents du dialysat. Ainsi lorsque le sang d'un urémique est exposé au dialysat au travers de la membrane de dialyse, le transfert des solutés du sang vers le dialysat est très rapide. Le fait que le dialysat soit sans cesse renouvelé au cours de la séance, permet un transfert maximum des solutés : il y a alors nettoyage du sang urémique.[3]

Composants	Concentration (en méq/l)
Na <sup>+</sup>	135 - 145
K <sup>+</sup>	0 - 4.0
Ca <sup>2+</sup>	3.0 - 3.5
Mg <sup>2+</sup>	0.5 - 1.0
Cl <sup>-</sup>	100 - 124
Bicarbonate	30 - 38
Pco <sub>2</sub> /mmHg	40 - 100
pH	7.1 - 7.3
(Glucose)	(11)

Composition du dialysat pour hémodialyse [3]

Le transfert des solutés et de l'eau au travers du dialyseur fait intervenir deux mécanismes fondamentaux : la diffusion (ou conduction) et la convection (ou ultrafiltration).

Les deux types de dialyseurs actuellement utilisés sont les dialyseurs en plaques et les dialyseurs en fibres creuses, les dialyseurs en bobines étant pratiquement abandonnés [2].

L'eau du robinet pourtant déjà traitée et propre à la boisson n'est pas assez pure pour servir directement à la dilution du concentré permettant la réalisation du dialysat. Toute trace de métaux par exemple ou d'aluminium présenterait un risque grave pour le malade. Une station d'épuration d'eau, destinée spécialement au service d'hémodialyse produit une **eau « ultrapure »**, et ceci afin de réaliser le dialysat pour les générateurs. Pour purifier cette eau on utilise du chlore et toute une chaîne de filtres.

## ○ LA PREPARATION DE L'EAU POUR UNE HEMODIALYSE

L'eau pour l'hémodialyse est un **médicament** qui présente deux caractéristiques :

- Il est utilisé de façon massive
- Il est préparé extemporanément

Elle doit répondre à plusieurs impératifs :

- Maintien de la constante physico-chimique de la solution diluée
- Absence de toxicité pour le patient
- Bonnes qualités bactériologiques et pyrogéniques

A l'entrée de la chaîne, on a de l'eau brute c'est-à-dire de l'eau de ville. Sa dureté est de 15 environ, sa température de 18°C et elle contient des germes (microbes, bactéries), du  $\text{Ca}^{2+}$ , des électrolytes, des colloïdes, des chloramines et des métaux lourds.

**La chaîne sert à filtrer, adoucir et osmoser cette eau et à la rendre pure** c'est-à-dire sans le moindre germe.

Elle est constituée d'une série de filtres dont le diamètre des pores diminue de plus en plus, d'une pompe doseuse de chlore pour désinfecter l'eau du réseau, de deux adoucisseurs permettant d'éliminer le calcium et le magnésium de l'eau et de deux osmoseurs en série.

Elle peut également être complétée par une étape de polissage avec des résines échangeuses d'ions et une étape d'ultrafiltration.

## ○ LES ETAPES [4]

### La filtration

Le principal rôle des filtres est la rétention de différentes particules ou substances présentes dans l'eau. Suivant le diamètre des pores des filtres, ils laissent passer certaines particules dont le diamètre est inférieur à celui des pores (20, 10 et 5  $\mu\text{m}$ ).

Ces types de filtre servent surtout de protection physique de l'installation et sont placés en début de chaîne. Ils peuvent aussi protéger contre des relargages des filtres à charbon (qui assurent une élimination des composés chlorés -chloramines- incompatibles avec les osmoseurs ainsi que des métaux lourds par adsorption) ou retenir des microorganismes ou des endotoxines.

### La chloration

La pompe doseuse de chlore permet d'éliminer les problèmes bactériologiques. La chloration doit se situer entre 0.5 et 0.8 ppm.

### L'adoucissement

L'adoucissement complet de l'eau permet d'éliminer le calcium et le magnésium de l'eau de dialyse.

En général par paire, les adoucisseurs servent à protéger les membranes d'osmose. Ils utilisent du chlorure de sodium (sel) spécial, qui est d'une pureté écartant tout risque de contamination de l'eau. Par réaction chimique, des dépôts de calcium et de magnésium se développent sur les résines des adoucisseurs.

La filtration, la chloration et l'adoucissement sont 3 étapes constituant le prétraitement. Le traitement est réalisé grâce à l'**osmose inverse**, le polissage et l'ultrafiltration.

## Les osmoseurs

Les premiers filtres et les adoucisseurs constituent une protection physique des membranes d'osmose, qui sont très fragiles. Ils servent à augmenter l'efficacité et surtout la durée de vie des membranes.

Le procédé utilisé est l'osmose inverse déjà décrite auparavant.

## Le polissage

L'eau de ville est analysée. Si elle est très chargée en électrolytes ou autres solutés, elle peut nécessiter, après osmose, un traitement supplémentaire. Celui-ci est réalisé au moyen de résines échangeuses d'ions, qui captent ces derniers.

## L'ultrafiltration

L'eau ainsi passée sur un circuit de traitement peut subir des contaminations bactériennes : avant d'être délivrée, elle est filtrée une dernière fois à 0.2µm. Elle est alors dite ultrapure.

Elle est alors propulsée par des pompes hydrauliques dans un circuit de circulation en PVC ou, beaucoup plus onéreux, en inox. En fin de circuit, elle retourne soit sur le prétraitement soit sur l'osmoseur pour subir à nouveau un traitement. Un tank de stockage peut être inséré dans ce circuit. La propulsion permanente de l'eau dans ce qui constitue une boucle de circulation évite ainsi la stagnation et donc le risque de contamination.

L'eau ainsi fabriquée n'est pas injectable ; pour qu'elle le soit il faut ajouter une bidistillation. La qualité de l'eau pour dialyse est réglementée par la pharmacopée (bactéries : maximum de 100 germes par litre et endotoxines : maximum de 0.25 unités endotoxines par millilitre). Un contrôle bactériologique cyclique, mensuel ou plus fréquent, est habituellement fait sur les différents points de piquage (branchement des générateurs) de la boucle. L'eau délivrée, dite ultrapure, doit aussi faire l'objet de contrôles physico-chimiques. Il existe des normes établies par la pharmacopée.

### o LE POINT SUR LA CONSOMMATION D'EAU

Compte tenu de la forte dilution du concentré (1/35) en général (voir remarque), on assimilera le débit du dialysat à celui de l'eau à l'entrée du générateur de dialyse. Les calculs correspondent aux situations estimées les plus défavorables.

A raison d'un débit de 30 litres/heure (500ml/mn), de 4 heures de dialyse par séance, de 3 séances par semaine, de 52 semaines par an, la quantité d'eau mise en contact au travers d'une membrane semi-perméable avec le sang au cours d'une année est de 18 158 litres soit **18 tonnes** environ.

Remarque : le dialysat est préparé à partir de sels de qualité pharmaceutique dilués dans de l'eau ultrapure. Les concentrés de solutés se présentent sous forme de poudre ou de liquide concentré. Pour tenir compte de leur solubilité en solution aqueuse, les rapports de concentration sont habituellement de 1/35 pour les concentrés contenant un tampon acétate et de 1/20 pour ceux contenant un tampon bicarbonate.

### o CONCLUSION

L'intérêt de ce traitement est l'obtention d'une eau ultra-pure **chimiquement** et **bactériologiquement**. La qualité bactériologique est irréprochable : tous les tests effectués jusqu'à présent montrent un dénombrement bactérien quasi-nul.

La conductivité à la sortie du deuxième étage d'osmose est de l'ordre de  $0.5\mu\text{S}/\text{cm}$  alors qu'à l'entrée du premier étage elle est de  $230\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La production d'eau se fait en continu, avec peu de contraintes de maintenance (juste une surveillance continue et une désinfection hebdomadaire).

**Le coût d'exploitation est réduit par rapport à d'autres systèmes.**

Ainsi l'eau obtenue est d'une grande qualité et permet de réaliser de la dialyse dans les meilleures conditions possibles.

## LES APPLICATIONS DE L'EAU ULTRAPURE DANS L'INDUSTRIE

### o L'INDUSTRIE MICRO-ELECTRONIQUE

L'eau ultrapure n'est pas définie par des règles absolues, car ce sont les utilisateurs qui fixent leurs objectifs de qualité **en fonction de l'utilisation qui en est faite**. Dans le cas de l'industrie micro-électronique, l'eau est utilisée comme fluide de **rinçage** des produits en cours de fabrication (circuits intégrés et microprocesseurs). L'environnement doit remplir des **critères de qualité draconiens** et ce d'autant plus que la capacité de mémoire des circuits croît avec la technologie : l'eau doit être **ultrapure** chimiquement, physiquement et biologiquement.

#### Evaluation de la situation initiale

La mise en place d'une chaîne de production d'eau ultrapure demande une étude approfondie de la qualité de l'eau **brute**, ainsi que de la qualité de l'eau à atteindre, mais il est aussi nécessaire d'établir un **cahier des charges précis** comprenant les exigences d'exploitation de l'industriel.

Qualité de l'eau brute

+

Qualité à atteindre



**Choix du traitement à mettre en place**

+

Contraintes d'exploitation

Dans la plupart des cas, il s'agit de combiner différentes techniques afin d'obtenir la qualité finale souhaitée de l'eau de rinçage : cascade de **filtrations** et de traitements par des **résines**, précédée de **pré-traitements** divers et suivie d'une **désinfection finale**.

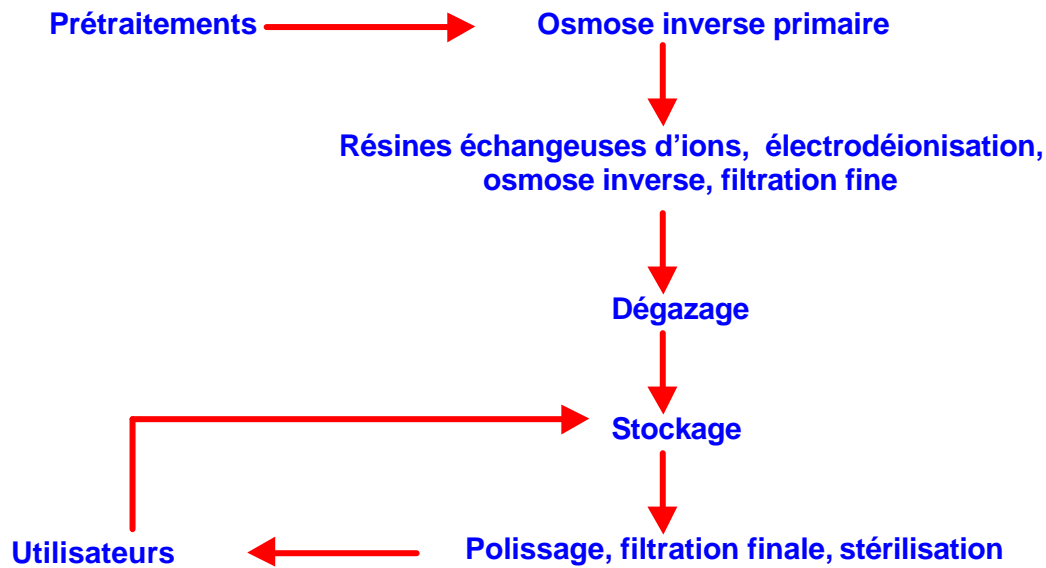
*Tableau des critères de qualité de l'eau de process en fonction de la capacité de mémoire des microprocesseurs.[5]*

CRITERES DE QUALITE		CAPACITE DE MEMOIRE (en bits)			
		16 K	64 K	256 K	1 méga
Résistivité (mégohm/cm à 25°C)		15	17	18	18
SiO <sub>2</sub> (ppb)		50	20	10	10
Carbone Organique Total (ppb)		1000	500	50	30
Particules	taille (en $\mu\text{m}$ )	1	0,5	0,2	0,2
	nombre/cm <sup>3</sup>	10	10	100	10
Bactéries / 100cm <sup>3</sup>		100	50	5	1
Oxygène dissous (ppm)		8	8	0,3	0,1

En 2002, la capacité de mémoire des microprocesseurs est de 1 gigabits : les critères de qualité sont donc encore plus sélectifs, mais ils sont limités par les techniques d'analyse.

## La chaîne de production d'eau ultrapure

Les techniques pouvant être utilisées étant variées, il est impossible de donner un modèle universel de chaîne de production appliquée à l'industrie micro-électronique. Cependant, on retrouve globalement les mêmes étapes :



Etape considérée	Techniques utilisées	Rôles
Prétraitements	Dégrillage	Première élimination des matières en suspension.
	Chloration	Oxydation d'une partie des matières organiques et limitation du taux de particules.
	Filtration sur sables ou sur cartouches	Protection des membranes à l'aval.
	Acidification	Diminution du pH pour éviter les précipités de carbonate de calcium (tartre) dans l'unité d'osmose.
	Dégazage	Élimination du CO <sub>2</sub> formé.
Osmose inverse primaire	Acétate de cellulose, polymères de synthèse, carbone et oxyde d'aluminium, enroulement en spirale, fibres creuses	Diminution très sensible des charges des résines échangeuses d'ions (élimination de 95% des produits ioniques). Protection des résines (rétention des particules et bactéries). Réduction de la fréquence de remplacement des microfiltres.
Résines échangeuses d'ions Osmose inverse Électrodéionisation	Lits séparés ou mélangés (possibilité de combiner les deux types de résines anionique et cationique)	Élimination de la totalité des sels dissous afin d'obtenir une résistivité élevée approchant la résistivité maximum théorique de l'eau (18,3 mégohm/cm à 25°C).
	voir le chapitre consacré à l'osmose inverse	

	Association de membranes et de résines sous l'application d'un potentiel électrique (principe de l'électrodialyse)	Elimination des cations et des anions grâce à l'alternance de membranes spécifiquement perméables (cf schéma). Régénération continue des résines.
Dégazage	Dégazeur sous vide	Elimination de l'O <sub>2</sub> dissous dans l'eau déminéralisée par l'osmose inverse.
Stockage	Matelas d'azote en partie supérieure	Eviter la dégradation de l'eau stockée car risque de développement bactérien et de chute de la résistivité (temps de séjour assez longs).
	trop-plein protégé par du formaldéhyde	
	stérilisation des eaux influentes	
	injection éventuelle d'un stérilisant à faible dose	
Polissage	Stérilisation par rayons UV en amont des résines	Protection des résines par destruction des bactéries et dégradation de certaines matières organiques.
	Etage de déminéralisation totale sur lits mélangés de résines échangeuses d'ions	Perfectionnement de l'élimination des sels dissous.
	filtration en série sur membranes (ultrafiltration, osmose inverse)	Filtres ultimes qui permettent d'abaisser les valeurs de COT (Carbone Organique Total), particules et bactéries au niveau des normes requises.

#### Les précautions particulières à prendre

La **rigueur** est le mot d'ordre de toute la chaîne de production : la circulation de l'eau doit être **permanente**, sans bras morts, et ce à une vitesse de l'ordre de 1,5 à 2,5 m/s. Le choix des matériaux en contact avec l'eau ultrapure doit être fait de façon à la **protéger de toute contamination** (étanches, et équipés de filtres à air, en plastique ou en matériaux inoxydables, vannes commandées à distance).

Afin de garantir la qualité de l'eau, des **contrôles permanents** doivent être réalisés aux postes de travail. Ils déterminent la fréquence de nettoyage des boucles et des cuves de stockage.

Enfin, comme l'industrie micro-électronique ne peut admettre aucune défaillance à cause du coût important des conséquences d'un défaut du système de production d'eau ultrapure, l'installation doit être **automatisée complètement**. Le système doit avoir été étudié pour gérer tous les défauts techniques ou qualitatifs repérés par l'ordinateur qui centralise toutes les données.

#### o D'AUTRES APPLICATIONS DE L'EAU ULTRAPURE [6]

Ce paragraphe n'a pas pour but d'établir une liste exhaustive de toutes les applications de l'eau ultrapure, ni de les développer dans le détail ; mais il montre la variété du champ d'application de ce produit, qui n'est pas qu'un simple fluide, et des techniques qui ont été développées pour l'obtenir.

- Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse ou par électrodialyse ;
- Industrie pharmaceutique : composition même des médicaments (solutions injectables) ;



- Laboratoires d'analyses : chromatographie liquide haute performance, chromatographie ionique, spectrométrie d'absorption atomique... ;
- Milieu médical : culture de tissus et fécondation *in vitro* ;
- Industrie métallurgique : dilution des huiles de tréfilage (augmente la durée de vie des liquides, diminue la pollution et permet de réaliser des économies).

## CONCLUSION

La production d'eau ultrapure nécessite, comme nous l'avons illustré dans les exemples, l'association de techniques différentes en fonction de la qualité intrinsèque de l'eau brute et selon l'utilisation de l'eau ainsi traitée. Par conséquent, il est difficile de chiffrer *a priori* le coût d'une chaîne de production d'eau ultrapure, étant donné les possibilités techniques variées qui sont à la disposition des usagers. L'important est de bien définir le cahier des charges pour mettre en place le traitement le plus approprié, en terme de qualité, de sécurité, et de coûts.

La recherche constante sur les procédés de fabrication de l'eau ultrapure conduira certainement à l'amélioration de cette qualité et de ces coûts (notamment les coûts énergétiques). Cependant, la quête d'une eau toujours plus pure restera dépendante de la capacité des techniques d'analyse.

Il serait certainement préférable de baisser les coûts en protégeant la qualité de l'eau brute en amont.

### Bibliographie :

- [1] L. DANIEL (Société DEGREMONT), Application de l'osmose inverse à la production d'eau ultrapure, CNRS – Meudon, 1986.
- [2] N.K.MAN, J.ZINGRAFF, P. JUNGERS, L' hémodialyse chronique, Flammarion, 1996.
- [3] P. SIMON, Dialyse rénale, Edition Masson.
- [4] Christian D'AUZAC, Eliane EDON, Dominique BEACCO, Soins et réanimation : le point Abrégé théorique et pratique de l'épuration extra-rénale, Editions hospitalières, 1997.
- [5] H.DINARD, Le traitement de l'eau ultrapure utilisée dans l'industrie de la micro-électronique, L'eau, l'industrie et les nuisances, Septembre 1985, N°94, 59-61.
- [6] J. PRONOST, L'eau ultra-pure : utilisation et production dans l'industrie, Environnement & Technique, Juillet-Août 2000, N°198, 27-31.