

XXVIIèmes Olympiades de la Chimie

Opérations unitaires pour la potabilisation de l'eau

Benoît POUHAUT & Frédéric RAPINEL

IUT Villeurbanne – Département Chimie

Opérations unitaires pour la potabilisation de l'eau

Sommaire :

- L'eau sur la Terre
- Elimination des Matières particulaires
- Elimination des Matières dissoutes
- Quelques chiffres clés

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

2

L'eau sur la Terre

Vue de l'espace, La Terre apparaît comme une planète bleue, sa surface étant à 70% océanique.

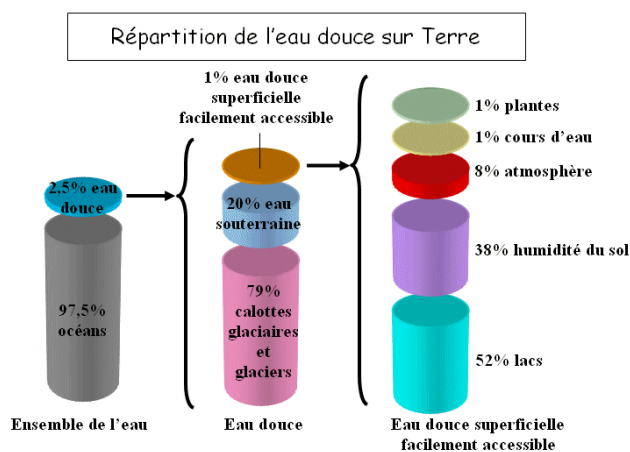
La présence d'eau liquide est une originalité qui a permis l'épanouissement de la vie.

A la surface de la planète, l'eau décrit un cycle entre plusieurs réservoirs.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

3

La répartition de l'eau sur la Terre



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

4

L'eau dans la nature

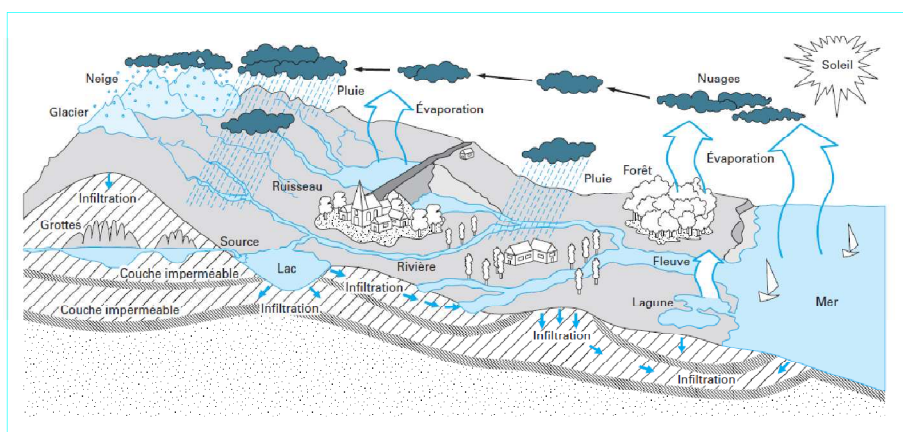
L'eau sous ses différents états physiques (gazeux, liquide, solide) suit un vaste cycle dans la nature.

- ❖ Précipitations
- ❖ Ruissellement
- ❖ Evapotranspiration
- ❖ Infiltration

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

5

Le cycle de l'eau



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

6

Eau potable ?

Toutes les eaux de la nature ne sont pas potables. Même une eau d'apparence limpide transporte en son sein toutes sortes de substances inertes et vivantes, dont certaines peuvent être nocives pour l'organisme humain.

Ces substances proviennent soit du milieu physique dans lequel l'eau a évolué, soit des rejets de certaines activités humaines dont l'eau est devenue le réceptacle.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

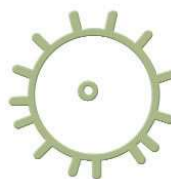
7

Éléments présents dans l'eau



Gaz Dissous :

Essentiellement :
oxygène et gaz
carbonique
mais aussi azote
ou méthane.



Matières organiques

Sous forme dissoute :

carbohydrates, acides humiques (sécrétés par les plantes et les mousses...), pigments et composés d'origine artificielle comme les hydrocarbures, les solvants chlorés, ou les pesticides.

En suspension :

déchets végétaux, plancton.



Matières minérales

Les plus présentes :

le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}),
le sodium (Na^+), le potassium (K^+),
les carbonates (CO_3^{2-}), les bicarbonates (HCO_3^-),
les sulfates (SO_4^{2-}), les chlorures (Cl^-),
et les nitrates (NO_3^-).

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

8

Normes

Une eau potable doit être exempte de germes pathogènes (bactéries, virus) et d'organismes parasites, car les risques sanitaires liés à ces micro-organismes sont grands.

Elle ne doit contenir certaines substances chimiques qu'en quantité limitée : il s'agit en particulier de substances qualifiées d'indésirables ou de toxiques, comme **les nitrates et les phosphates, les métaux lourds, ou encore les hydrocarbures et les pesticides**, pour lesquelles des " concentrations maximales admissibles " ont été définies. À l'inverse, la présence de certaines substances peut être jugée nécessaire comme les oligo-éléments indispensables à l'organisme.

Opérations unitaires pour la potabilisation de l'eau

Sommaire :

- L'eau sur la Terre
- Elimination des Matières particulaires**
- Elimination des Matières dissoutes
- Quelques chiffres clés

Elimination des Matières particulaires

Les *constituants insolubles* (on dit aussi « *particulaires* ») contenus dans les eaux superficielles et certaines eaux souterraines sont directement influencées à partir de la surface du sol : matières en suspension inertes (microsable ; limons ; colloïdes : argiles, formes précipitées de divers métaux, matières organiques floculées, etc.) ou organismes vivants (phyto- et zooplancton, plus une fraction significative des bactéries et des virus).

Présentation de la clarification

L'ensemble des traitements destinés à éliminer la pollution particulaires est généralement désigné sous le nom de *clarification*, car leur objectif est avant tout d'obtenir une eau claire.

Toutefois, ils permettent souvent d'éliminer aussi une proportion notable de quelques substances dissoutes, par exemple : macromolécules organiques (en particulier, celles qui constituent la couleur réelle de l'eau), certains métaux lourds.

Présentation de la clarification

On peut distinguer deux catégories de procédés.

- ◆ **Traitements physiques**
- ◆ **Traitements physico-chimiques**

Les traitements physiques

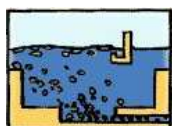
Ils sont appliqués lorsqu'il s'agit d'une simple séparation mécanique solide-liquide, sans introduction de réactifs :



- **Dégrillage ;**

- **Tamissage ;**

- **Microtamissage ;**



- **Dessablage ;**

- **Déshuilage.**



Les traitements physico-chimiques

Ils sont nécessaires pour clarifier les eaux contenant des colloïdes, cette partie du traitement est subdivisée en trois étapes :

- **coagulation** : déstabilisation des particules colloïdales et formation de micromicelles constituées d'hydroxyde métallique et de colloïdes ;
- **floculation** : rassemblement des micromicelles sous forme séparable de la phase aqueuse ;
- **séparation** des phases solide et liquide :

Décantation ou flottation



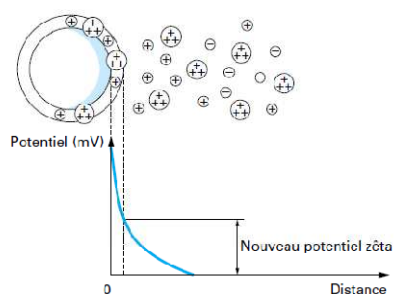
Filtration

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

15

La coagulation

La **coagulation** consiste à ajouter à l'eau un électrolyte permettant de neutraliser les charges négatives qui sont à l'origine du maintien en suspension stable. On utilise généralement des sels d'un métal trivalent, **Fe³⁺** ou **Al³⁺**.



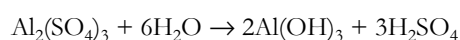
XXVIIèmes Olympiades de la chimie

16

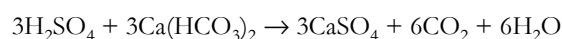
La chimie de la coagulation

Avec le *sulfate d'aluminium* (cas le plus courant), la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium résulte de deux réactions successives d'hydrolyse du produit coagulant et de neutralisation de l'acidité ainsi libérée par l'alcalinité (TAC) de l'eau :

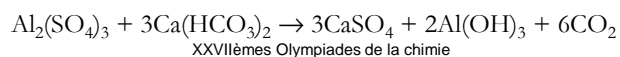
- **Hydrolyse du coagulant :**



- **Neutralisation par le TAC :**



- **Réaction globale :**



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

17

La Flocculation

La formation du floc étant amorcée par l'introduction du coagulant, il est nécessaire d'accroître son volume, sa masse et sa cohésion, ce qui

sera favorisé par :

- une **coagulation préalable** aussi parfaite que possible ;
- une **augmentation de la quantité du floc** dans l'eau



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

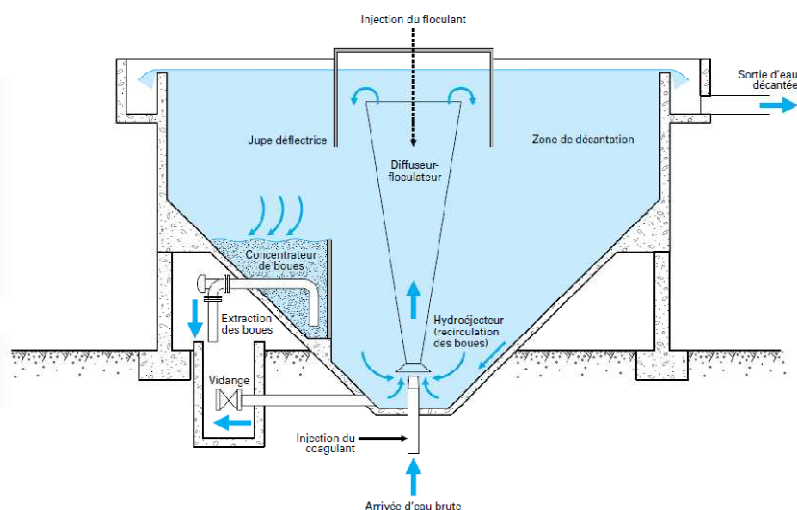
18

La décantation

Une fois le floc formé, il faut réaliser la séparation solide-liquide qui permettra d'obtenir l'eau clarifiée d'un côté et les boues (particules colloïdales initiales + floc) de l'autre.

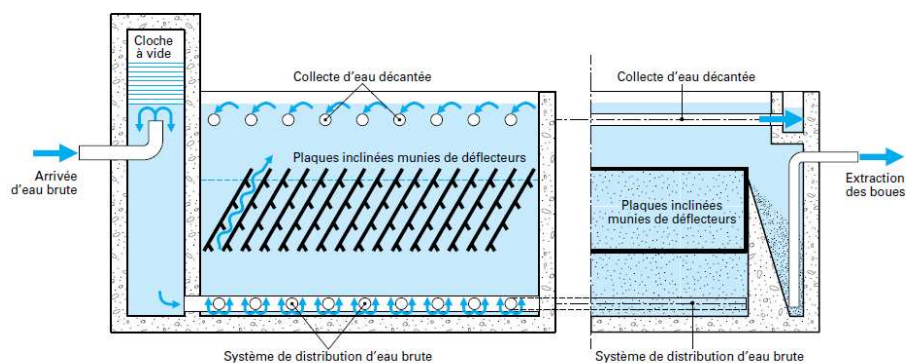
On utilise en général **l'action de la pesanteur** sur les particules en suspension et l'on recueille ensuite l'eau claire à la partie supérieure de l'appareil, alors qu'on soutire les boues sédimentées dans la partie inférieure : c'est la **décantation**.

La décantation



La version métallique (en acier) de ce décanteur a également été appliquée dans de nombreuses usines, en clarification ou en décarbonatation.

La décantation



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

21

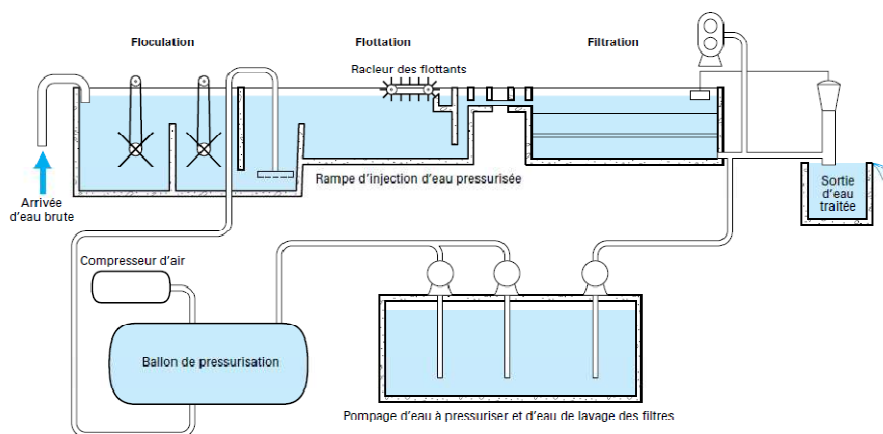
La Flottation

Dans certains cas particuliers, où le floc est léger, on réalise une **flottation** et la situation est alors inversée : les boues sont évacuées sous forme d'écume à la partie supérieure et c'est le sous-nageant, recueilli par ramifications perforées ou cloison siphonoïde, qui donnera l'eau traitée.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

22

La Flottation



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

23

La Filtration

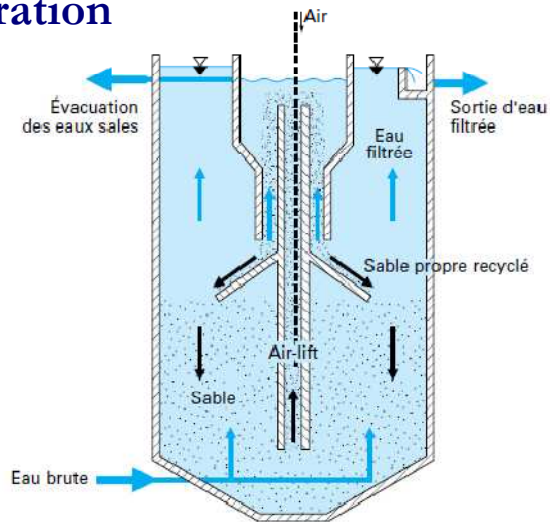
Que l'eau soit coagulée ou non, décantée (ou « flottée ») ou non, il faut toujours la filtrer pour que l'élimination des matières insolubles soit aussi complète que possible (c'est-à-dire pour que la turbidité soit ramenée au voisinage de zéro).

C'est surtout la *filtration en profondeur*, sur **matériau granulaire**, qui constitue le cœur de la majorité des stations de préparation d'eau potable.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

24

La Filtration



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

25

Opérations unitaires pour la potabilisation de l'eau

Sommaire :

- L'eau sur la Terre
- Elimination des Matières particulaires
- Elimination des Matières dissoutes
- Quelques chiffres clés

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

26

Elimination des Matières dissoutes

Dans de nombreux cas, en revanche, il faut pousser le traitement plus loin, en éliminant les *micropolluants minéraux et organiques* et en pratiquant une désinfection pour préparer une eau de qualité potable, et/ou en introduisant ou en ôtant des gaz et des sels minéraux dissous, jusqu'à obtenir, dans les exemples les plus élaborés, un produit aussi proche que possible de l'élément H_2O .

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

27

Elimination des Matières dissoutes

En fonction des usages de l'eau, la filière de traitement associera certains des actes unitaires suivants :

- **Echanges gaz-liquide** ;
- Utilisation des réactifs **oxydants** (chlore, ozone, etc.) ;
- Fixation de certains composés sur des produits **adsorbants** dont le **charbon actif** ;
- Mise en œuvre des **résines échangeuses d'ions** ;
- Exercer une action sur les **caractéristiques calco-carboniques** de l'eau (pH, alcalinité, dureté calcique) ;
- pratiquer différents types de séparation sur **membranes** .

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

28

Echanges gaz - liquide

Généralement placée en tête de traitement, l'aération s'avère nécessaire sur toutes les eaux privées d'oxygène dissous : eaux souterraines, eaux des couches profondes ou eaux subissant une très forte pollution organique.

Elle a les effets suivants :

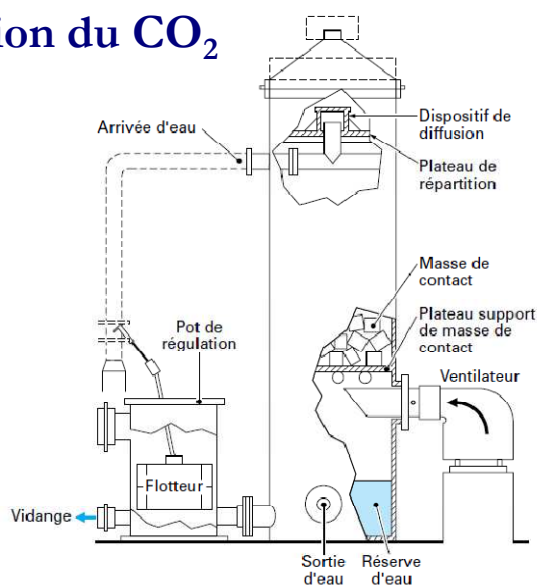
a) Introduire de l'oxygène dissous ;

b) Chasser, par effet physique de stripage, certains gaz indésirables (CO_2 , H_2S , CH_4) ou des polluants volatils.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

29

Elimination du CO_2



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

30

Oxydation

Les réactifs oxydants peuvent être utilisés dans deux domaines.

a) L'oxydation chimique de composés minéraux à l'état réduit

[fer, manganèse, ammonium, nitrites, H₂S...] **et de certaines**

matières organiques dissoutes ;

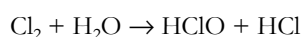
b) La désinfection (bactéries pathogènes, virus, parasites), **les**

effets biocides vis-à-vis des bactéries, des algues et des micro-invertébrés.

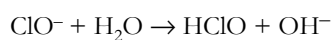
Le Chlore

Ce réactif peut être mis en œuvre soit sous forme de chlore gazeux (Cl₂) dissous dans l'eau et dosé par un appareil appelé chloromètre, soit sous forme d'hypochlorite ClO⁻ (de sodium, c'est-à-dire l'eau de Javel, ou de calcium). Quelle que soit la forme commerciale initiale, le chlore se dissout dans l'eau en formant à bas pH de l'acide hypochloreux HClO :

- soit en partant de chlore gazeux :



- soit en partant d'hypochlorite :



L'Ozone

L'*ozone* (O_3) est l'oxydant et le désinfectant le plus puissant que l'on connaisse, mais il disparaît rapidement de l'eau par **décomposition spontanée** : il n'a donc pas de pouvoir désinfectant rémanent.

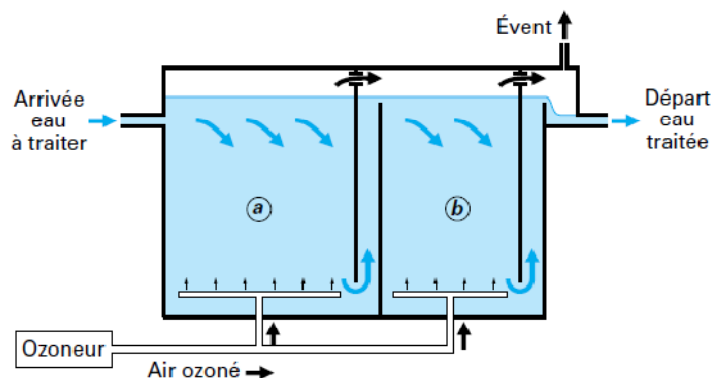
Après ozonation, il peut donc être **nécessaire de compléter la désinfection** par une petite dose d'un autre oxydant capable de laisser des traces résiduelles dans l'eau distribuée, c'est-à-dire du chlore.

L'Ozone

Les tendances actuelles de son emploi dans le traitement des eaux de surface sont les suivantes :

- **en prétraitement à faible dose** (moins de 1 mg/L en général) **avant clarification** ;
- **en préliminaire à une filtration sur charbon actif en grains (CAG) dans les traitements d'affinage** ;

L'Ozone



Chambre de contact :

- Ⓐ réponse à la demande chimique en ozone
- Ⓑ désinfection proprement dite

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

35

L'Adsorption

L'adsorption définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des molécules extraites de la phase liquide ou gazeuse dans laquelle ils sont immergés. Parmi les matériaux adsorbants (qui comprennent également les zéolites naturelles, certaines résines synthétiques, etc.), le **charbon actif** est actuellement le plus utilisé.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

36

Le charbon actif

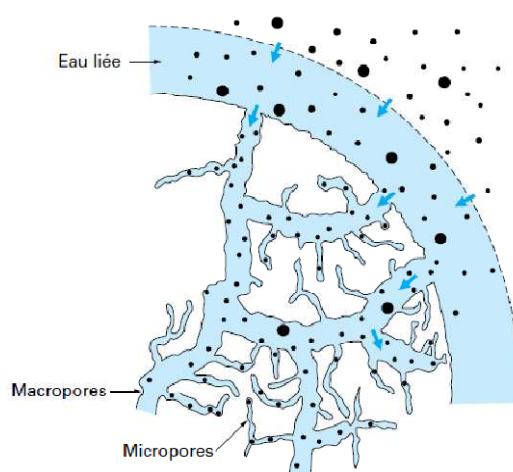
Le charbon actif a tout d'abord été utilisé pour améliorer les **qualités organoleptiques** d'une eau en éliminant les matières organiques responsables de goûts, d'odeurs et de couleur.

Avec l'accroissement de la pollution, son emploi s'est étendu à l'élimination de nombreux polluants et micropolluants tels que les phénols, les hydrocarbures, les pesticides, les détergents, et même certains métaux lourds

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

37

Principe d'adsorption sur charbon actif

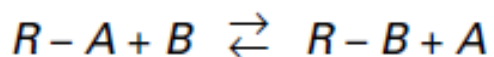


XXVIIèmes Olympiades de la chimie

38

Echanges d'ions

D'une façon générale, les échangeurs d'ions sont des substances granulaires insolubles, minérales ou organiques, d'origine naturelle ou synthétique, qui comportent *des fonctions acides ou basiques* susceptibles d'échanger leurs ions mobiles avec les ions de même signe contenus dans les solutions avec lesquelles ils sont mis en contact. Cette forme d'échange est en général une réaction d'équilibre, de la forme :



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

39

Utilisation des échangeurs d'ions

Les résines actuelles se présentent généralement sous la forme de *particules sphériques* dont le diamètre est compris entre 0,3 et 1,2 mm.

Elles présentent rigoureusement le même diamètre, améliorant le pouvoir d'échange, limitant les zones mortes, permettant un meilleur reclassement et réduisant notablement la formation de fines.

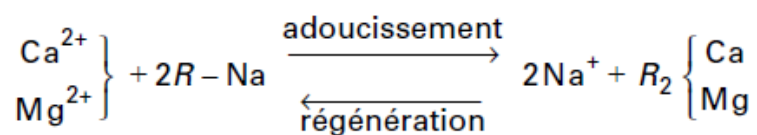
XXVIIèmes Olympiades de la chimie

40

Utilisation des échangeurs d'ions

Les chaînes de traitement sur échangeurs d'ions varient en fonction de l'application et du degré de purification recherché ; on distingue trois types principaux d'application :

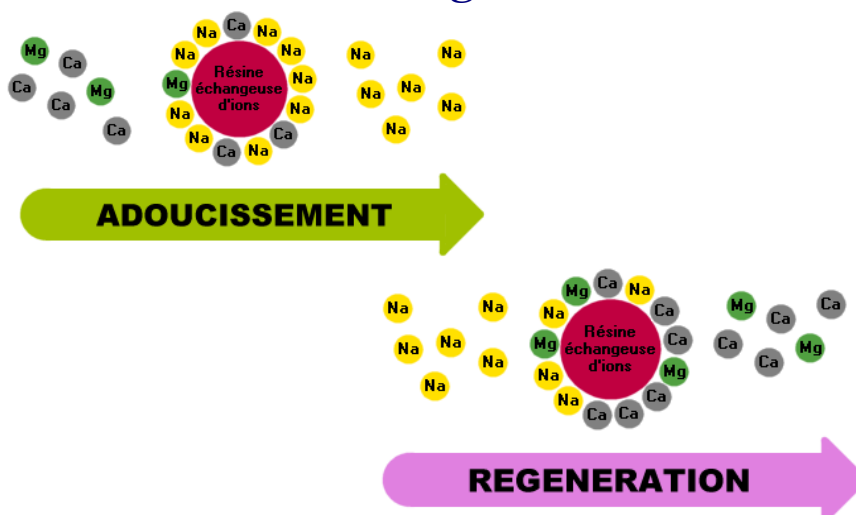
- l'**adoucissement** : c'est la permutation sodique sur échangeurs de cations sous la forme ionique Na ;



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

41

Utilisation des échangeurs d'ions

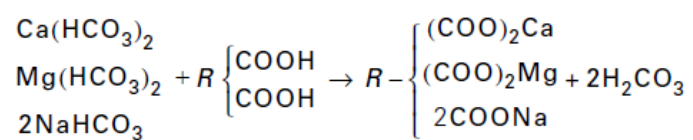


XXVIIèmes Olympiades de la chimie

42

Utilisation des échangeurs d'ions

-la **décarbonatation** : une résine carboxylique sous forme acide fixe les cations alcalins et (préférentiellement) alcalino-terreux liés aux bicarbonates sans toucher aux sels d'acides forts, ce qui libère l'acide carbonique.



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

43

Utilisation des échangeurs d'ions

- la **déminéralisation totale** qui est l'élimination de tous les cations et de tous les anions (remplacés respectivement par des ions H^+ et OH^-)

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

44

Modifications des caractéristiques calco-carboniques

Il s'agit des traitements qui interviennent sur tout ou partie des paramètres suivants : pH, TA, TAC, TH, CO₂ libre ; les principaux d'entre eux sont :

- la **neutralisation** du CO₂ agressif ;
- les traitements d'**adoucissement** (élimination totale ou partielle du TH) et/ou **décarbonatation** (élimination du TAC) ;
- la **reminéralisation** des eaux dont le TAC et/ou le TH sont au contraire trop faibles.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

45

Neutralisation de l'agressivité

On utilise alors la **soude**, la **chaux** ou le **carbonate de sodium**.

C'est la chaux, du fait de son prix, qui est le réactif le plus fréquemment employé.

On peut aussi filtrer l'eau sur un **carbonate alcalino-terreux granulé** (coquillages broyés).

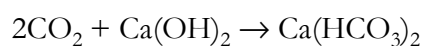
XXVIIèmes Olympiades de la chimie

46

Neutralisation du CO₂ agressif

Le TAC et le TH peuvent être artificiellement augmentés par divers procédés :

- *injection de CO₂ et de chaux* ; c'est le procédé le plus élégant, n'introduisant aucun autre ion indésirable dans l'eau :

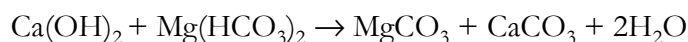
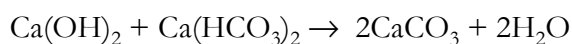


- *injection de CO₂ et filtration sur carbonate alcalino-terreux*

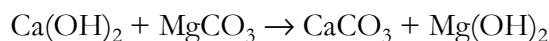
granulé : $\text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

Adoucissement-décarbonatation à la chaux

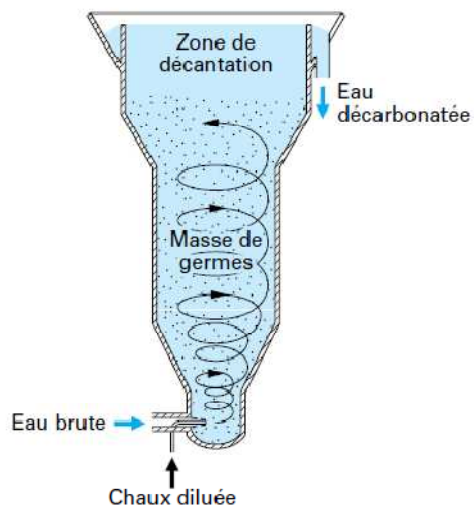
Ce traitement abaisse les titres en calcium et en magnésium de l'eau par précipitation sous forme de carbonate et d'hydroxyde, respectivement ; on assiste donc simultanément à un abaissement du TAC :



puis, avec un excès de chaux :



Adoucissement-décarbonatation à la chaux



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

49

Techniques membranaires

On y distingue deux familles principales de membranes :

- les **membranes microporeuses de microfiltration (MF) et d'ultrafiltration (UF)**
- les **membranes semi-perméables de nanofiltration (NF) et d'osmose inverse (OI)**

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

50

Techniques membranaires

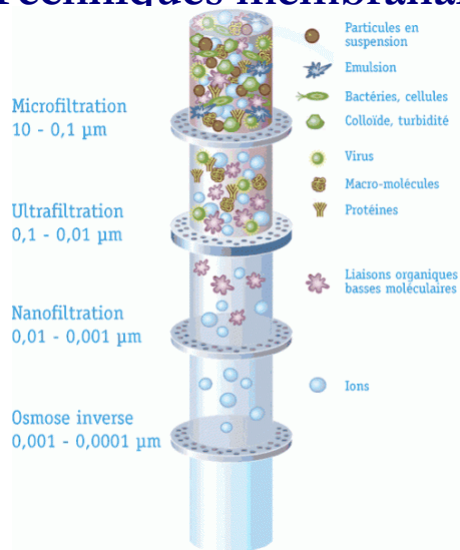
Les types usuels de séparation par membranes peuvent être classés en fonction de deux critères sur lesquels se base le mécanisme de transfert :

- le type de perméabilité de la membrane et, notamment dans le cas des membranes perméables à l'eau, son **pouvoir séparateur**, encore appelé **seuil de coupure** ;
- la nature de la **force motrice** (pression de fonctionnement).

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

51

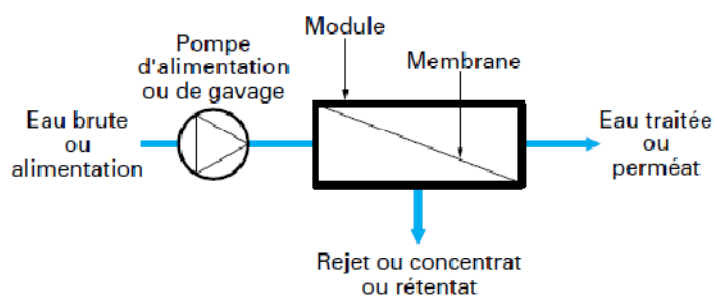
Techniques membranaires



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

52

Principe d'un traitement membranaire



Le rectangle barré par une diagonale représente symboliquement soit un module isolé, soit l'ensemble d'un traitement par membranes


Microfiltration

Technique : On utilise des membranes avec des pores de taille comprise entre 0,1 et 10 μm .

Les membranes de microfiltration éliminent toute les bactéries.

La microfiltration peut être mise en œuvre dans beaucoup de procédés de traitements différents quand des particules avec un diamètre supérieur à 0,1mm ont besoin d'être éliminées.

Microfiltration



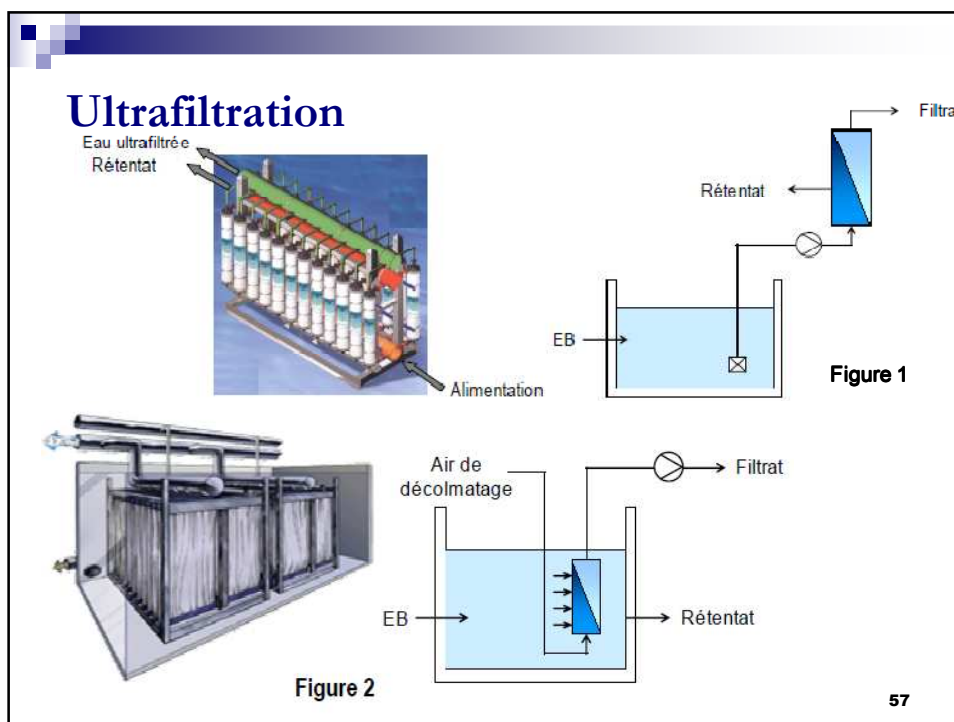
The diagram illustrates a microfiltration system. It features a 'Pompe d'alimentation' (feeding pump) on the left that draws water into a system. A 'Vanne de décharge' (discharge valve) is located at the top left. The water then flows through a 'Module de filtration' (filtration module) containing 'membranes minérales' (mineral membranes). The filtered water, labeled 'Eau filtrée', exits from the bottom of the module. A 'Pompe de circulation' (circulation pump) is positioned at the bottom of the module. A 'Sortie séquentielle des impuretés (rétentat)' (sequential outlet of impurities/retentate) is shown at the top left. A circular inset provides a magnified view of the membrane's internal structure, showing a grid of small pores. To the right of the diagram is a photograph of a white, cylindrical filter cartridge with a black cap and a red band near the top.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie 55

Ultrafiltration

Technique : la membrane est constituée de milliers de fibres très fines, rassemblées à l'intérieur d'une gaine rigide. Les parois de chacune de ces fibres sont percées d'une multitude de pores microscopiques dont la taille est de l'ordre de 0,01 micromètre. L'eau à traiter circule sous pression à l'intérieur des fibres et passe à travers les pores.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie 56



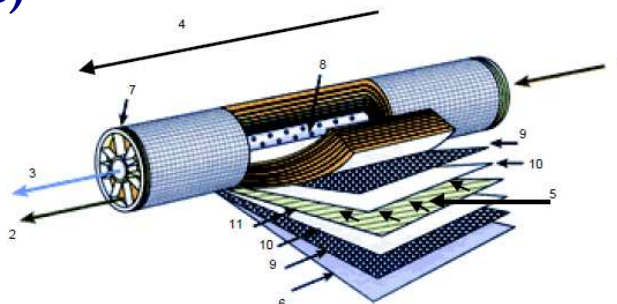
Nanofiltration

Technique : la membrane de nanofiltration offre une porosité de l'ordre de $0,001 \mu\text{m}$.

Constituée de trois couches de matériaux différents, elle est enroulée autour d'un tube central.

Injectée sous pression, l'eau à traiter traverse la membrane et ressort filtrée par le tube central.

Nanofiltration (vue d'une membrane à spirale)



- 1 Entrée d'eau
- 2 Sortie de concentrat
- 3 Sortie de perméat
- 4 Sens d'écoulement de l'eau brute
- 5 Sens d'écoulement du perméat
- 6 Matériau de protection
- 7 Joint d'étanchéité entre module et enveloppe
- 8 Perforations collectant le perméat
- 9 Espaceur
- 10 Membrane
- 11 Collecteur de perméat

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

59

Nanofiltration



1999 : Mise en service de l'étape de nanofiltration de l'usine de Méry-sur-Oise pour le syndicat des Eaux d'Ile-de-France (SEDIF)

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

60

Osmose inverse

Techniques : l'eau est filtrée et désinfectée afin de la débarrasser des éléments en suspension et des micro-organismes qu'elle contient.

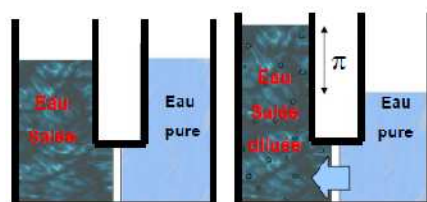
Cette eau est passée sous pression à travers une membrane semi-perméable afin de recueillir les molécules d'eau.

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

61

Principe de l'Osmose Inverse

Le phénomène d'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Le phénomène d'osmose est un phénomène naturel courant, notamment à travers les membranes cellulaires.



Situation initiale

Equilibre osmotique

Figure 1

62

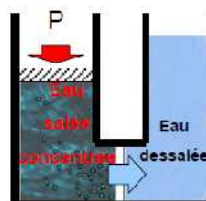
Principe de l'Osmose Inverse

La membrane semi-perméable laissera passer le solvant

(le soluté ne passe pas) pour équilibrer la concentration.

La différence de concentration crée une pression, appelé Pression osmotique.

Pour inverser le passage du solvant et augmenter la différence de concentration, il faut appliquer une pression supérieure à la pression osmotique.



$$P_{\text{appliquée}} > \pi$$

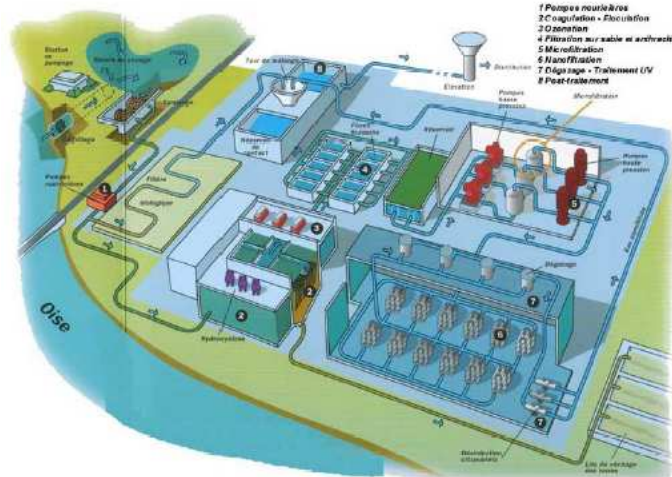
Figure 2

Osmose inverse : exemple d'installation

Avec une capacité de 320 000 m³/jour, l'usine d'Ashkelon (Israël) est la plus grande référence au monde dans le domaine du dessalement membranaire. C'est aussi là que s'observe un des plus faibles coûts de production au monde en dessalement par osmose inverse, faisant de cette technique une alternative économiquement compétitive.



Usine de production d'eau potable de Méry-sur-Oise



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

65

Opérations unitaires pour la potabilisation de l'eau

Sommaire :

- L'eau sur la Terre
- Elimination des Matières particulières
- Elimination des Matières dissoutes
- Quelques chiffres clés

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

66

Répartition des prélèvements d'eau par usage et par ressource

En 2007, 31 600 millions de m³ prélevées au total en France :

- 59 % (18,8 Mm³) pour la production d'énergie
- 10 % (3,1 Mm³) pour les besoins de l'industrie
- 12 % (3,9 Mm³) pour l'irrigation
- 18 % (5,8 Mm³) pour l'eau potable

Dont 18 % proviennent des eaux souterraines

82 % proviennent des eaux de surface

XXVIIèmes Olympiades de la chimie

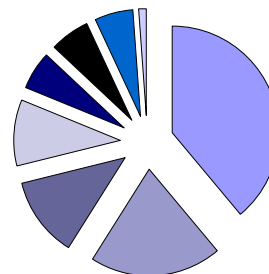
67

Répartition de la consommation d'eau par foyer en France

Un français consomme en moyenne 150 litres d'eau par jour (soit 55 m³ par personne et par an), de 118 litres/jour pour le Nord-Pas-de-Calais à 259 litres/jour pour la Corse.

La consommation des foyers français est répartie comme suit :

- 39 % pour les bains et les douches
- 20 % pour les W.C
- 12 % pour le linge
- 10 % pour la vaisselle
- 6 % pour la préparation de la nourriture
- 6 % pour les usages domestiques divers
- 6 % pour le lavage de la voiture et l'arrosage du jardin
- 1 % pour l'eau potable



XXVIIèmes Olympiades de la chimie

68

Les bons gestes pour l'environnement...

- Prenez une douche plutôt qu'un bain.
- Installez un système de réduction de débit sur vos robinets, de type aérateur mousseur.
- Ne laissez pas couler l'eau pendant le brossage des dents ou le rasage.
- Réduisez votre consommation d'eau en utilisant un lave-vaisselle et un lave-linge économique, de classe énergétique A.
- Installez une chasse d'eau économique dans vos toilettes.
- Faites la chasse aux fuites d'eau.
- Arrosez votre jardin et vos plantes la nuit, elles gaspilleront moins d'eau.