



Traitement de l'eau II

Dr. BESSEDIK Madani

m_bessedik@mail.univ-tlemcen.dz

mabessedik@yahoo.fr

Chapitre I

Traitement de l'eau brute pour la rendre potable

Chapitre II

Critères généraux pour les installations de traitement

Chapitre III

Stabilisation et contrôle de la corrosion

Chapitre IV

Instrumentation et contrôles



EAU
POTABLE

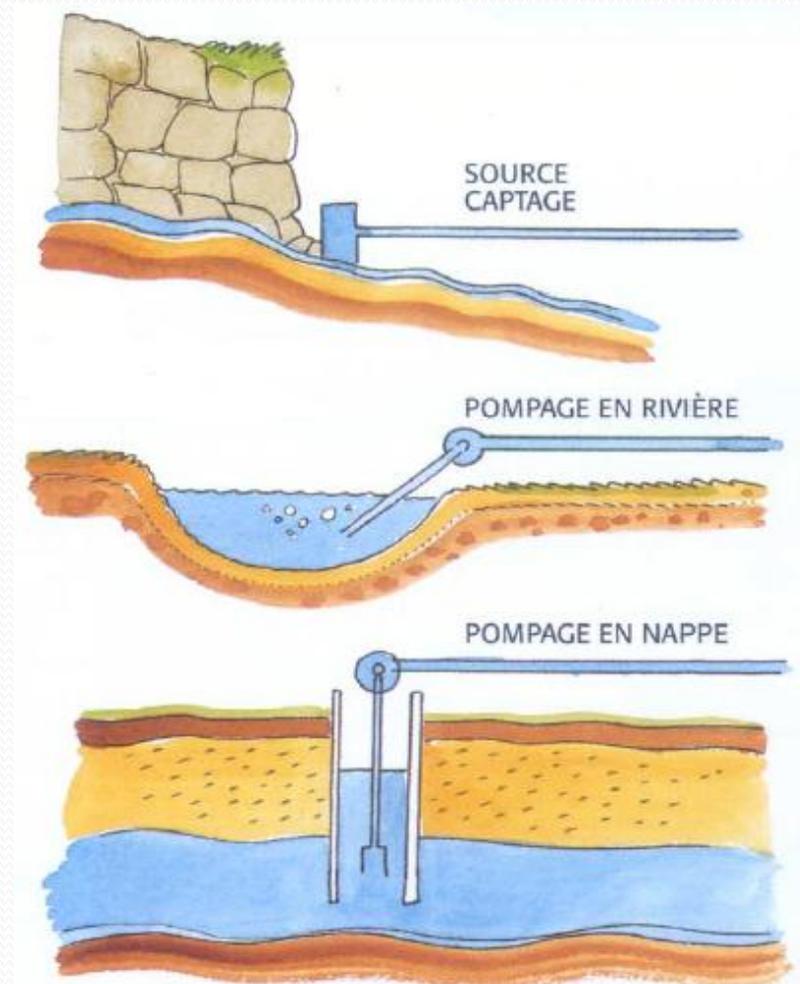
Chapitre I:

Traitement de l'eau brute pour
la rendre potable

I.1- Captage de l'eau

Les captages sont majoritairement réalisés dans les nappes souterraines. Ces dernières, en effet, présentent des avantages indéniables : leur eau, épurée par le sol, est généralement de bonne qualité et moins vulnérable aux pollutions.

A l'inverse, les eaux superficielles sont exposées à tous les types de pollutions et de disponibilité variable selon les saisons.



Cependant l'eau brute captée en milieu naturel n'est pas toujours potable. Elle doit alors être acheminée par des canalisations jusqu'à une usine spécialisée dans le traitement de l'eau, qui la rend "potable" c'est à dire consommable sans risque.

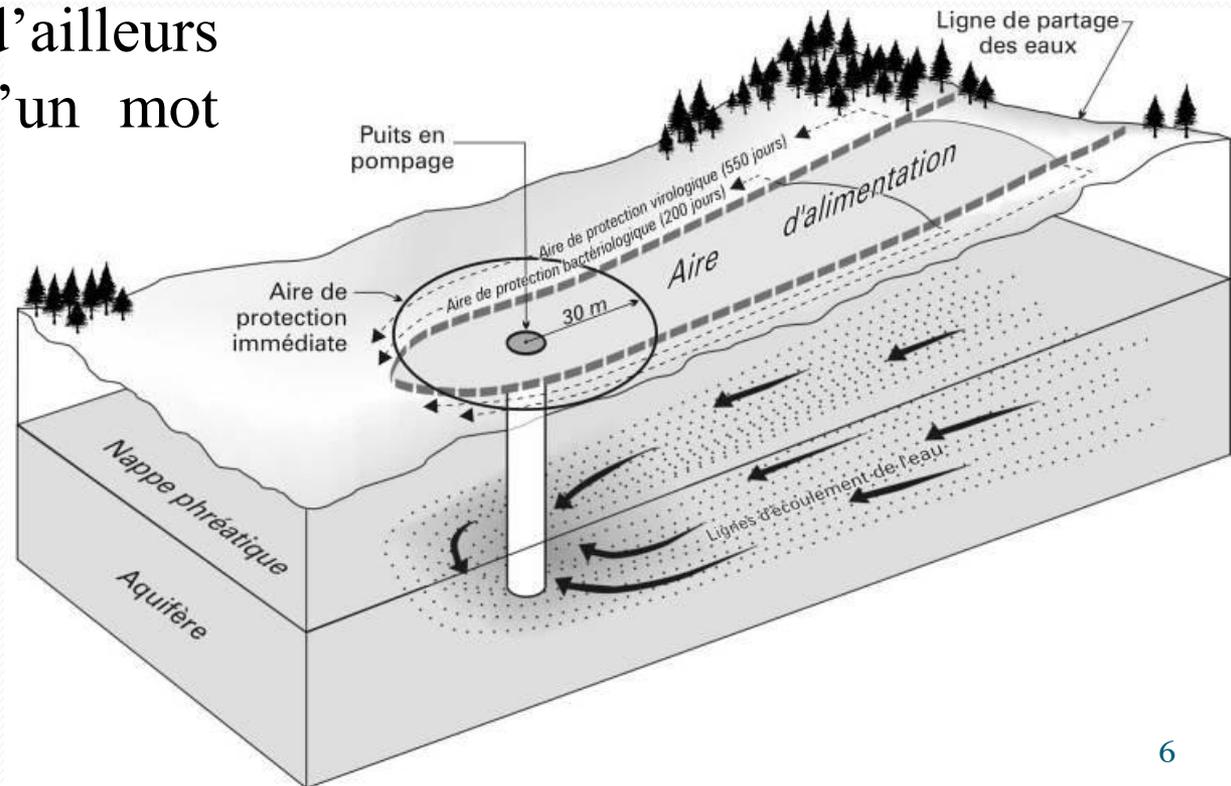


I.2- Approvisionnement en eaux souterraines et traitement

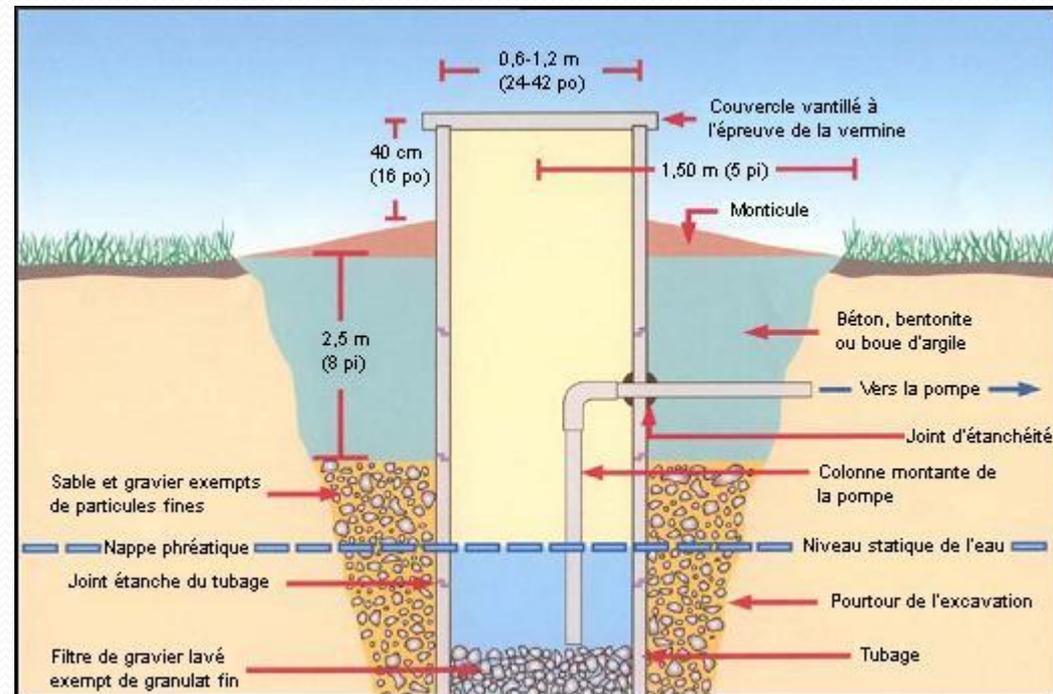
I.2.1- Introduction

Outre le captage direct des sources, le seul moyen de capter une eau souterraine est de creuser un puits dans le sol puis de remonter l'eau. Mais encore faut-il que la nappe soit proche de la surface.

De telles nappes sont d'ailleurs dites "phréatiques" d'un mot grec qui signifie puits.



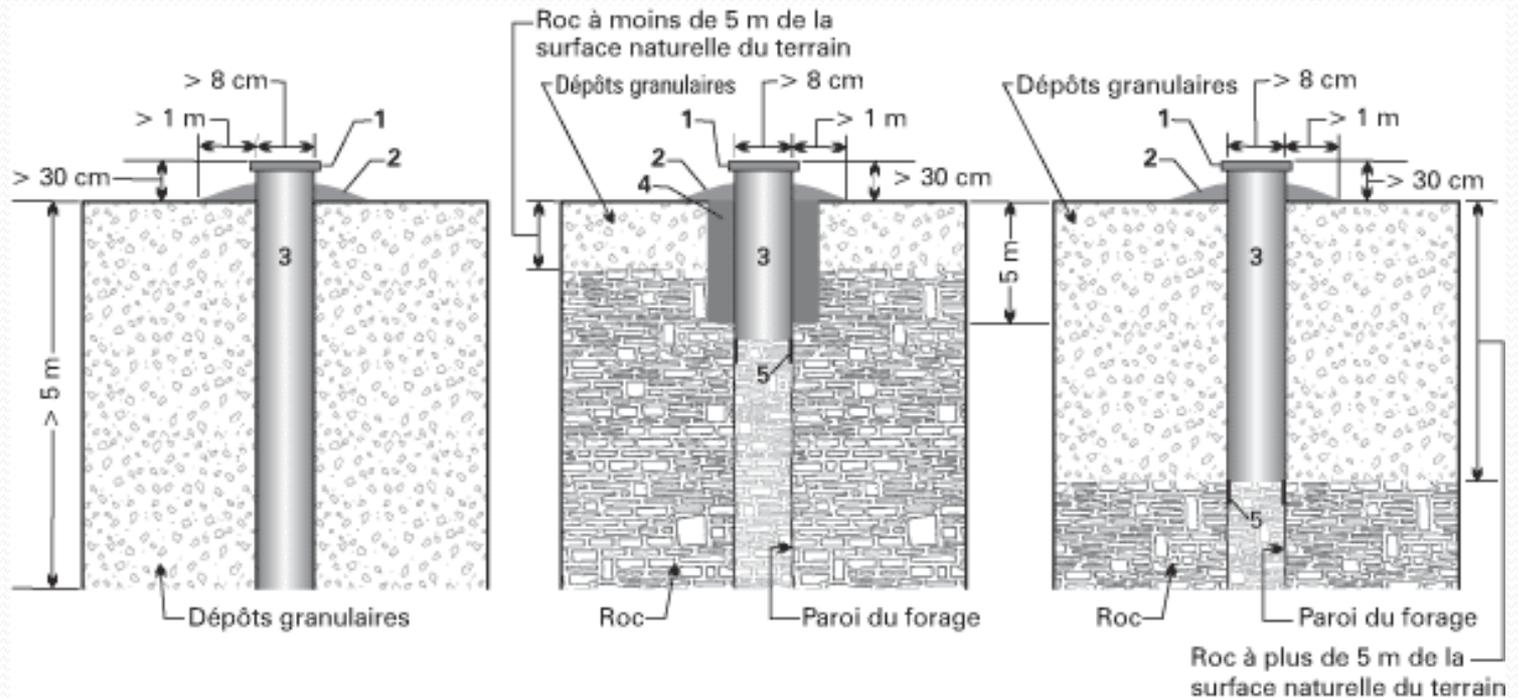
Les hommes captent depuis longtemps les eaux souterraines des nappes phréatiques de cette manière. Mais depuis l'époque où les puits étaient creusés à la pelle et l'eau remontée à l'aide d'un seau fixé à une poulie actionnée par la force humaine, les procédés ont beaucoup évolué.



I.2.2- Les types de captage

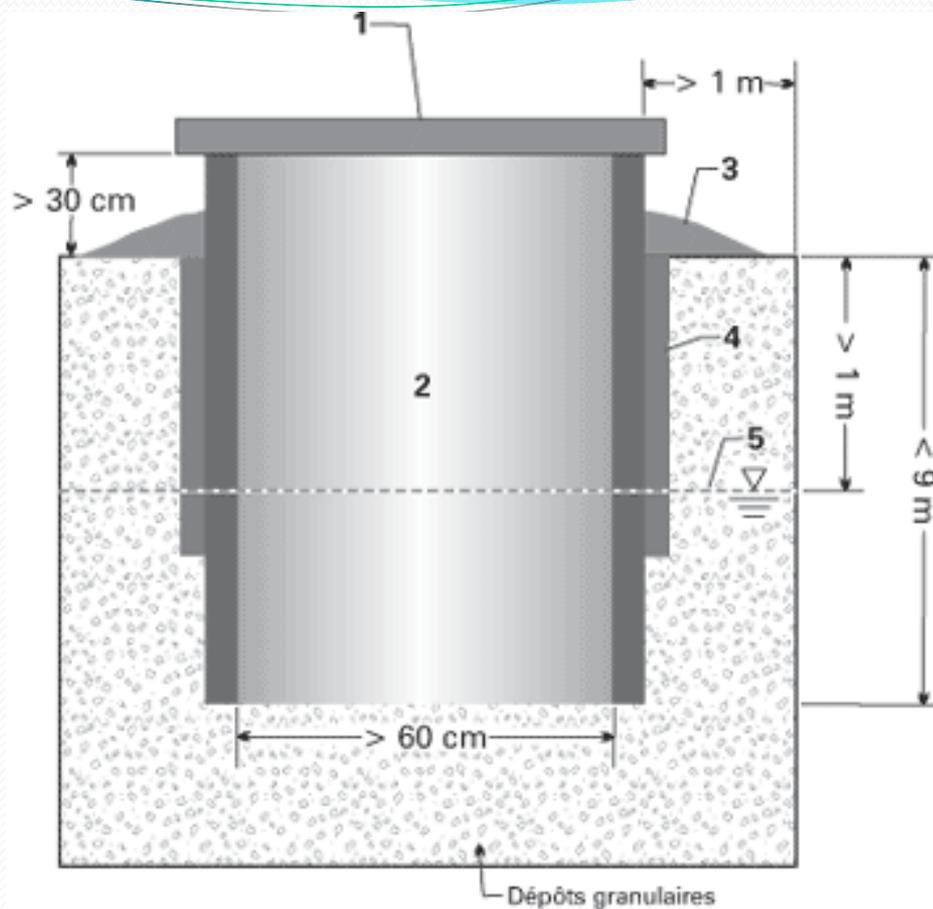
Il existe divers types d'ouvrages de captage d'eau souterraine destinée à la consommation humaine :

Puits tubulaires



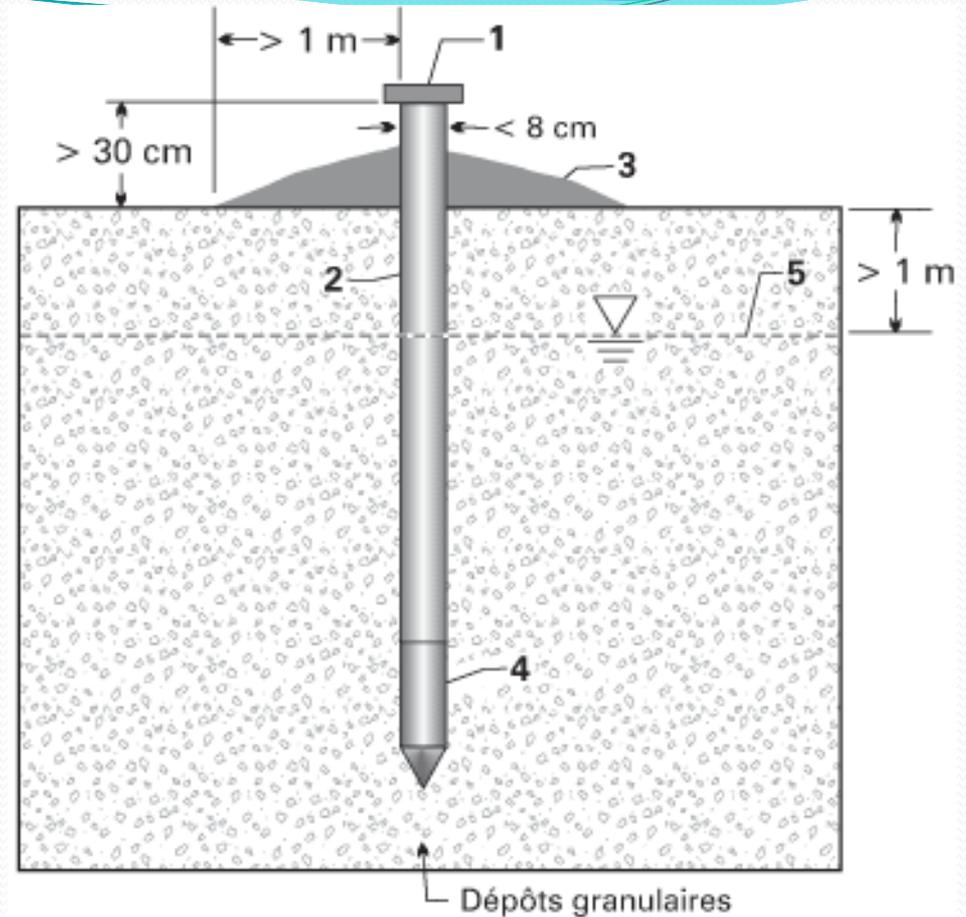
- 1 Couvercle étanche.
- 2 Monticule constitué d'un matériau imperméable.
- 3 Section tubée d'une longueur minimale de 5 m (acier, acier inoxydable ou plastique).
- 4 Matériau scellant d'une profondeur minimale de 5 m.
- 5 Sabot d'enfoncement.

Puits de surface



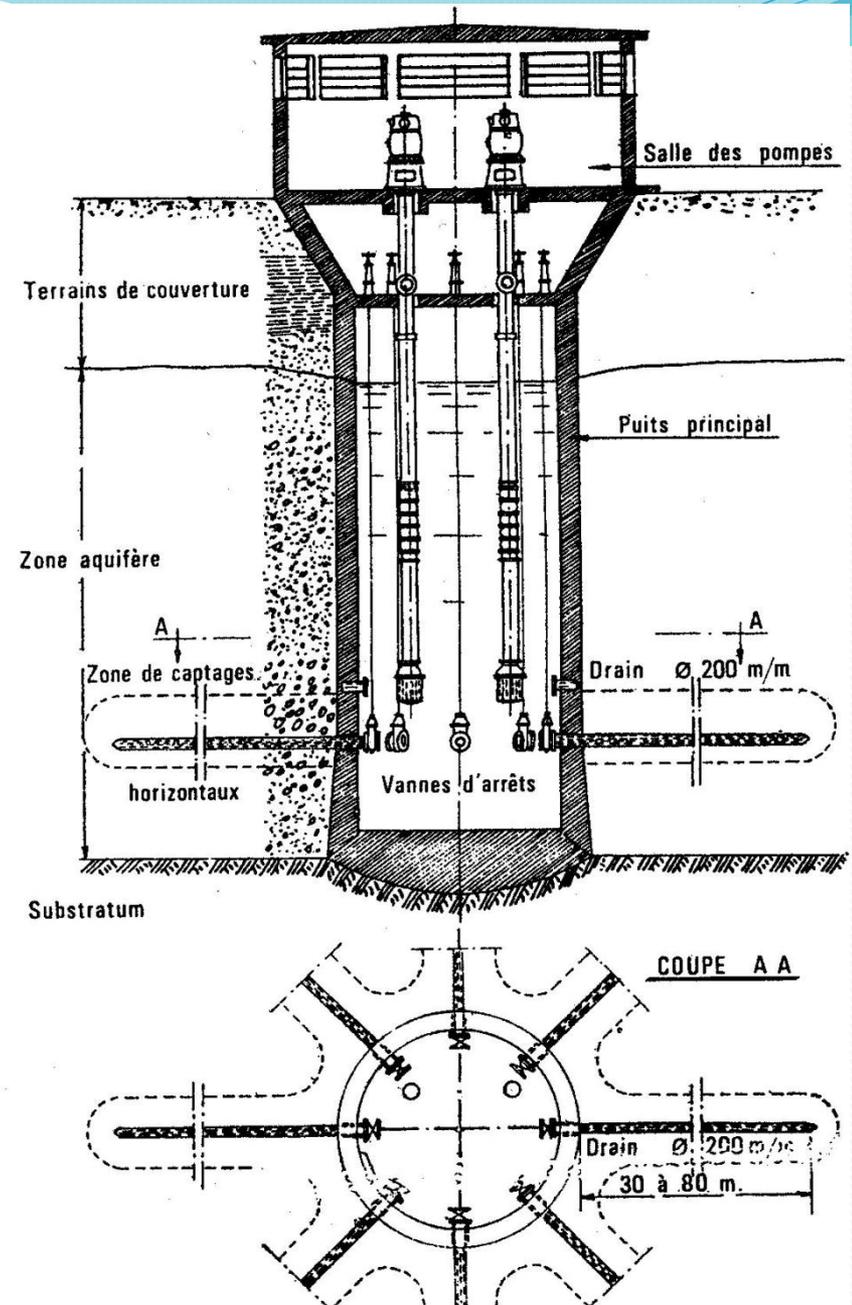
- 1- Couvercle étanche.
- 2- Section tubée (cylindres de béton, de plastique, de maçonnerie de pierres ou de béton poreux).
- 3- Monticule constitué d'un matériau imperméable.
- 4- Matériau scellant d'une profondeur minimale de 1 m remplissant tout l'espace annulaire.
- 5- Niveau de la nappe d'eau souterraine.

Pointes filtrantes

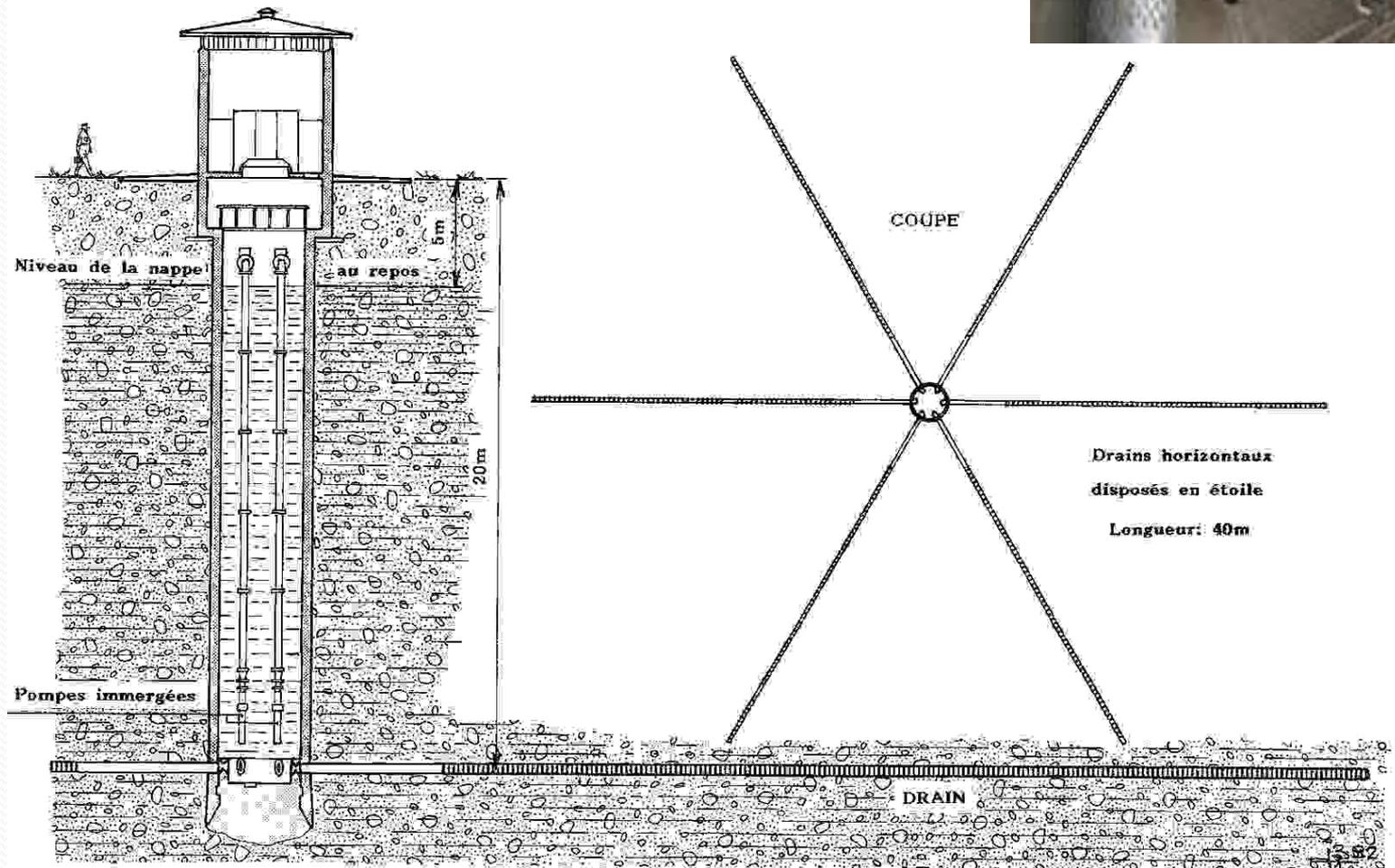


- 1- Couvercle étanche.
- 2- Section tubée (acier, acier inoxydable ou plastique).
- 3- Monticule constitué d'un matériau imperméable.
- 4- Pointe filtrante.
- 5- Niveau de la nappe d'eau souterraine.

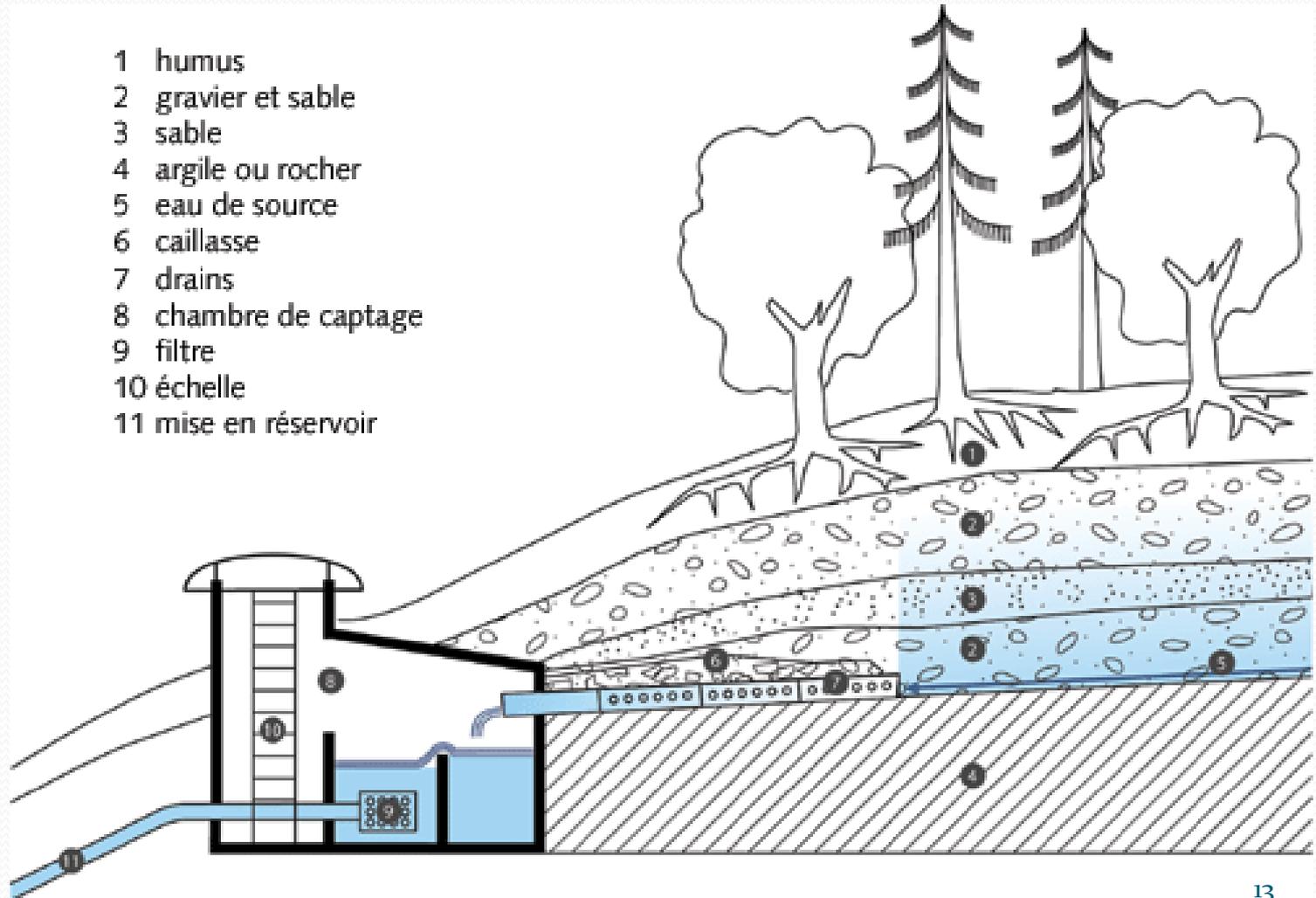
Puits rayonnants



Puits à drains horizontaux



Le captage direct des sources

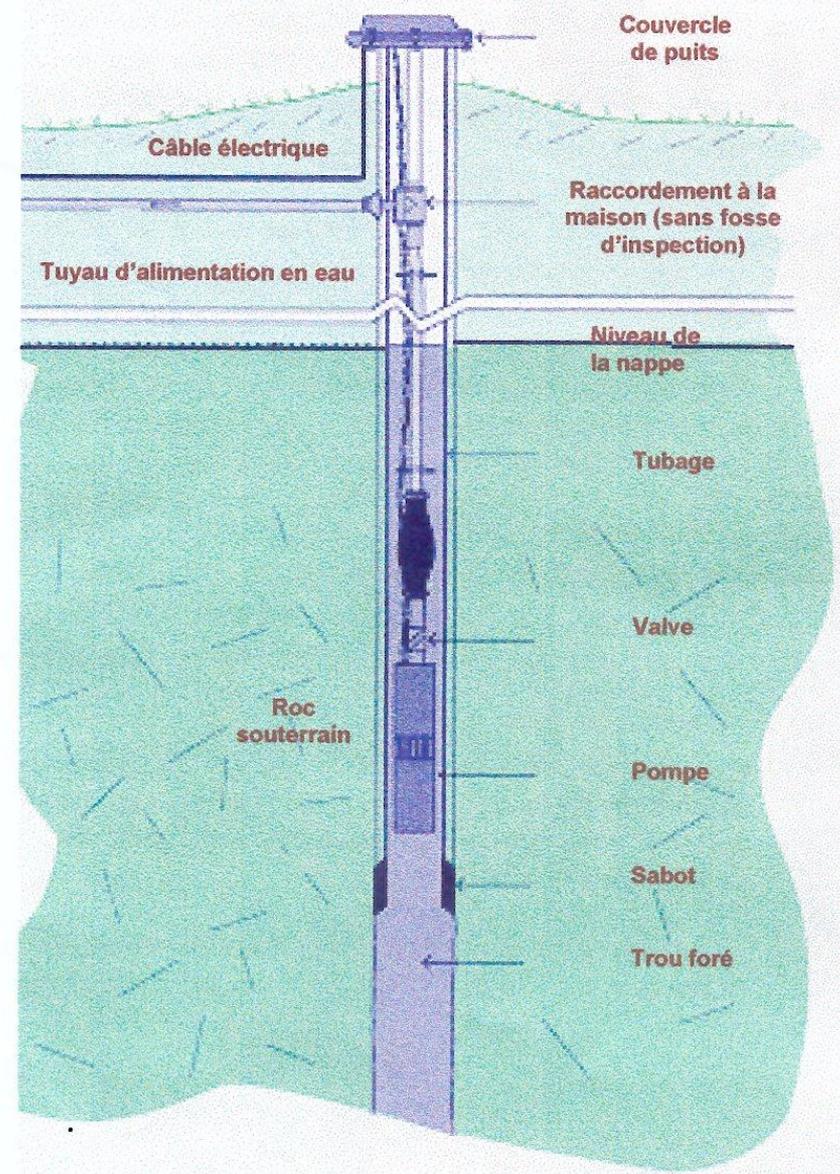
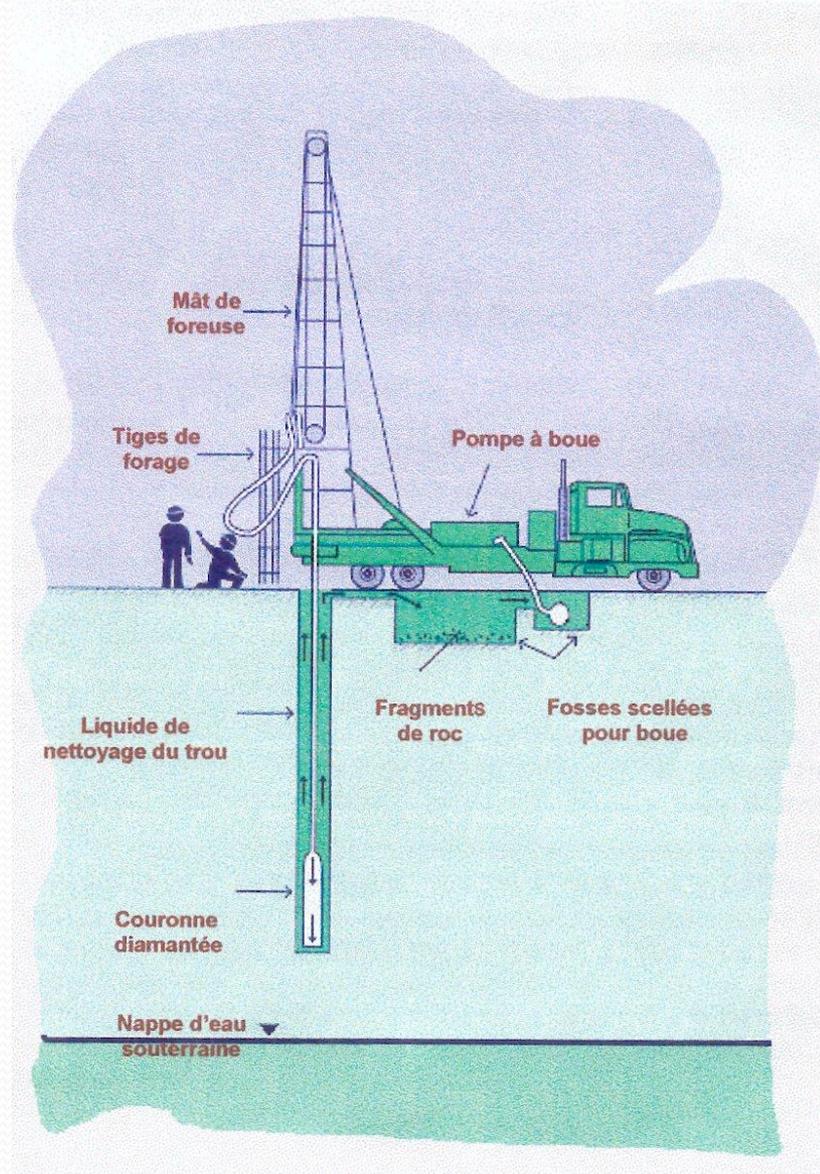


Forages

Aujourd'hui, les forages modernes utilisent des techniques similaires à celles mises en œuvre pour les forages pétroliers. Elles permettent d'atteindre des nappes situées à de grandes profondeurs, jusqu'à sept cents mètres sous terre parfois :

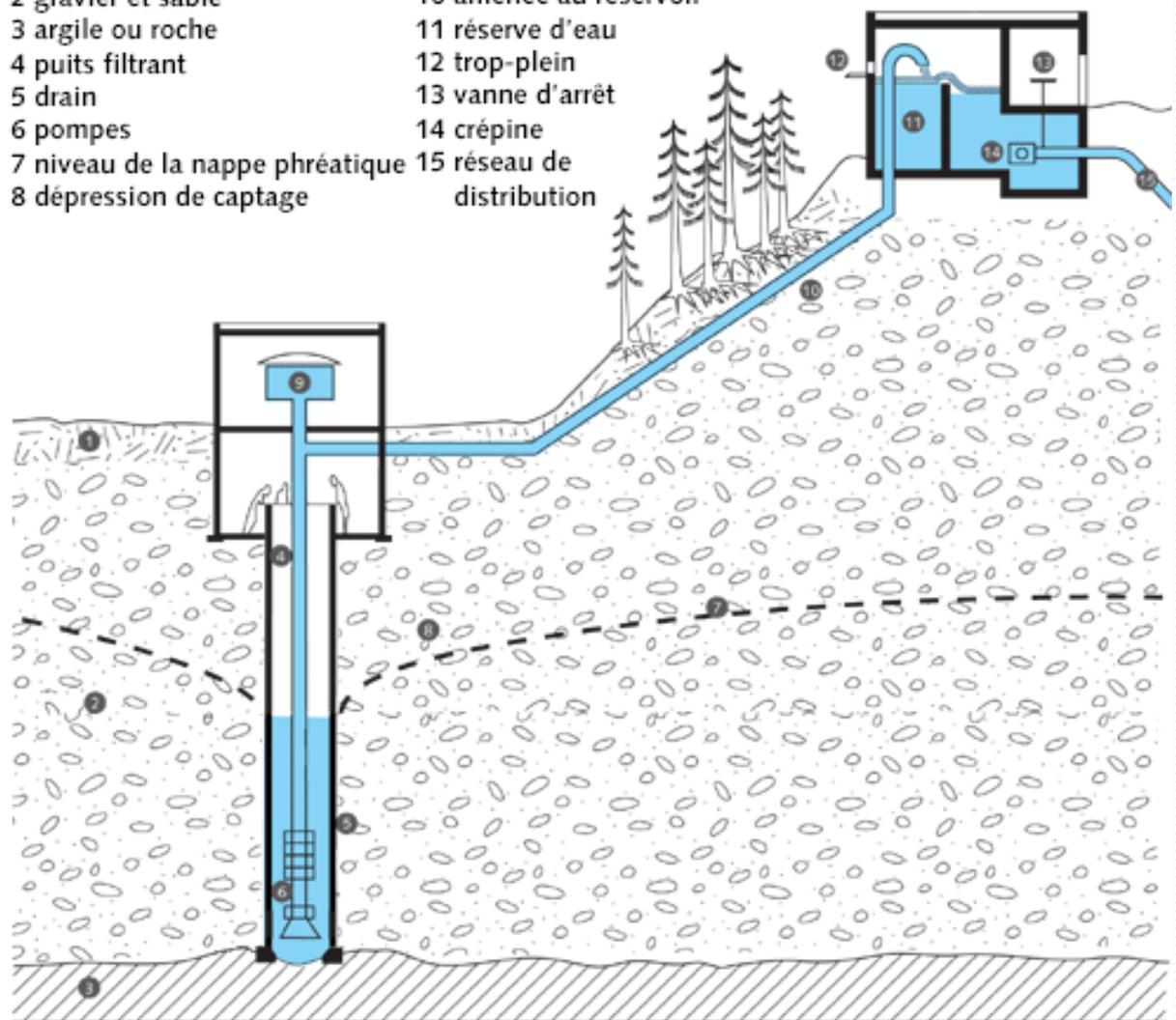
l'eau est remontée, à l'aide de moteurs électriques actionnant des pompes, le long de conduits habillés de tubes en ciment ou en acier.





- 1 humus
- 2 gravier et sable
- 3 argile ou roche
- 4 puits filtrant
- 5 drain
- 6 pompes
- 7 niveau de la nappe phréatique
- 8 dépression de captage

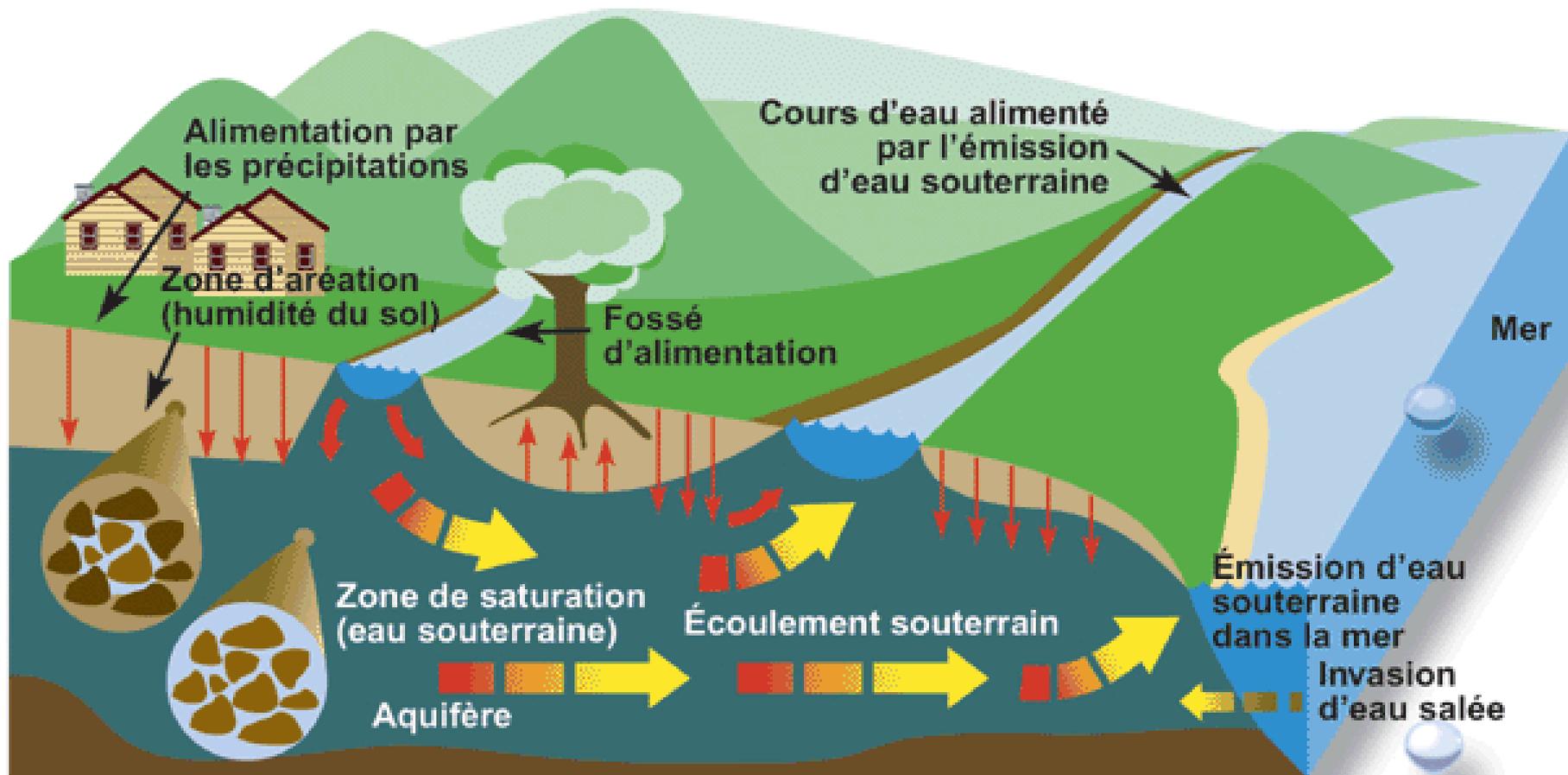
- 9 moteur
- 10 amenée au réservoir
- 11 réserve d'eau
- 12 trop-plein
- 13 vanne d'arrêt
- 14 crépine
- 15 réseau de distribution



I.2.3- Critères de conception d'un ouvrage de captage

Les travaux d'aménagement ou de modification d'un ouvrage de captage doivent être réalisés de manière à empêcher toute contamination de l'eau souterraine. En effet, un ouvrage de captage bien conçu diminue les risques de contamination provenant des sources localisées à proximité du point de captage (p. ex., infiltration le long du tubage). Cependant, il n'élimine pas les risques de contamination provenant de sources plus éloignées pouvant atteindre le point de captage par les mécanismes d'écoulement et de transport au sein des formations géologiques.

Écoulement de l'eau souterraine



I.2.4- Essais de traitabilité

Des essais de traitabilité pour les projets de production d'eau potable provenant d'une source souterraine peuvent être requis à différents stades de leur conception. Ces essais visent à :

- Établir le degré d'efficacité du système en relation avec certains critères de conception;
- Déterminer le niveau de prétraitement ou les équipements périphériques requis;
- Vérifier l'incidence de certains contaminants sur la qualité finale de l'eau produite et la nécessité d'un traitement d'appoint;
- Définir les paramètres d'opération, le type et la quantité des produits chimiques à utiliser;
- Caractériser les boues ainsi que les eaux résiduaires afin de définir les modes appropriés pour leur disposition.

En matière d'essais de traitabilité, le concepteur doit décider s'il réalise ou non de tels essais et, dans l'affirmatif, il doit définir l'échéancier, les modalités, le protocole de ces essais et leur suivi. En général, pour le traitement d'une eau souterraine sous influence directe d'une eau de surface, les essais devront durer d'une semaine à trois mois et couvrir la période la plus défavorable de l'année pour ce qui est de la qualité de l'eau brute. Pour les autres types d'eau souterraine, la durée des essais dépendra du type de contaminants à traiter et du type de traitement retenu.



Tableau 1 : Application des procédés de traitement pour les eaux souterraines¹

Catégories des contaminants	Aération	Coagulation + décantation ou FAD ² +filtration	Filtration pré-couche	Adoucissement à la chaux	Oxydation chimique et désinfection	Procédé par membrane		Échange d'Ions		Adsorption		
						Nanofiltration	Osmose inverse	Anion	Cation	Charbon actif en grain	Charbon actif en poudre	Alumine Activée
CONTAMINANTS												
Coliformes		X			X	X	X					
Inorganiques												
Antimoine							X					
Arsenic (+3)		XO		XO			X	X				X
Arsenic (+5)		X		X			X	X				X
Baryum				X			X		X			
Cadmium		X		X			X		X			
Chrome (+3)		X		X			X		X			
Chrome (+6)							X	X				
Cyanure					X							
Fluorure				X			X					X
Mercure (inorganique)				X			X					
Nitrate							X	X				
Nitrite							X	X				
Plomb	Le plomb est habituellement un produit de la corrosion et il est éliminé plus souvent par le contrôle de la corrosion que par le traitement											
Selenium (+4)		X					X	X				X
Selenium (+6)							X	X				X
Sulfate						X	X					
Turbidité		X	X	X		X	X					X
Zinc				X			X		X			
Organiques												
Volatiles	X									X		
Synthétiques							X			X	X	
Pesticides/Herbicides						X	X			X	X	
Carbone dissous		X				X	X			X	X	
Radium (226)				X			X		X			
COMPOSANTS QUI CAUSENT DES PROBLEMES ESTHETIQUES												
Dureté				X		X	X		X			
Fer + Manganèse		XO	XO	X					X			X
Solides totaux dissous							X					
Chlorure							X					
Sulfures	X	X			X							
Couleur		X			X	X	X			X	X	
Goût et odeur	X				X					X	X	

X = Approprié; XO = Approprié lorsque utilisé en combinaison avec l'oxydation.

1) Inspiré de l'AWWA, Water Quality & Treatment, 1999.

2) FAD = flottation à air dissous

I.2.5- Recherche en eau souterraine

Les eaux souterraines sont généralement de meilleure qualité bactériologique que les eaux de surface et, de ce fait, devraient être privilégiées comme source d'alimentation.



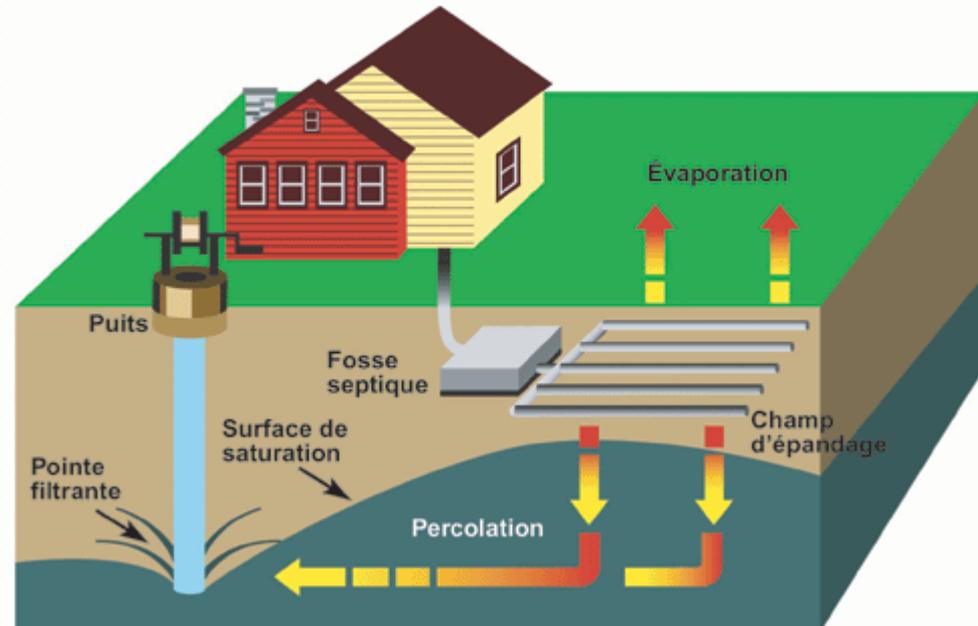
Avant de débiter les travaux d'exploration en eau, il faut délimiter une zone de recherche économiquement viable par rapport à des solutions plus radicales, mais définitives (p. ex., construction d'une installation de traitement pour des puits existants ou pour une eau de surface disponible à proximité du réseau). En établissant la limite de la zone de recherche, il faudra également considérer la possibilité que l'eau souterraine nécessite un traitement. Il arrive parfois que la qualité de l'eau soutirée d'un puits (en ce qui a trait à sa dureté, sa teneur en manganèse, fer, etc.) se détériore après quelques mois ou quelques années d'exploitation et qu'une installation de traitement doive être construite.

I.2.6- Précautions concernant la localisation d'un ouvrage de captage

Avant de procéder aux travaux, des précautions minimales doivent être prises concernant la localisation d'un ouvrage de captage.

Le Règlement sur le captage des eaux souterraines introduit des normes de distance par rapport aux systèmes de traitement d'eaux usées. Les exigences diffèrent selon que l'ouvrage de captage dessert une ou plusieurs résidences.

Percolation de l'effluent de la fosse septique jusqu'à la surface de saturation



Ainsi, il est interdit d'aménager à moins de 30 m d'un système de traitement d'eaux usées un ouvrage de captage d'eau souterraine desservant plus d'une résidence. Par ailleurs, il est interdit d'aménager tout ouvrage de captage individuel à moins de 15 m d'un système étanche de traitement d'eaux usées et à moins de 30 m de tout système non étanche de traitement d'eaux usées. Lorsque cette distance ne peut être respectée, il est permis de la réduire à 15 m si l'ouvrage de captage individuel consiste en un puits tubulaire dont l'espace annulaire est scellé à l'aide d'un mélange ciment-bentonite sur au moins 5 m de profondeur.

Par ailleurs, en plus des exigences réglementaires, les ouvrages de captage d'eau destinée à la consommation humaine devraient être situés dans la partie haute du terrain. Une distance minimale de 10 m doit séparer l'ouvrage de captage d'un cours d'eau.

Enfin, il existe des restrictions relativement à la localisation d'un ouvrage de captage par rapport à une zone inondable. En effet, il est interdit d'aménager un nouvel ouvrage de captage dans une zone à récurrence 0-20 ans, à moins que ce soit dans le but de remplacer un ouvrage existant.

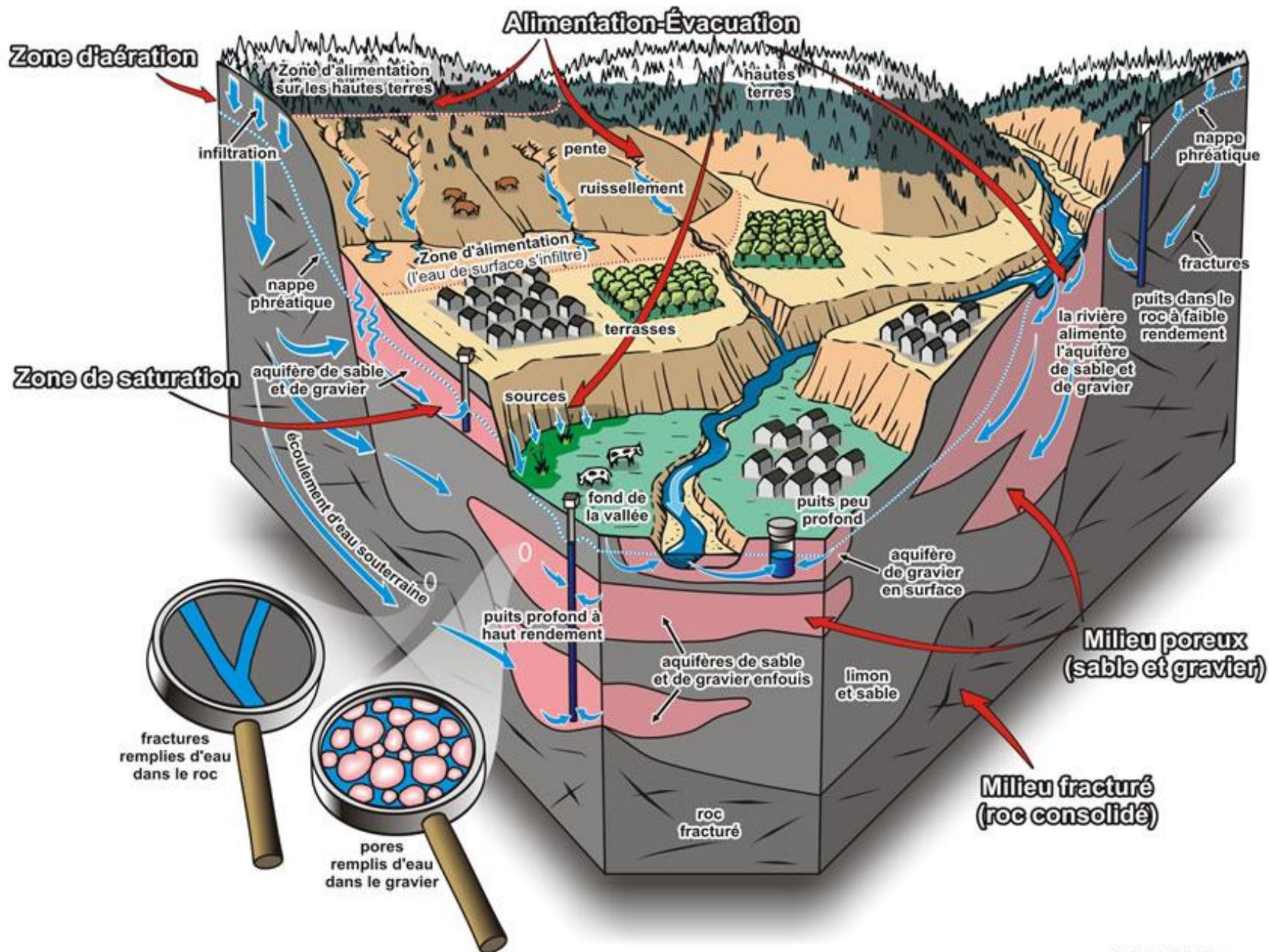


fig5_1gw3d.cdr

I.2.7- Déferrisation et/ou démanganisation

La présence de fer et de manganèse dans les sources d'approvisionnement en eau potable n'est pas souhaitable pour un certain nombre de raisons qui ne sont pas liées directement à la santé.

Les sels de fer et de manganèse dans les eaux souterraines sont instables; ils réagissent avec l'eau pour former des précipités insolubles qui sédimentent sous la forme d'un limon de couleur rouille (fer) ou noire (manganèse).



Eau chargée de rouille

Il arrive souvent que l'eau prenne alors un goût désagréable et paraisse impropre à la consommation; elle peut tacher la lessive et les accessoires de plomberie.

Dans le réseau de distribution, le fer et le manganèse peuvent sédimenter dans les conduites et réduire leur capacité hydraulique.



Ils peuvent aussi promouvoir la croissance des ferrobactéries et manganobactéries; ce sont des micro-organismes qui tirent leur énergie de l'oxydation du fer et du manganèse respectivement. Ce phénomène conduit au dépôt d'une pellicule biologique sur la paroi des conduites d'aqueduc.

Ces problèmes apparaissent ordinairement lorsque la concentration du fer dépasse 0,3 mg/L et lorsque la concentration de manganèse dépasse 0,02 mg/L. Pour le manganèse, la recommandation est de 0,05 mg/L parce qu'il est difficile d'éliminer le manganèse sous cette valeur.



Ferrobactéries

I.2.7.1- Déferrisation et/ou démanganisation par oxydation et filtration

Les procédés de traitement d'élimination du fer et du manganèse sont basés sur l'oxydation des formes réduites dissoutes (Fe^{2+} et Mn^{2+}) en formes insolubles ferriques (Fe^{3+}) et manganiques (Mn^{4+}) grâce à une réaction d'oxydoréduction.

Ces formes insolubles sont ensuite retenues sur un milieu filtrant granulaire. La première étape de traitement est donc celle d'oxydation.



En fonction des caractéristiques de l'eau brute, différents modes de traitement peuvent être envisagés. Le choix d'un procédé approprié sera déterminé à partir d'études approfondies et d'essais pilotes pour assurer l'efficacité du traitement et fixer les critères de conception optimaux.



I.2.7.1.1- Aération

a) Description du procédé

L'aération permet de mélanger l'air à l'eau pour favoriser les réactions d'oxydation, enlever les gaz dissous ou éliminer les goûts et odeurs. L'aération suit les lois de l'échange gaz-liquide, pour le transfert des solutés à travers une interface air-liquide.



b) Champs d'application

L'aération peut être installée en tête de la chaîne de traitement de l'eau comme étape de préoxydation.

Station de traitement
d'eau de Sikkak



Cette aération est nécessaire lorsque l'eau présente une carence en oxygène et permet alors, soit :

- D'oxyder des éléments réduits, tels les ions ferreux ;
- D'augmenter la teneur en oxygène dans l'eau (améliorer le goût, éviter la corrosion des conduites métalliques en formant une couche protectrice) ;
- D'éliminer des gaz indésirables (H_2S , CO_2 libre, sursaturation en oxygène, composés organiques volatils, etc.).

En comparant les potentiels d'oxydoréduction du fer et du manganèse, on constate que le fer peut être oxydé facilement par l'oxygène de l'air tandis que le manganèse ne l'est qu'à un pH alcalin.

L'aération peut aussi faire partie intégrante d'une étape de traitement spécifique et se trouver alors au milieu de la chaîne du traitement de l'eau. Enfin, l'aération peut compléter la chaîne de traitement de l'eau afin de la rendre plus agréable au goût. Elle se situe alors avant la réserve d'eau traitée et sa distribution dans le réseau.

L'aération permet aisément l'oxydation du fer s'il n'est pas à l'état complexé soit par la matière organique (acides humiques) ou par la silice dissoute.

e) Critères de conception

Dispersion de l'eau dans l'air

Dans ces systèmes, on provoque artificiellement la turbulence de l'eau. Une bonne dispersion de l'eau est nécessaire afin d'accroître l'interface air-eau permettant l'échange de gaz. Parmi les procédés utilisant la dispersion de l'eau dans l'air, notons les cascades, les plateaux, les masses de contact et la pulvérisation.

Le tableau 2 suivant présente les principales caractéristiques et critères de conception de ces procédés.



Déferrisation par simple
aération de la veine liquide

Tableau 2 : Caractéristiques et critères de conception pour la dispersion de l'eau dans l'air

Cascade	Plateau	Masse de contact	Pulvérisation
<i>Description</i>			
Créer une bonne turbulence à l'aide d'une chute en cascades sur plusieurs paliers	Écoulement de l'eau par gravité sur une série de plateaux perforés ou en pente	Tour de garnissage avec écoulement à contre-courant de l'air et de l'eau (anneaux Raschig, Pall, etc.)	Tuyères fixées sur les collecteurs d'eau (utilisées surtout en dégazage et oxygénation de l'eau; peuvent être combinées aux cascades)
<i>Critères de conception</i>			
Hauteur de chaque palier : 30 à 80 cm Vitesse d'approche : 25 m/h et plus	Distribution sur le plateau de tête : Uniforme Nombre d'unités : 3 à 5 plateaux Écart entre les plateaux : 15 cm ou plus Charge superficielle : moins de 12 m ³ /m ² /h Taille des perforations : entre 1,2 et 5 cm distancées de 7,5 cm	Vitesse de l'eau : de 10 à 50 m ³ /m ² /h Vitesse de l'air : de 1500 à 2000 N.m ³ /m ² /h Hauteur de garnissage : de 1500 à 3000 mm Autres éléments de conception : Fabricants et fournisseurs	Débits : selon modèle retenu (mais débit stable) Autres éléments de conception : Fabricants et fournisseurs

La température de l'eau et de l'air auront une grande influence sur l'efficacité du transfert. De plus, les eaux aérées doivent subir une désinfection adéquate avant distribution.



Dispersion de l'air dans l'eau

Dans ces systèmes, l'air est injecté dans la masse d'eau à aérer. Encore une fois, une bonne dispersion de l'air est nécessaire afin d'accroître l'interface air-eau permettant l'échange de gaz.

Parmi les procédés utilisant la dispersion de l'air dans l'eau, notons les diffuseurs et l'aération sous pression. Le tableau 3 suivant présente les principales caractéristiques de ces procédés.

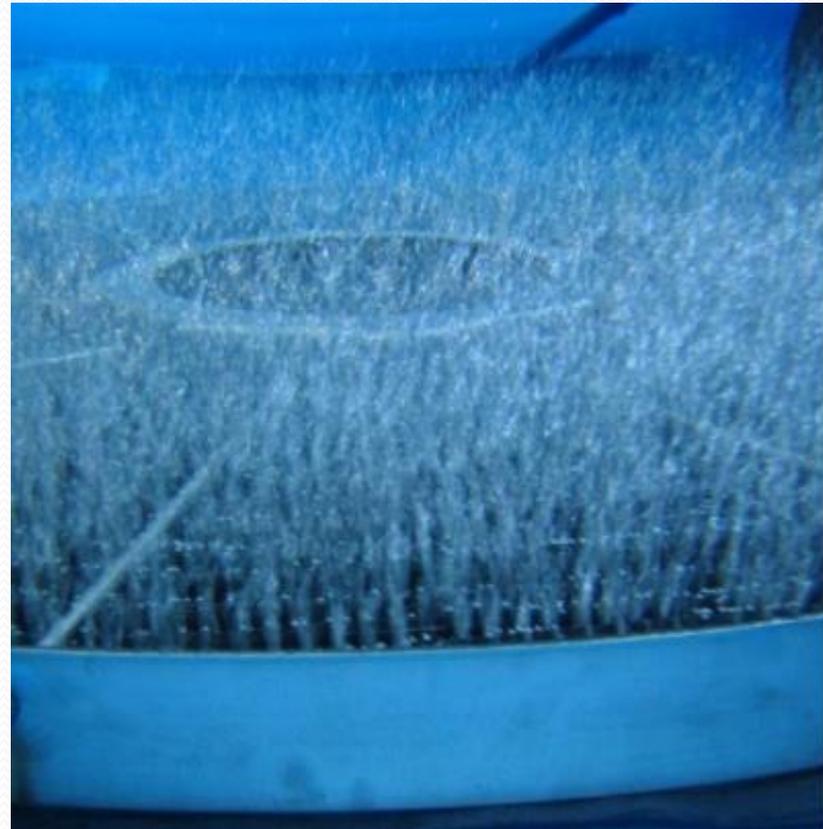


Tableau 3 : Caractéristiques pour la dispersion de l'air dans l'eau

	Diffuseurs	Aération sous pression
<i>Description</i>	Injection d'air sous pression dans une masse liquide	Injection d'air dans une conduite sous pression
<i>Type d'injecteur</i>	1) Dispositif déprimogène 2) Réseau de diffuseurs dans un réservoir d'aération (fines, moyennes ou grosses bulles)	Pot mélangeur
<i>Rendement</i>	Dépend du type de diffuseur et de son coefficient de transfert	1) À utiliser seulement pour fins d'oxydation suite à des essais de traitabilité 2) Filtres en aval doivent être équipés de soupapes de soulagement 3) L'air doit être débarrassé des contaminants (fumée, poussières, vapeurs, etc.)

Données requises pour la conception

Pour la conception de l'aération, il est nécessaire de connaître :

- la température de l'air et de l'eau,
- la concentration des éléments à éliminer ou à oxyder et le débit d'air à injecter (si on utilise la diffusion de l'air dans l'eau).



Autres éléments de conception

Afin de compléter la conception de l'aération, il faut tenir compte des éléments suivants :

- Il existe sur le marché de nombreux types d'aérateurs. D'autres méthodes d'aération peuvent être acceptées pourvu que leur application soit justifiée par des essais pilotes ou des caractéristiques particulières des eaux à traiter;
- Des essais pilotes peuvent être nécessaires pour déterminer certains paramètres de fonctionnement;
- Quand la décharge du système débouche directement dans l'atmosphère, le système d'aération (tour, cascades, etc.) doit être installé dans une enceinte fermée et facilement accessible pour fins d'inspection et d'entretien;
- Protéger adéquatement contre les oiseaux et insectes les systèmes d'aération où les eaux aérées ne subissent qu'une simple chloration avant d'être distribuées;
- Une conduite de contournement doit être prévue sur chaque unité d'aération.

I.2.7.1.2- Oxydation chimique

a) Description du procédé

Les oxydants chimiques jouent le même rôle que l'aération en ce qui a trait à l'oxydation des éléments réduits comme les ions ferreux. La combinaison avec l'étape d'aération est toutefois intéressante puisque la demande en oxydant chimique peut être abaissée grâce à l'action préalable de l'oxygène de l'air sur les composés réducteurs, volatils ou autres.

b) Champs d'application

Les oxydants chimiques forts autres que l'oxygène de l'air permettent d'oxyder à la fois le fer et le manganèse dissous.

c) Critères de conception

Les différents oxydants forts susceptibles d'être utilisés dans un traitement de déferrisation et/ou de démnanganisation sont présentés dans le tableau 4 suivant.

Déferrisation et
démanganisation physico-
chimique



Tableau -4 : Critères de conception utilisés en oxydation chimique

<i>Oxydant</i>	Chlore	Permanganate de potassium	Ozone	Bioxyde de chlore
<i>Dose stœchiométrique</i> ⁽¹⁾				
<i>Par g de Fe</i>	0,63 g de Cl ₂	0,94 g de KMnO ₄	0,43 g d'ozone	1,21 g de ClO ₂
<i>Par g de Mn</i>	1,3 g de Cl ₂	1,9 g de KMnO ₄	0,87 g d'ozone	2,45 g de ClO ₂
<i>Critères de conception</i>				
<i>Temps de rétention</i> ⁽²⁾	Plus de 2 minutes	De quelques secondes à 3 minutes	Dépend du type d'ozonateur	Moins de 5 minutes
<i>Point d'injection</i>	En amont des filtres	En amont des filtres	En amont des filtres	En amont des filtres
<i>Éléments à considérer</i>				
<i>Dosage</i>	-Tenir compte des autres éléments qui peuvent être oxydés par le chlore (matières organiques dissoutes, hydrogène sulfuré, ammoniac, etc.)	-Comme pour le chlore, tenir compte des autres éléments qui peuvent être oxydés par le permanganate de potassium -Dosage précis car l'excédent est très visible (teinte rose si > 0,05 mg/L) et doit être enlevé par un agent réducteur (sable vert, charbon actif, SO ₂ , etc.)	-Comme pour le chlore, tenir compte des autres éléments qui peuvent être oxydés par l'ozone	

⁽¹⁾ La dose finale devra être ajustée en tenant compte des autres éléments qui peuvent consommer l'oxydant retenu : azote ammoniacal, sulfures, etc.

⁽²⁾ Dépend de la température et des conditions de pH de l'eau à traiter

d) Autres éléments de conception

Afin de compléter la conception de l'oxydation chimique, il faut tenir compte des éléments suivants :

- Des essais de traitabilité peuvent être réalisés afin de déterminer les doses optimales et les temps de contact nécessaires pour compléter l'oxydation du fer et du manganèse;
- Le peroxyde d'hydrogène peut aussi être utilisé mais son temps de réaction est plus long que celui des autres oxydants;
- Le temps de résidence dans le réacteur doit permettre la réaction complète;
- Les cinétiques d'oxydation sont plus rapides à pH et température élevés;
- Le fer et le manganèse peuvent être complexés par la matière organique, ce qui peut mener à l'inhibition de la réaction d'oxydation du fer et du manganèse;
- La présence d'oxygène dissous peut accélérer la cinétique d'oxydation;
- L'alcalinité a un pouvoir tampon sur le pH, mais si l'eau a un caractère incrustant, elle peut retarder la réaction d'oxydation.

Il existe d'autres procédés de filtration pour la déferrisation et démanganisation, comme :

- *Filtration sur sable vert* : le sable vert est un média manufacturé qui permet l'adsorption ou la filtration physique du fer et du manganèse ou encore l'oxydation catalytique du manganèse, selon le mode d'opération qui est choisi.

sable vert



- *Filtration sur sable avec ou sans anthracite* : pour certains types d'eau, la déferrisation et la démanganisation peuvent être réalisées par une filtration sur sable ou sur sable et anthracite après une oxydation par aération ou par un oxydant chimique. Ce procédé peut être effectué par filtration sous pression ou gravitaire.



anthracite



- *Filtration sur média conditionné* : le média conditionné est un média similaire au sable vert, mais dont le mode de fabrication diffère. Le support utilisé peut être du sable ou de l'antracite de granulométrie contrôlée. Le ou les médias sélectionnés sont installés dans le système de filtration où ils reçoivent, avant leur mise en service, un traitement chimique contenant du permanganate de potassium ainsi qu'un agent fixatif servant à conditionner le média. Ce traitement chimique provoque la précipitation d'oxyde de manganèse directement sur les grains de média en place. Les réactions d'adsorption et d'oxydation qui prévalent sur ce type de média sont donc similaires à celles du sable vert.

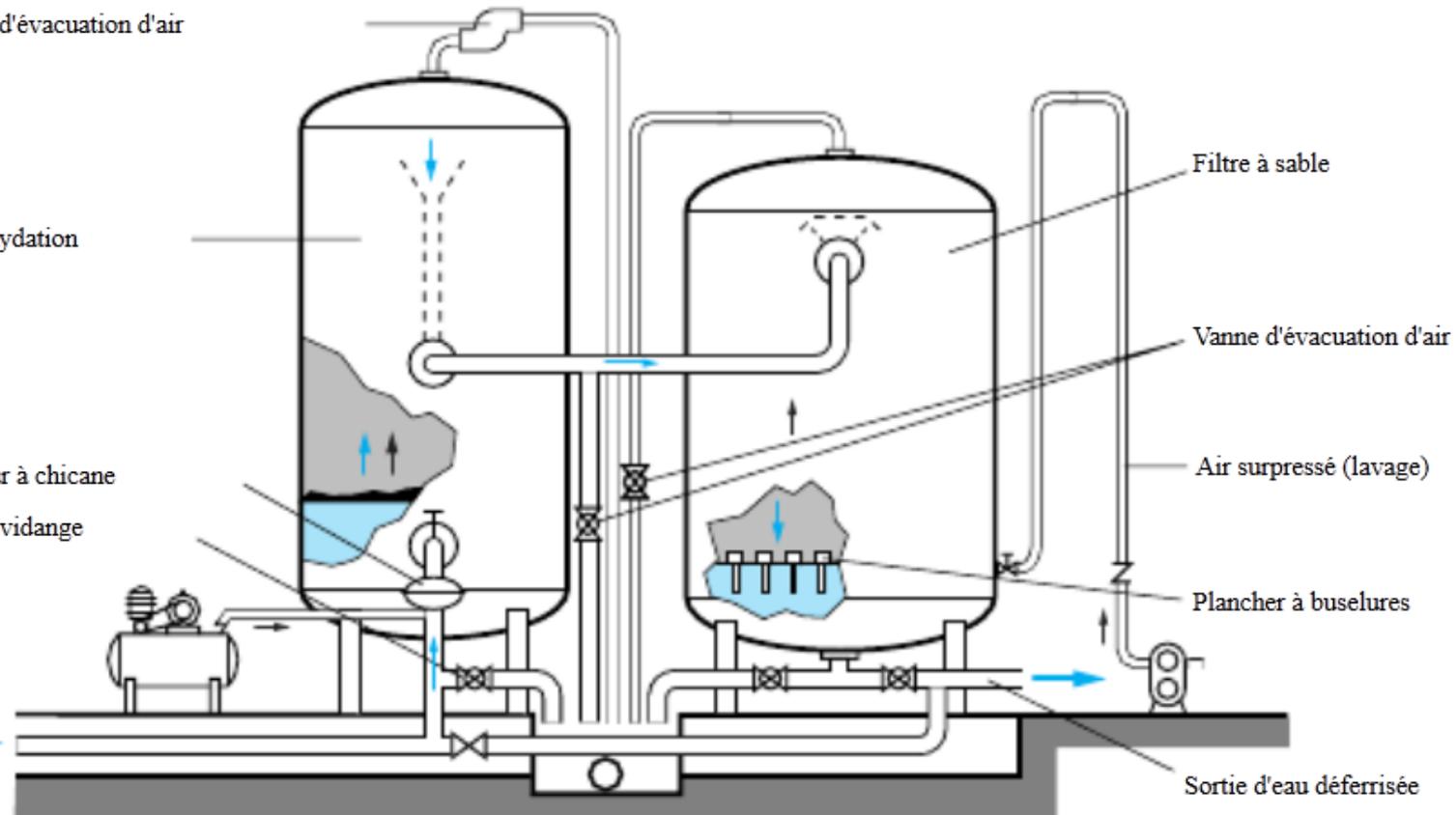
Soupape d'évacuation d'air

Tour d'oxydation

Mélangeur à chicane

Vanne de vidange

Arrivée
d'eau
brute



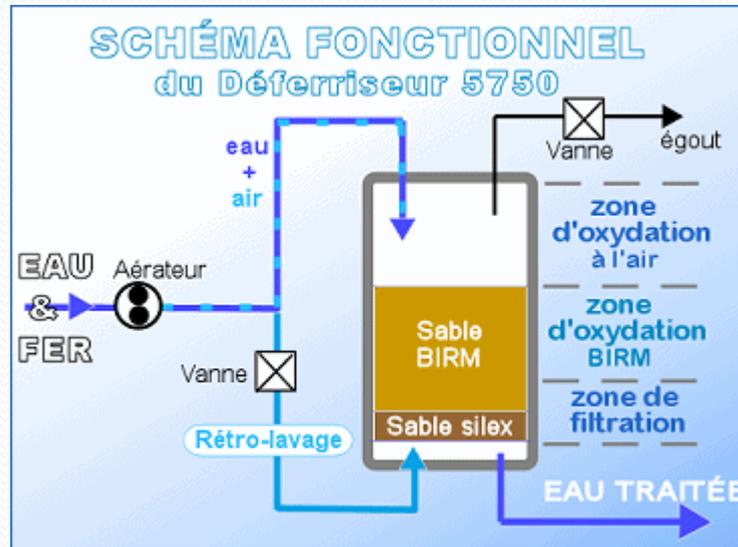
Station conventionnelle
de déferrisation sous pression

- *Filtration sur autres types de médias granulaires* : le principe de traitement consiste à oxyder le fer et le manganèse avec du chlore en présence d'un média catalytique à base d'oxyde de magnésium. L'oxydation du fer est rapide et souvent complète avant l'atteinte du média. L'oxydation du manganèse dissous est moins rapide que celle du fer. La partie dissoute résiduelle de manganèse s'adsorbe sur le média, ce qui lui permet d'être en contact avec le chlore durant une plus longue période. Le pouvoir catalytique du média réduit également le temps requis pour l'oxydation du manganèse par rapport au temps observé en eau libre.

Sable BIRM® déferrisant & démanganisant en sac



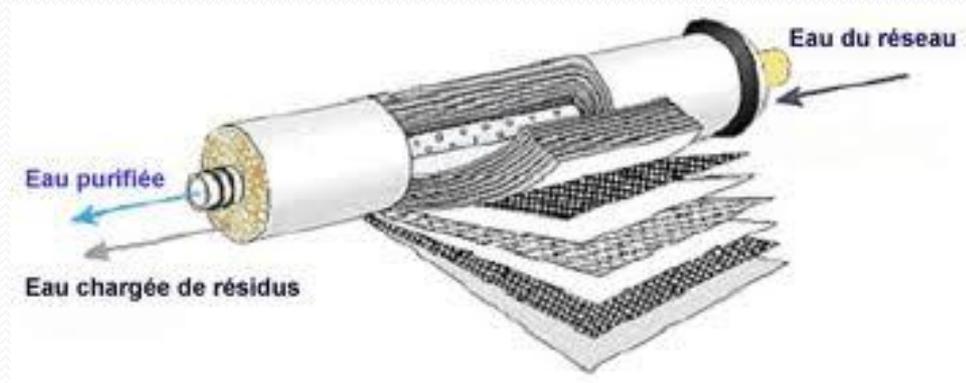
Certified to NSF/ANSI Standard 61



- *Filtration par membrane* : La filtration membranaire appliquée ici survient après l'oxydation complète du fer et du manganèse.



Technologie membranaire - déferrisation - osmose inverse

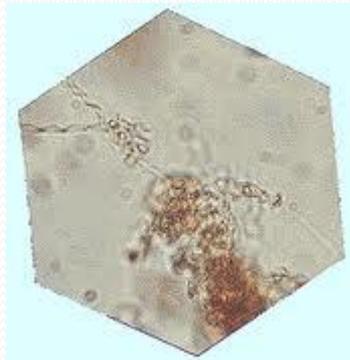


I.2.7.2- Déferrisation et/ou démanganisation par des procédés biologiques

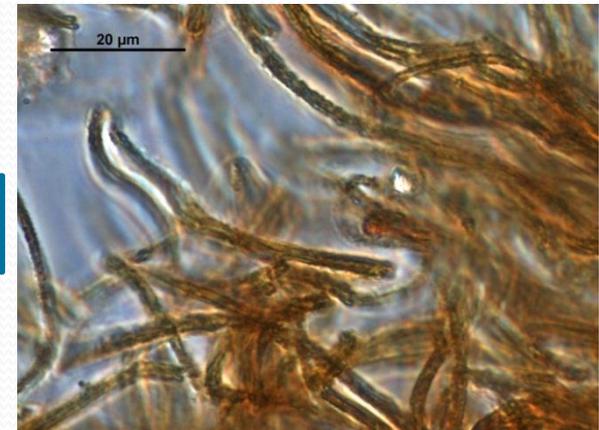
Le procédé de la déferrisation et démanganisation biologiques permet, dans de nombreux cas, de pallier aux problèmes que les procédés conventionnels ne peuvent résoudre. On a constaté que de nombreuses bactéries qui se trouvent naturellement dans la nature sont susceptibles d'oxyder le fer et le manganèse en formant un précipité plus compact et moins colmatant que les procédés d'oxydation conventionnels.

I.2.7.2.1- Description du procédé

Certains types de bactéries, communément appelées ferrobactéries et manganobactéries, dans des conditions ambiantes appropriées (pH, température et oxygène) peuvent accélérer l'oxydation du Fe (II) et du Mn (II) par leur action catalytique pour accumuler ensuite les produits d'oxydation sous une forme beaucoup moins colmatante pour les filtres. Ces bactéries demeurent fixées au matériau filtrant dans le système, même après un lavage à contre-courant, ce qui permet au système de fonctionner continuellement durant une période indéfinie.



Ferrobactéries



I.2.7.2.2 Champs d'application

Ce procédé permet de traiter des concentrations de fer et de manganèse relativement élevées. Cependant, pour une application judicieuse de la déferrisation et de la démanganisation biologiques, il faut tenir compte de certains paramètres qui peuvent être défavorables au développement des bactéries responsables du traitement, c'est-à-dire des concentrations importantes d'inhibiteurs de croissance bactérienne, à savoir :

- Présence de H₂S;
- Présence d'ammoniac;
- Présence de certains métaux lourds, comme le zinc;
- Présence de carbone organique total (COT);
- Conditions de pH et de potentiel d'oxydoréduction nécessitant un ajustement préalable.



La déferrisation et de la démanganisation biologiques

I.2.7.2.3 Critères de conception

Les critères de conception de la déferrisation et de la démanganisation biologiques sont similaires sauf en ce qui a trait aux conditions de pH optimal pour la croissance et l'activité des bactéries spécifiques. Les principaux critères à respecter sont les suivants :

- pH de 5 à 7,5 pour la déferrisation et de 7,5 et 8,5 pour la démanganisation biologique ;
- Vitesse de filtration de 15 m/h à 50 m/h, suivant les concentrations de Fe et de Mn dans l'eau brute ;
- Épaisseur du milieu filtrant : 1200 mm à 2000 mm;
- Taille effective du biolite : 0,95 mm à 1,35 mm

I.2.7.2.4 Autres éléments de conception

En plus des critères indiqués plus haut, les éléments suivants sont à considérer :

- Prévoir un système d'aération pour oxygéner l'eau;
- Prévoir un ensemble de lavage soit à l'eau brute, soit à l'eau traitée avec sa soufflante d'air de lavage;
- La vitesse d'eau de lavage est de 6 à 20 m/h (suivant la granulométrie du média) et celle de l'air de lavage de 50 à 60 m/h;
- Le principe de dimensionnement d'un procédé de déferrisation et/ou démanganisation biologique est basé sur les diagrammes de stabilité pH-oxydoréduction.

I.2.7.3- Déferrisation et/ou démanganisation par échange d'ions

Les résines échangeuses d'ions captent les ions présents dans l'eau brute pour les remplacer par du sodium.



Résines échangeuses d'ions

Démanganisation par échange d'ions



À l'instar des autres ions, le fer et le manganèse peuvent être retenus sur des résines échangeuses d'ions. Par contre, l'eau à traiter doit être exempte d'oxygène dissous et d'oxydants et les ions de fer et de manganèse doivent être bivalents. En respectant ces conditions, l'échange d'ions peut être efficace pour l'enlèvement du fer et du manganèse jusqu'à des valeurs élevées dans l'eau brute (>10 mg/L en fer et >2 mg/L en manganèse). Par contre, le volume de résine nécessaire à l'échange d'ions fait en sorte que ce type de procédé est surtout intéressant pour les petits systèmes et qu'il est difficile de le mettre en application pour les grandes usines de potabilisation de l'eau.

I.2.7.4- Déferrisation et/ou démanganisation par précipitation à la chaux

Le fer et le manganèse, sous forme dissoute dans l'eau brute, sont amenés à précipiter en ajoutant de la chaux qui vient modifier le pH de l'eau. Les ions de fer et de manganèse forment alors des précipités de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Mn}(\text{OH})_2$ respectivement. Ce procédé se combine bien avec l'adoucissement à la chaux.

Pour précipiter le fer et le manganèse par la chaux, il faut respecter les critères de conception suivants :

- pH minimal : 9,5 (entre 10,5 et 11 de façon usuelle)
- Dose de chaux (par mg/L de Fe ou de Mn) : 1 mg/L (CaO)
- Concentration de Fe et de Mn à l'eau brute : maximum combiné de 4 mg/L

I.2.8- Adoucissement

L'eau douce peut corroder les canalisations et certains métaux lourds comme le cuivre, le zinc, le plomb et le cadmium peuvent se retrouver dans l'eau du réseau de distribution. Dans les régions où l'eau est dure, les canalisations domestiques peuvent être colmatées par l'entartrage; les eaux dures entartrent également les ustensiles de cuisine et augmentent la consommation de savon



L'eau dure est donc à la fois un désagrément et un fardeau économique pour le consommateur. On prétend qu'une dureté comprise entre 80 et 100 mg/L de CaCO_3 assure un équilibre acceptable entre la corrosion et l'entartrage.



I.2.8.1- Adoucissement par précipitation chimique

L'objectif de ce type de traitement est d'éliminer par précipitation (en formant un composé insoluble) :

1. la dureté temporaire (liée au bicarbonate) à l'aide de la chaux;
2. la dureté permanente (liée aux sels d'acides forts) à l'aide d'une combinaison de chaux, de carbonate de sodium ou de soude caustique;
3. les ions métalliques indésirables comme le baryum ou le fer et le manganèse.

Les principaux réactifs chimiques utilisés dans le procédé de précipitation sont :

- La chaux;



- Le carbonate de sodium avec ou sans chaux;



- La soude caustique.



L'adoucissement par précipitation chimique permet de traiter des eaux excessivement dures sans ajout important d'ions de sodium dans l'eau. Il peut adoucir les eaux dont la dureté peut dépasser 500 mg/L en CaCO₃.

Les équipements requis pour la réalisation de ce traitement sont :

- Un mélange rapide : le bassin de mélange rapide doit avoir une rétention hydraulique de 2 min au débit de conception;
- Une décantation : un temps de rétention d'au moins une heure au débit de conception doit être prévu pour une bonne séparation

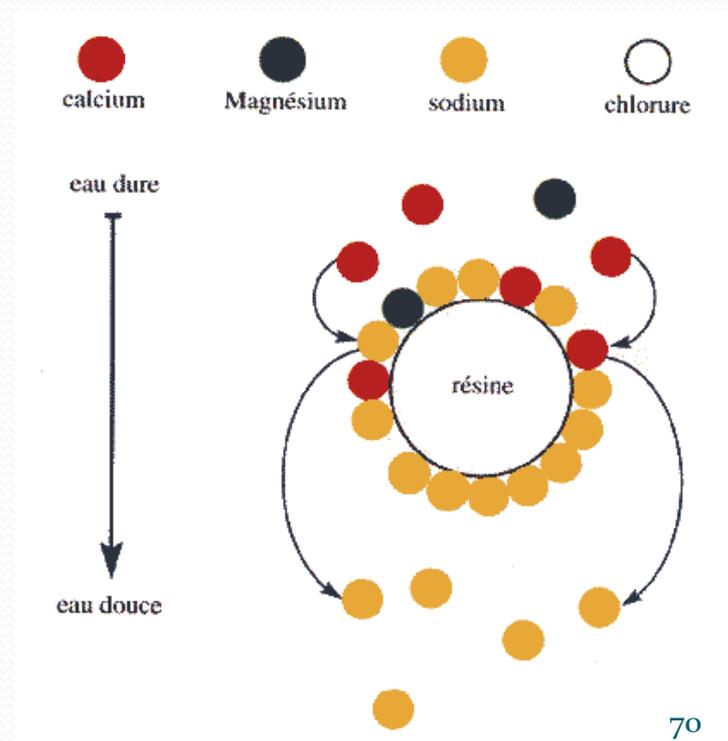
Les autres éléments de conception à considérer sont :

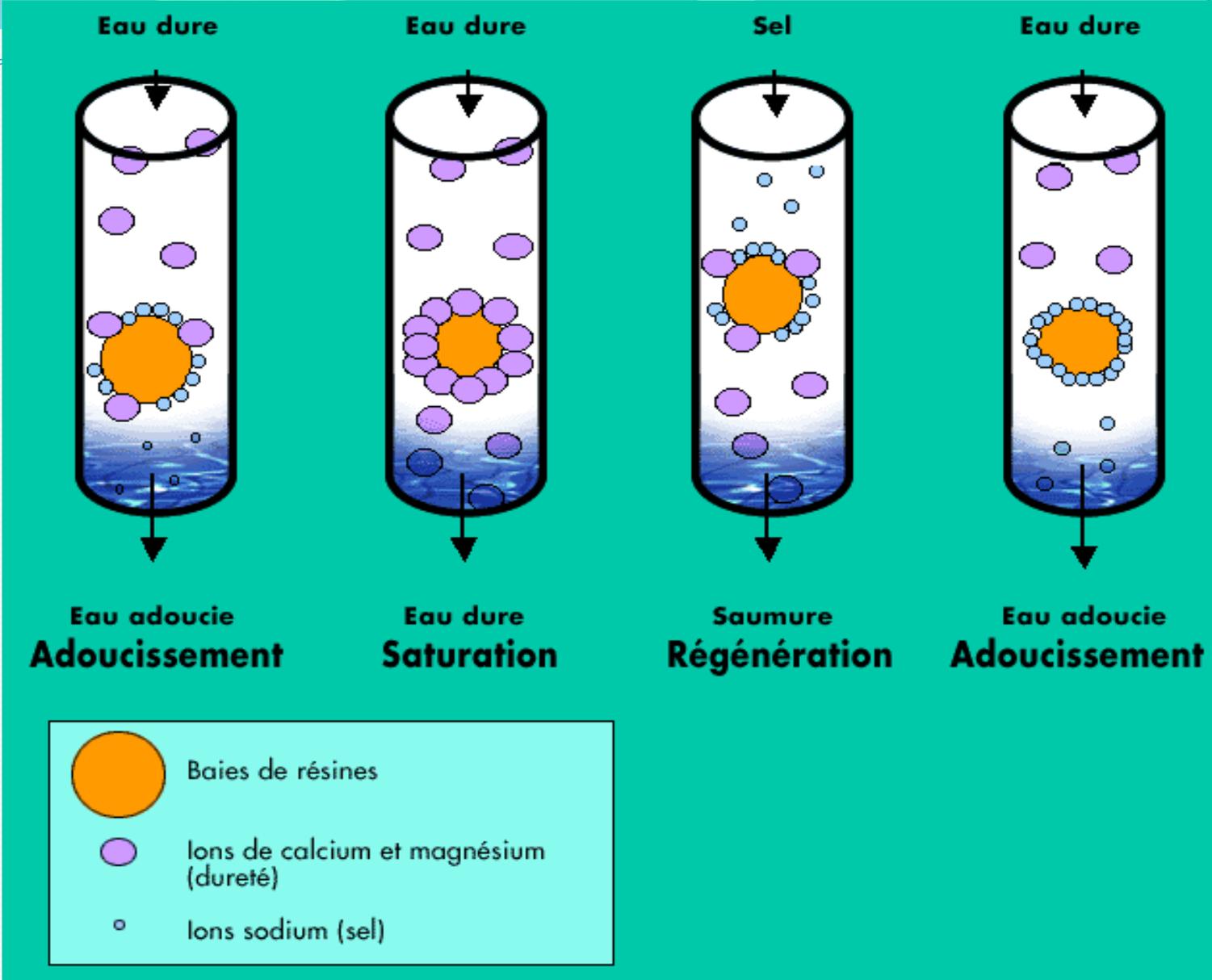
- La décantation est complétée par une filtration pour éliminer les floccs qui peuvent s'échapper du décanteur ainsi que pour réduire la turbidité dans l'eau traitée;
- Les boues produites auront une consistance variant de 5 à 30% (précipitation de l'alcalinité sous forme de carbonates et matières en suspension présentes dans l'eau à traiter);
- Les boues sont granuleuses et faciles à déshydrater;
- Des essais de traitabilité sont requis pour déterminer le ou les réactifs nécessaires au procédé, les doses requises et la vitesse de décantation des floccs formés.

I.2.8.2- Adoucissement par échange d'ions

I.2.8.2.1- Description du procédé

Les résines échangeuses d'ions captent les ions présents dans l'eau brute (dans l'ordre : radium, baryum, cuivre, calcium, zinc, fer, magnésium, potassium, manganèse) pour les remplacer par du sodium. La qualité minérale de l'eau doit être considérée dans l'adoucissement par échangeurs d'ions, étant donné que ce procédé ne réduit pas les solides totaux présents, mais ne substitue que des ions sodium aux ions présents. Après un certain temps, les résines doivent être régénérées afin de les libérer des ions captés pour les remplacer par le sodium.





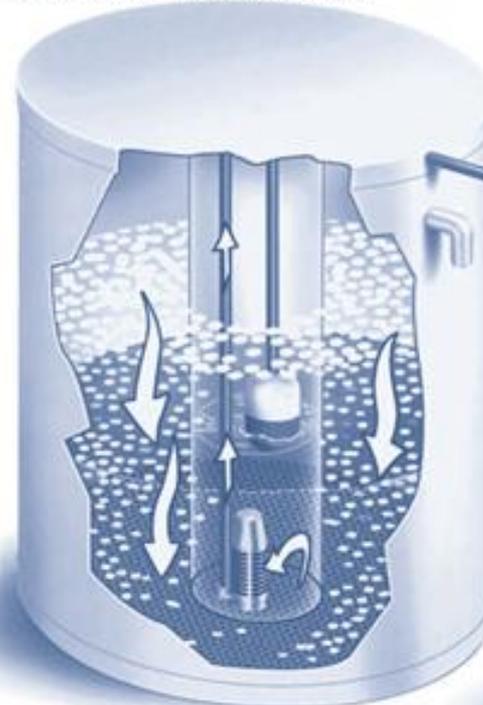
Fonctionnement d'un adoucisseur:

Eau "douce" sortante

Eau "dure" entrante

2

Pour débarrasser la résine des minéraux durs accumulés, une saumure est injectée sur le lit de résine dans l'adoucisseur



Bac à Saumure



L'eau "dure" passe sur la résine qui attire les ions calcium et magnésium.

Le temps que l'eau traverse la résine de haut en bas, elle devient "douce".

Adoucisseur

Fonctionnement d'un adoucisseur:

I.2.8.2.2- Champs d'application

Les échangeurs d'ions ne doivent pas être utilisés si la quantité de sodium présent à l'effluent de l'échangeur excède 200 mg/L. La présence de fer et de manganèse doit être surveillée avec attention. Une eau ayant une turbidité de 1 UTN et plus ne doit pas être appliquée directement aux résines. Les résines synthétiques à base de silicates doivent être utilisées pour des eaux dépourvues de fer et d'un pH supérieur à 8,4. Quand l'eau à adoucir contient du chlore résiduel, les résines devront être résistantes à l'action du chlore. Les résines à base phénolique ne doivent pas être utilisées.

Dans la pratique, l'adoucissement n'est pas appliqué à tout le débit d'eau à traiter. Afin d'obtenir une eau équilibrée, on mélange une partie de l'eau brute avec de l'eau adoucie. La proportion de l'eau brute qui subit l'adoucissement dépend de la dureté de l'eau brute : plus l'eau brute est dure, plus cette portion devient importante.

La pratique qui consiste à mélanger de l'eau traitée avec de l'eau brute doit être documentée et analysée à fond avant d'être appliquée.

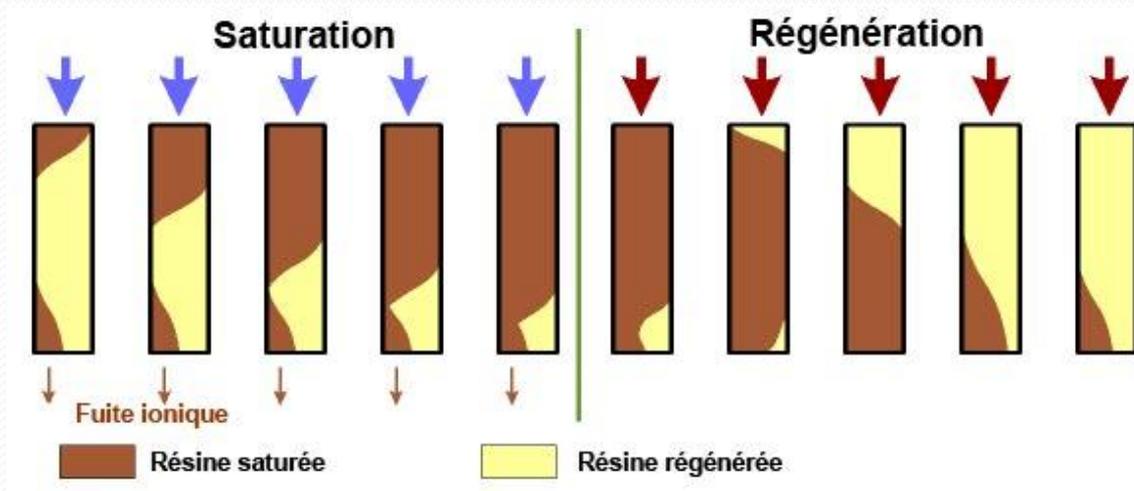


I.2.8.2.3- Critères de conception

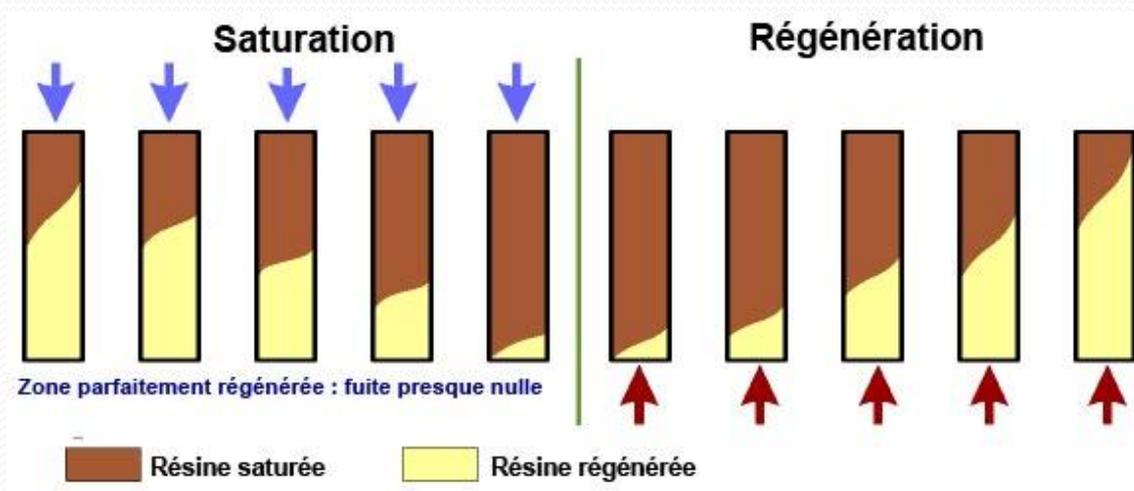
Les principaux critères de conception sont les suivants :

- La capacité d'échange ne doit pas excéder 45 mg/L en CaCO₃ de résine avec une régénération requise de 135 g de sel par 65 g de dureté éliminée;
- La hauteur du lit de résine doit être d'au moins 0,9 m et d'au plus 1,8 m;
- Dans les systèmes à co-courant, une hauteur totale de 30 cm constituée de plusieurs couches de gravier gradé d'une dimension de 0,3 à 2,5 cm est souhaitable pour supporter les résines d'échangeurs d'ions. Ce support n'est pas requis dans les adoucisseurs de type contre-courant à blocage mécanique ou les adoucisseurs munis de planchers à buselures;
- Le système de crépines posé au fond des unités doit permettre un drainage complet de l'unité de façon à s'assurer qu'aucune saumure ne sera présente après le rinçage;

Régénération à co-courant



Régénération à contre-courant



- La hauteur d'eau au-dessus des résines doit être de 30 à 100% de la hauteur du média selon sa densité et la direction de l'écoulement de l'eau par rapport à la solution de régénération (co-courant, contre-courant);
- Le système d'écoulement doit assurer une parfaite répartition de l'eau à travers toute la masse de résine. Pour les adoucisseurs à co-courant, le taux d'adoucissement à travers une unité ne doit pas dépasser 17 m/h. Dans le cas d'unités d'adoucissement à contre-courant et à blocage mécanique, cette vitesse sera inférieure à 50 m/h.

I.2.8.2.3 Autres éléments de conception

Pour les échangeurs d'ions, il faut aussi considérer les éléments suivants :

- L'équipement nécessaire à la distribution de la saumure doit être prévu. La distribution doit être effectuée de manière uniforme sur toute la surface de l'adoucisseur (ascendant ou descendant). Les conduites de décharge de l'air, de l'eau de lavage et de rinçage doivent être installées de sorte qu'il n'y ait aucune possibilité de siphon.

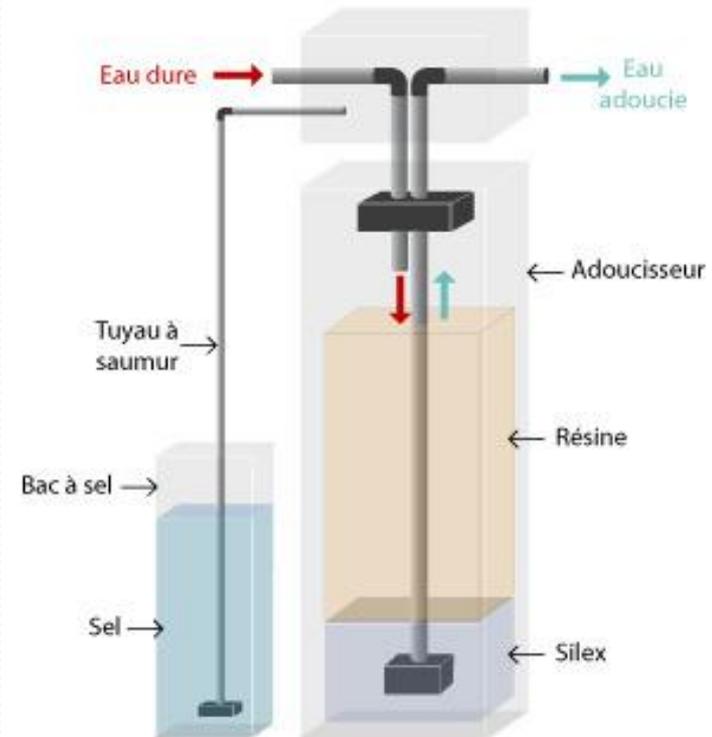
Un débitmètre, pour mesurer le débit de la saumure, doit être installé sur chaque adoucisseur;



- Une conduite de dérivation est requise pour chaque unité d'adoucissement. Un dispositif automatique de régulation ou de proportionnalité et une valve de sécurité doivent être prévus sur cette conduite;



- Les réservoirs d'emmagasinement de sel mouillé doivent être recouverts et équipés de regards ou d'écoutilles à rebords surélevés munies d'un couvercle étanche;
- Ces réservoirs doivent avoir une capacité suffisante pour emmagasiner 1,5 fois la charge d'une livraison de sel pour permettre le remplissage avant que le réservoir ne soit vide:

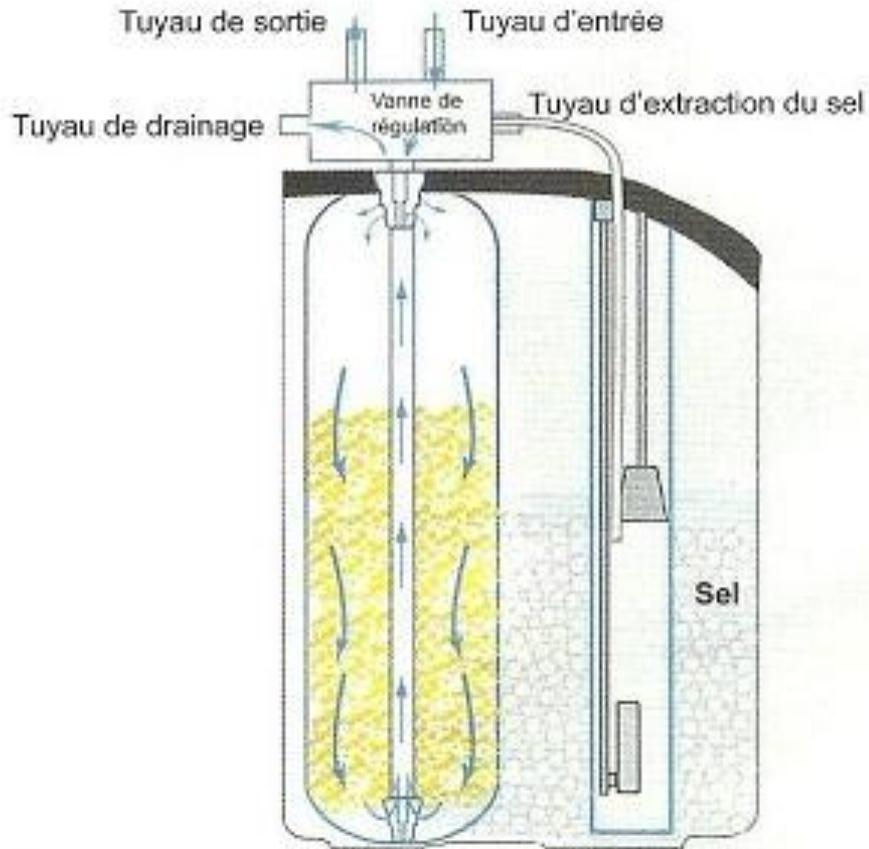


- L'eau de remplissage du réservoir doit être distribuée sur toute la surface du bassin par des conduites dont l'entrée est aménagée au-dessus du niveau maximum de la saumure. Le sel doit être installé sur des couches de gravier de support au-dessous desquelles sera installé l'équipement adéquat de collecte de la solution de saumure. La provision de sel doit être prévue pour une période d'au moins un mois soit par un réservoir de sel mouillé ou par un emmagasinage à sec;

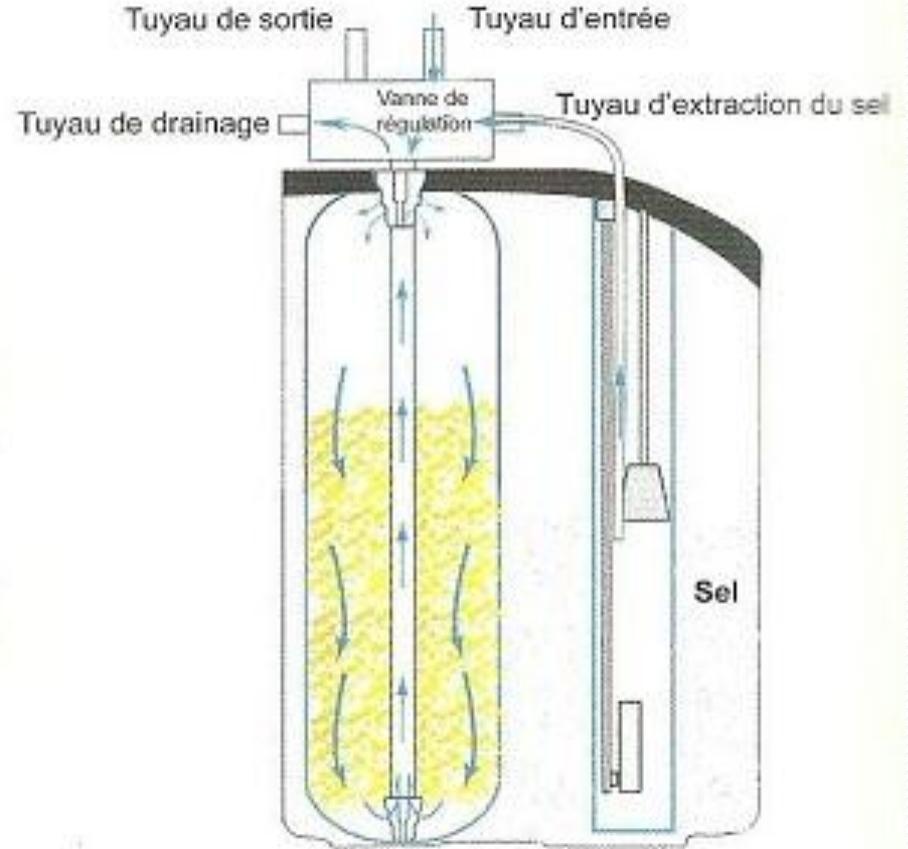


- Si des conduites de trop-plein sont prévues, elles doivent être en forme de bec de cygne à la sortie, avoir une décharge à l'air libre et être protégées par des grilles ou des clapets non corrosifs;
- Toutes les conduites et les matériaux en contact avec le sel doivent y être résistants. Les réservoirs d'emmagasinement de sel et les équipements de dosage doivent être isolés et protégés des autres aires opérationnelles;
- La nécessité d'un traitement complémentaire subséquent doit être déterminée. Une stabilisation pour le contrôle de la corrosion, dans certains cas, doit être prévue;

SERVICE



REGENERATION



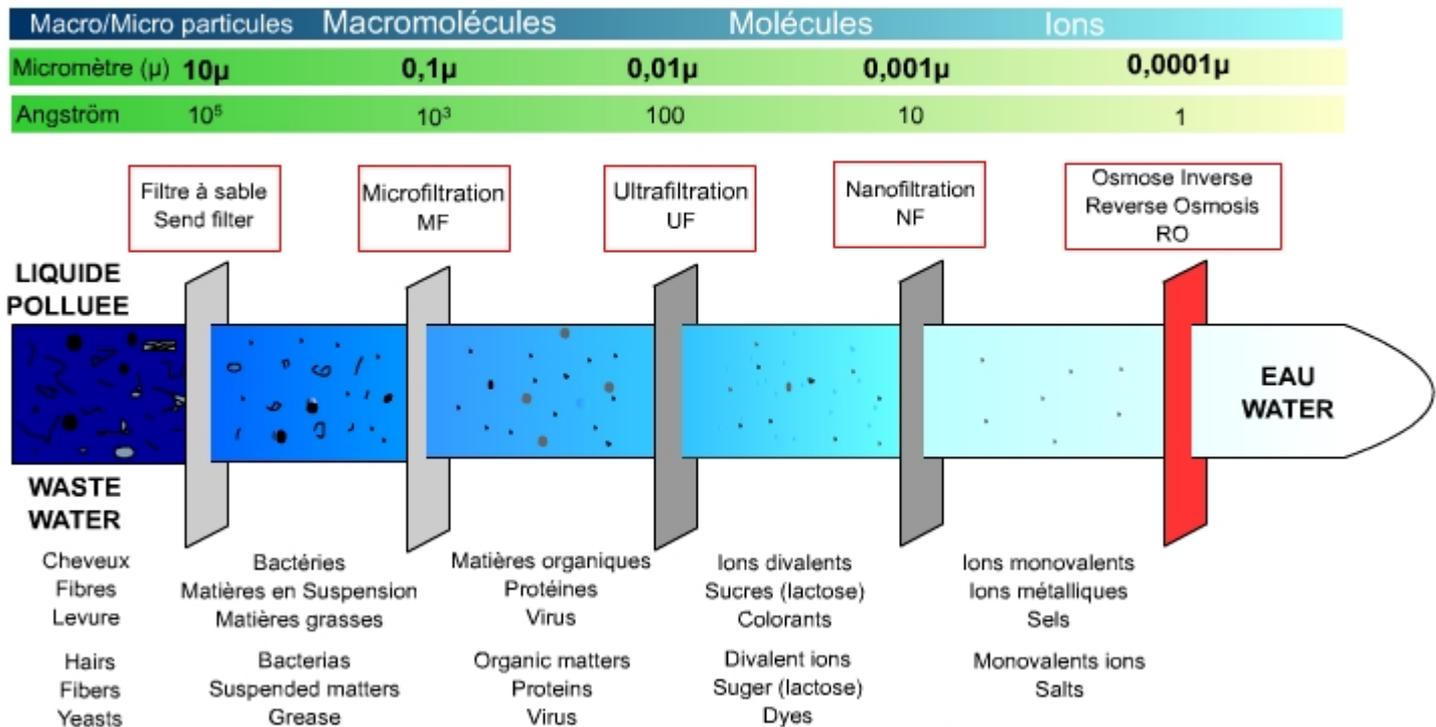
- Quand le sel fourni est de qualité inférieure ou que la manipulation soulève des doutes, une désinfection de la saumure ou de l'eau adoucie est requise;
- Des prises d'échantillonnage doivent être prévues pour la collecte d'échantillons représentatifs d'analyse bactériologique et physico-chimique de l'eau;
- Des essais de traitabilité sont utiles pour déterminer la performance du système, établir les caractéristiques de l'eau traitée avant et après le mélange selon le cas, déterminer les caractéristiques du rejet en vue de son traitement et vérifier les conditions d'opération.

I.2.8.3- Adoucissement par membrane

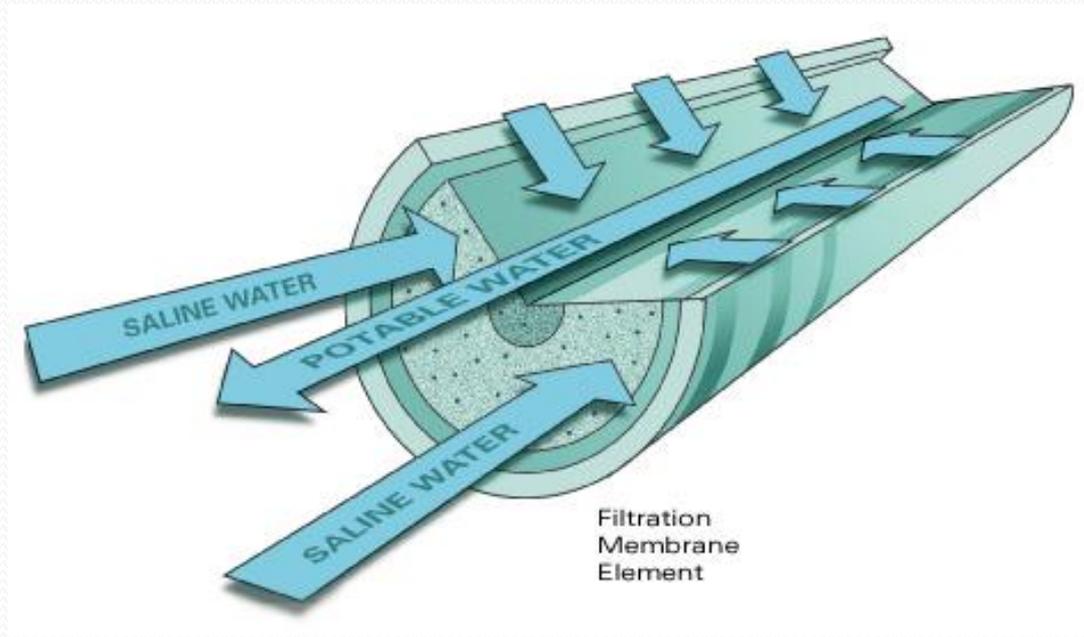
I.2.8.3.1- Description du procédé

Une membrane est une très mince couche de matière qui permet, sous l'action d'une force motrice, de faire une séparation à l'échelle microscopique.

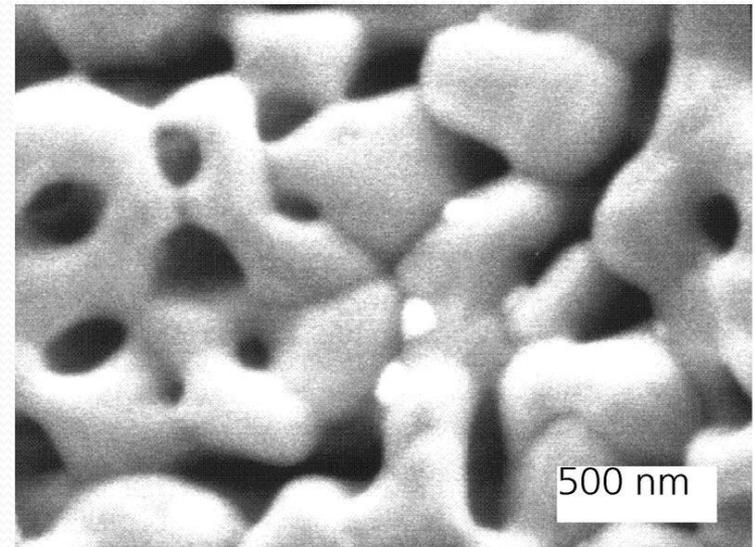
Polluants éliminés par Filtration Membranaire



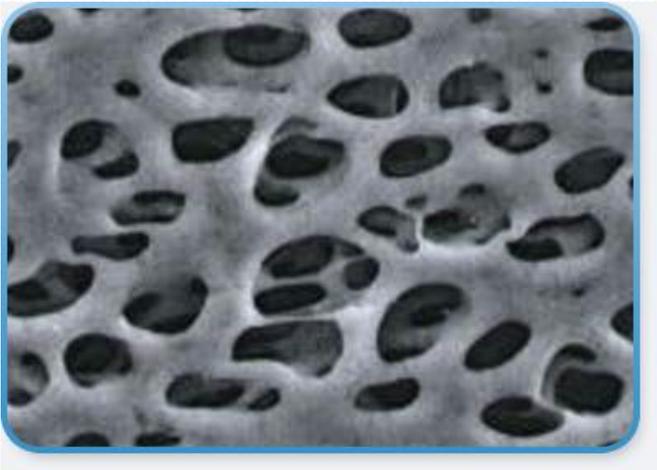
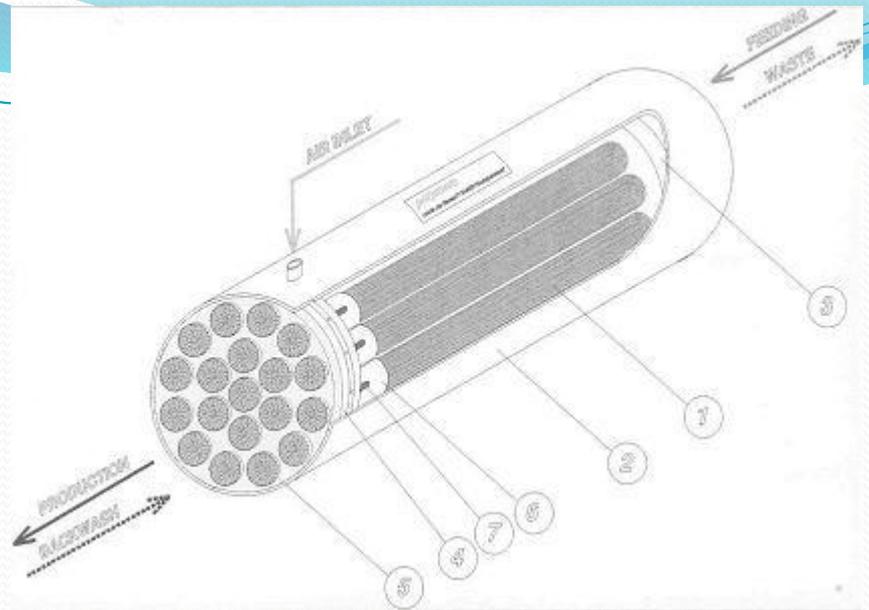
La force motrice peut être une différence de pression, de potentiel électrique ou de concentration de part et d'autre de la membrane. Les procédés principalement utilisés pour produire de l'eau potable sont généralement classés suivant 4 catégories:



- microfiltration (MF),



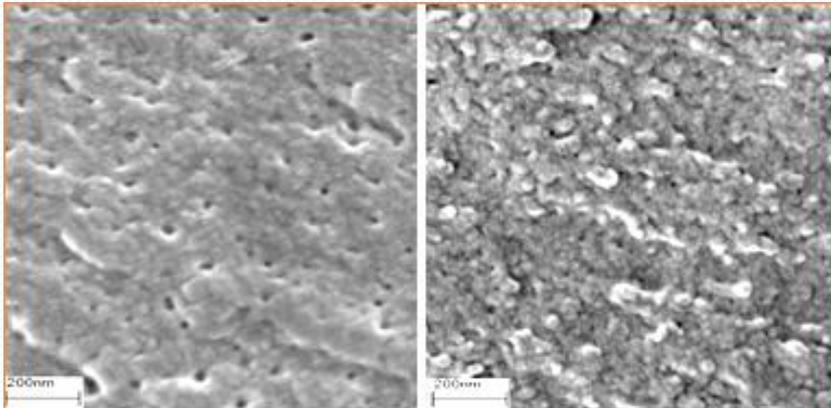
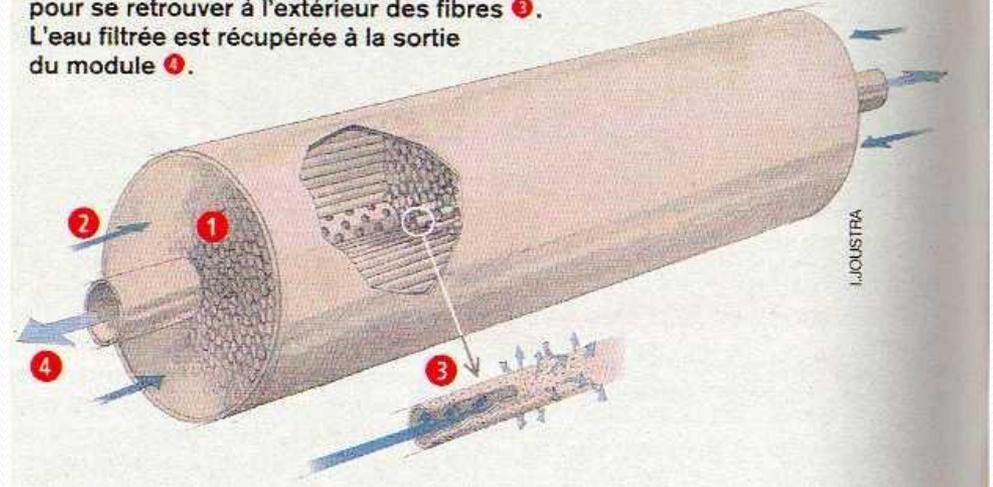
- ultrafiltration (UF),



- nanofiltration (NF)

Des milliers de fibres creuses

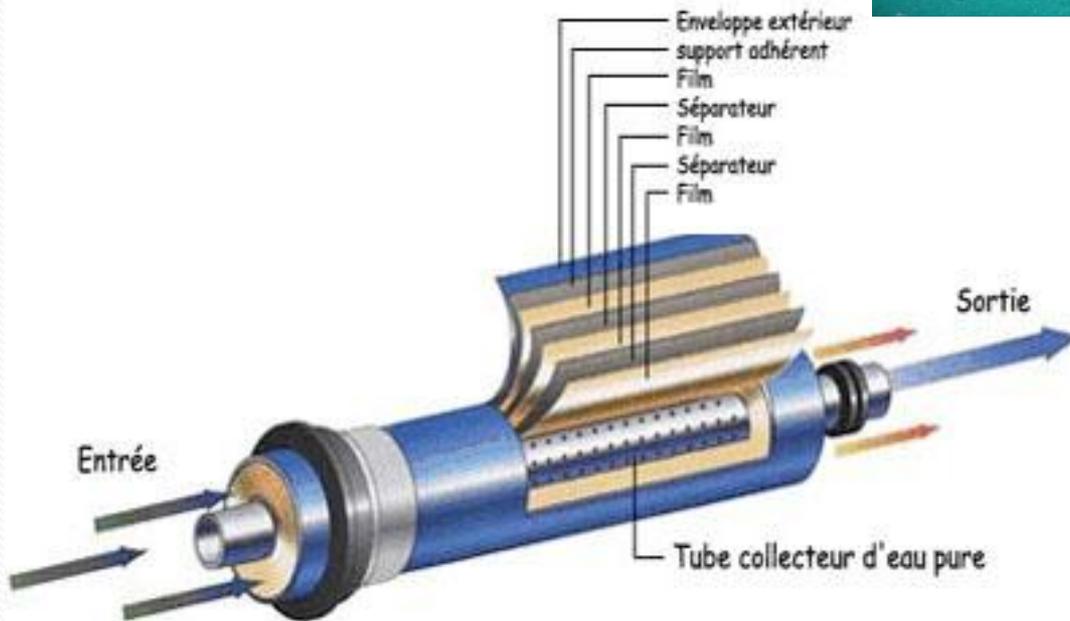
Un module de filtration est constitué d'un faisceau de milliers de fibres creuses ①. L'eau sous pression pénètre à l'intérieur de ces fibres ②. Elle traverse leur membrane criblée de pores minuscules pour se retrouver à l'extérieur des fibres ③. L'eau filtrée est récupérée à la sortie du module ④.

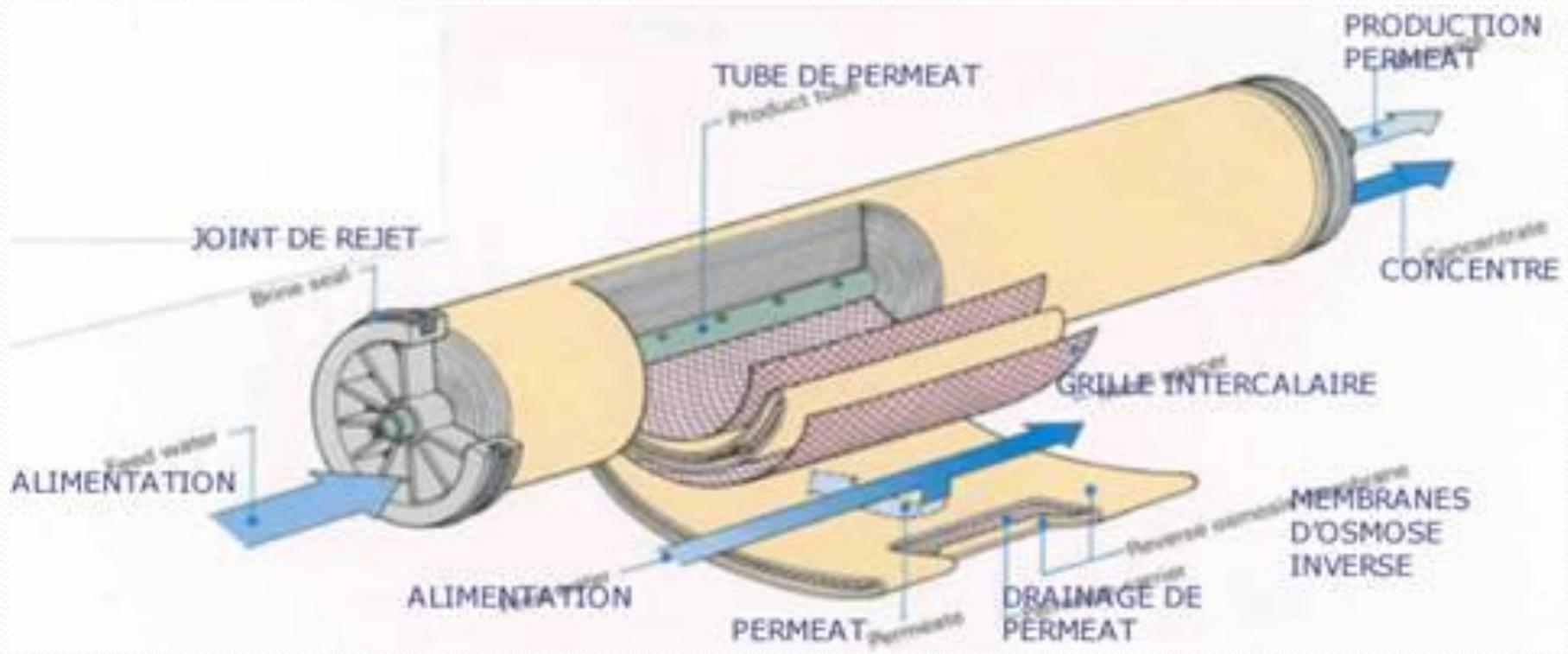


Images de SEM caractéristiques de membranes nanoporeuses à base de polycyanurate



- osmose inverse (OI).





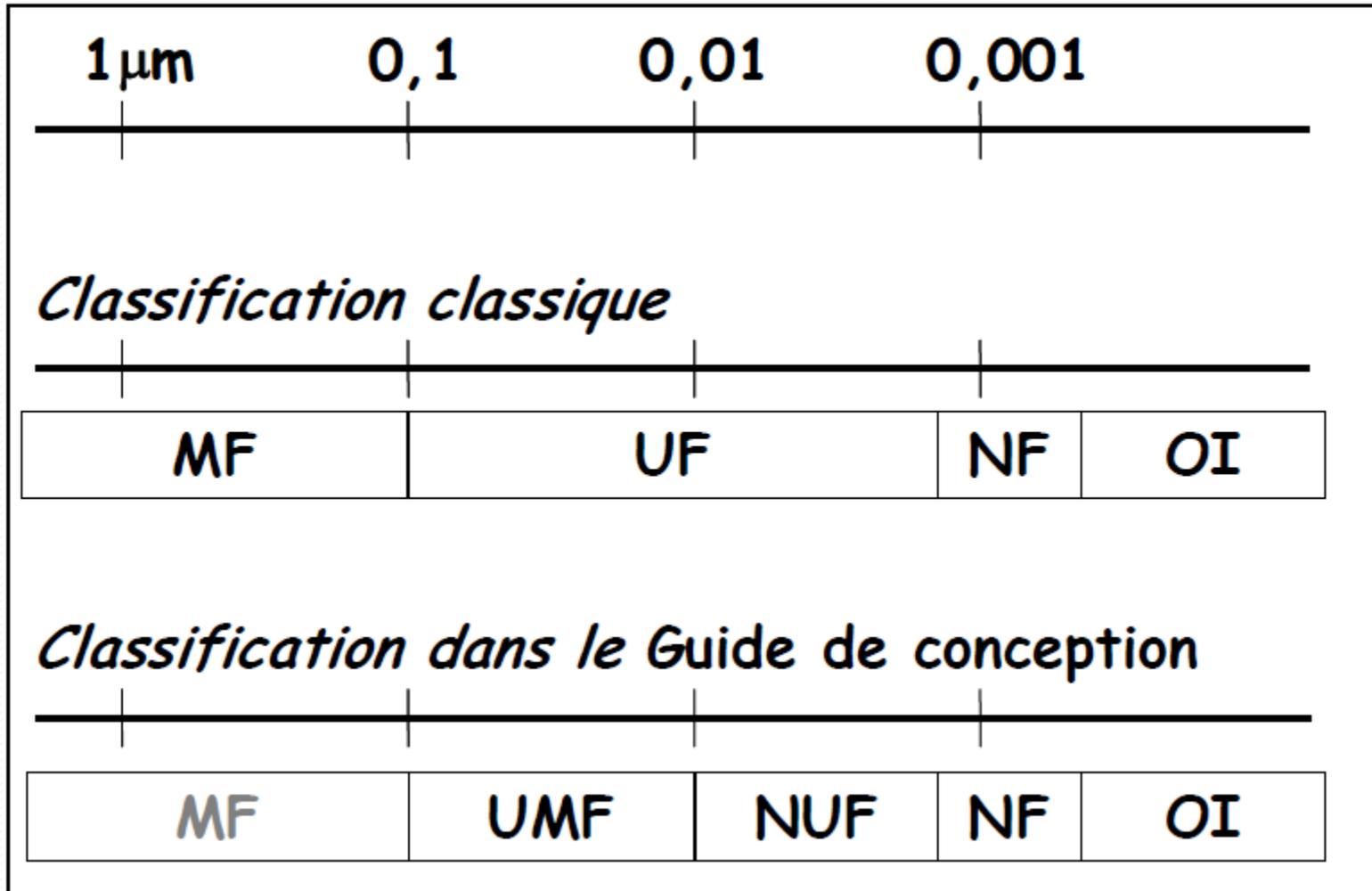
Le pouvoir de séparation d'une membrane dépend de sa structure poreuse et de la nature du matériau membranaire. Les ordres de grandeur des tailles des pores des membranes d'OI, de NF, d'UF et de MF sont présentés au tableau 5.

Tableau 5 Quelques propriétés des membranes

Propriété	MF	UF	NF	OI
Taille des pores (couche superficielle)	0,05 à quelques μm	quelques nm à 100 nm	~ 1 nm	< 1 nm ^(a)
Perméabilité à l'eau déminéralisée à 25°C ($\text{m s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)	10^{-8} à 10^{-9}	10^{-9} à 10^{-10}	$\sim 10^{-11}$	10^{-11} à 10^{-12}

^(a) La notion de pores dans le domaine de l'OI est difficile à définir, ce qui explique pourquoi certains auteurs considèrent ces membranes comme non poreuses.

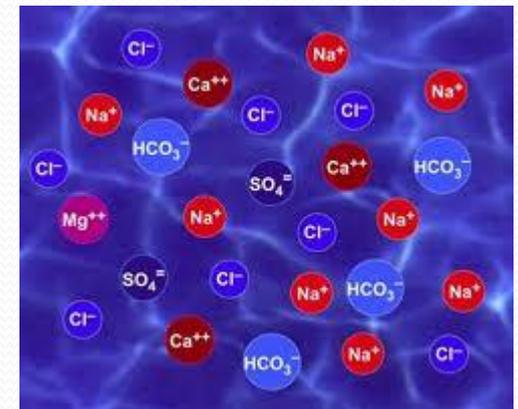
Classification des membranes



I.2.8.2.2- Champs d'application

La filtration membranaire est une excellente façon d'adoucir l'eau. Les membranes de NF permettent une séparation élevée des ions divalents (calcium et magnésium) tandis que les membranes de NUF ne réalisent qu'une séparation plus faible de ces ions. Il est courant de voir un système de NF ne traiter qu'une partie de l'eau et réduire ainsi considérablement la dureté. L'eau filtrée mélangée avec l'eau brute permet alors d'obtenir une dureté plus acceptable. La proportion filtrée dépend de la dureté de l'eau brute.

Ions divalents



I.2.9- Enlèvement des nitrates

La présence de nitrates dans l'eau potable peut avoir un impact sur la santé des nourrissons de moins de trois mois et, dans une moindre mesure, sur les adultes consommant de l'eau potable contenant une quantité appréciable de nitrates. C'est pourquoi la norme quant à la teneur dans l'eau potable de ce produit a été fixée à 10 mg/L.



I.2.9.1 - Enlèvement des nitrates par échangeurs d'ions

I.2.9.1.1 Description du procédé

Il existe des résines anioniques qui ont une affinité sélective pour les ions nitrates. Toutefois, elles ne sont pas spécifiques au seul ion nitrate et la présence d'autres anions influence sa sélectivité (sulfates, chlorures, bicarbonates, etc.). Les résines anioniques remplacent les ions nitrates par des ions chlorures.

I.2.9.1.2 Champs d'application

L'échange d'ions est le moyen le plus efficace et le plus économique pour l'enlèvement des nitrates. La capacité de la résine et la période d'intervalle entre deux régénérations dépendent de la qualité de l'eau à traiter, plus spécifiquement de la quantité de nitrates à enlever, de la quantité de chlorures déjà présents dans l'eau brute et de la présence de sulfates qui ont une affinité plus grande que les nitrates avec les résines anioniques.

I.2.9.1.3 Critères de conception

Les principaux critères de conception sont les suivants :

- La vitesse de filtration est de 5 à 40 m³/h d'eau par m³ de résine;
- L'épaisseur de média dans le filtre est d'au minimum 700 mm et inférieure à 1,8 m;
- La régénération peut se faire soit à co-courant, soit à contre-courant. À la fin de la régénération, la résine doit être bien rincée à raison de 10 à 15 volumes d'eau par volume de résine;
- La régénération se fait au moyen d'une solution de chlorure de sodium (NaCl) à une concentration de 5 à 10% à raison de 125 à 250 g de NaCl par litre de résine.

I.2.9.2 - Enlèvement des nitrates par membranes

L'enlèvement des nitrates par filtration membranaire n'est possible que par OI. Le taux d'enlèvement des nitrates par OI est supérieur à 90%, ce qui est similaire à l'enlèvement d'autres anions tels que les sulfates et les chlorures.

I.2.9.3 - Enlèvement des nitrates par procédés biologiques

La dénitrification biologique des nitrates demande l'utilisation de micro-organismes particuliers qui peuvent réduire les nitrates en azote gazeux. Ces organismes hétérotrophes exigent la présence d'une source d'énergie organique et, étant donné que le carbone organique se trouve souvent en faible quantité dans les eaux souterraines, il est nécessaire d'ajouter une base organique dans l'eau à traiter (éthanol, méthanol ou acide acétique). Un ajout de phosphate peut aussi être nécessaire.

L'enlèvement biologique des nitrates convient bien au traitement des eaux usées et son utilisation pour le traitement de l'eau potable s'est développée surtout en Europe. L'ajout d'une étape d'aération nécessaire à l'évacuation de l'azote gazeux, l'ajout d'une source de carbone dans l'eau brute, la nécessité de désinfecter due à la présence des micro-organismes et le risque potentiel de créer ainsi des sous-produits de désinfection sont autant d'éléments qui freinent le développement de ce procédé. Il faut de plus éliminer le surplus de carbone organique à l'effluent des filtres. Habituellement, il faut prévoir un filtre à charbon actif à cette fin.

I.2.10- Enlèvement des sulfures

Des concentrations excessives de sulfure donnent à l'eau potable un goût et une odeur désagréables (œufs pourris). Bien que l'ingestion orale de grandes quantités de sulfure puisse avoir des effets toxiques pour l'être humain, il est peu probable qu'une personne puisse consommer une dose nuisible de sulfure d'hydrogène en raison du goût et de l'odeur désagréables qu'il donne à l'eau potable.



De plus, ce composé est à l'origine de sévères problèmes de corrosion dans les réseaux de distribution. On estime que le seuil du goût et de l'odeur du sulfure d'hydrogène dans les solutions aqueuses varie de 0,05 à 0,104 mg/l. En conséquence, on a fixé pour le sulfure (sous forme de sulfure d'hydrogène) dans l'eau potable un objectif de qualité esthétique ou organoleptique de $\leq 0,05$ mg/l.



L'enlèvement des sulfures peut se faire :

- i. par aération : il s'agit d'une désorption du H_2S dissous dans l'eau. Les équipements utilisés sont des tours d'aération soit par masse de contact ou plateaux, soit par cascades ou encore par pulvérisation. Le rendement d'élimination, sur une tour calculée en désorption, varie de 95 à 99%.
- ii. Par précipitation : Les sels de fer (sulfate ferreux, sulfate ferrique ou chlorure ferrique) permettent de former un précipité de sulfure de fer. Cependant, le floc formé s'épaissit et se déshydrate mal.

- iii. Par adsorption sur charbon actif catalytique : l'action catalytique du charbon imprégné permet de retenir les sulfures. Ce type de charbon s'utilise en général dans des filtres sous pression. L'eau à traiter doit contenir une concentration minimale d'oxygène dissous de 4 mg/L, ce qui oblige donc à prévoir une préaération. Le taux de filtration est d'environ 25 volumes d'eau par volume de matériau filtrant à l'heure.

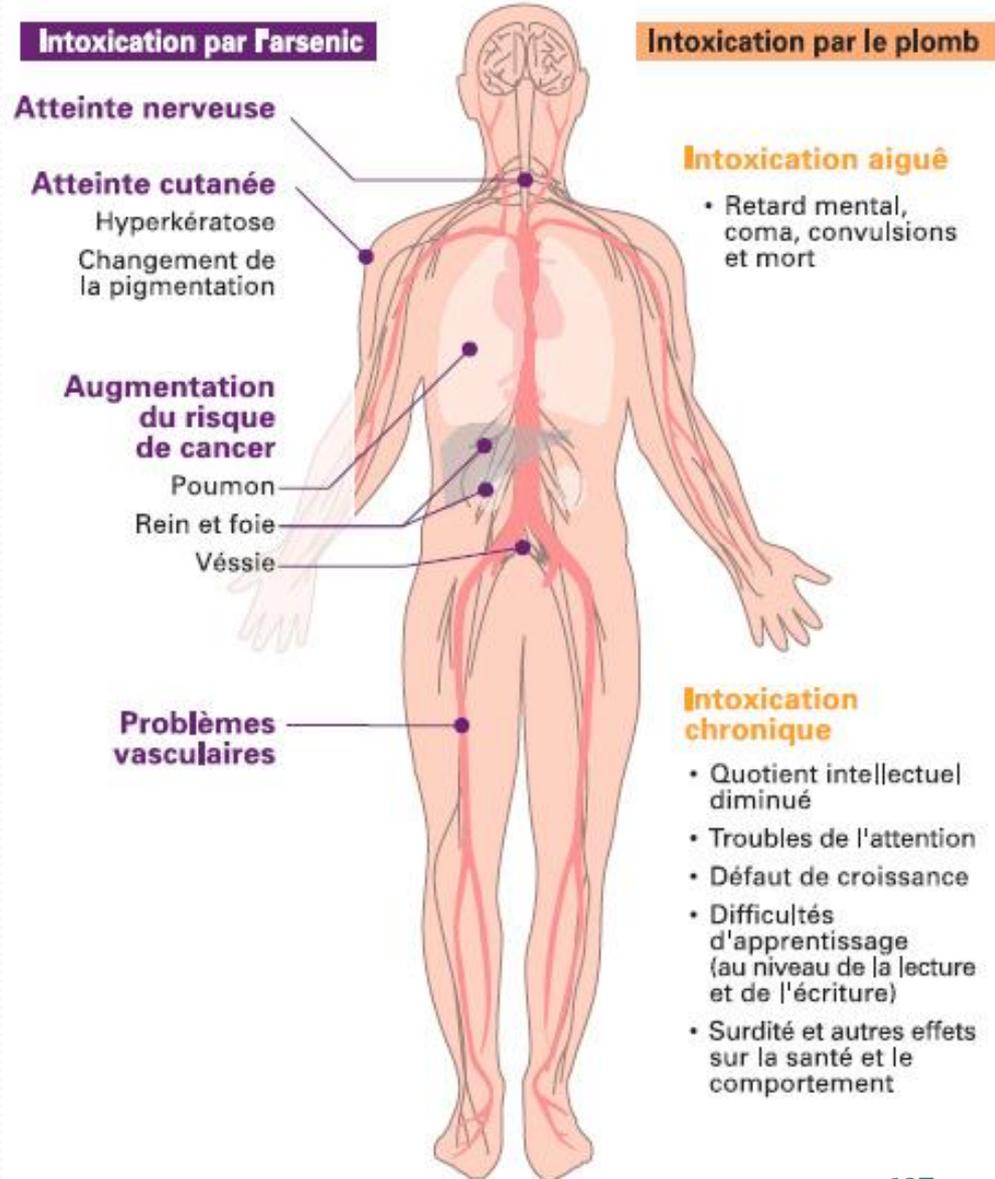
- iv. Par filtres à sable vert ou à média spécifique : les filtres doivent être régénérés périodiquement. Dans le cas du sable vert, il faut compter une dose triple de celle requise pour retenir le fer, soit 3 mg de KMnO_4 par mg de S^{2-} .



v. Par oxydation et filtration : le chlore, le permanganate de potassium ou l'ozone sont des oxydants forts qui peuvent être utilisés pour l'élimination du H_2S . Toutefois, plusieurs paramètres influencent leur utilisation, dont le pH, la température et l'oxygène dissous dans l'eau.

I.2.11- Enlèvement de l'arsenic

L'arsenic est un produit reconnu pour être cancérigène pour les humains. Actuellement, la norme est de 25 µg/L, ce qui correspond, pour une personne consommant quotidiennement 1.5 litre d'eau potable contenant plus de 25 µg/L, à un risque d'environ un sur un million de développer un cancer au cours de sa vie.



Par ailleurs, si un système doit être conçu pour l'élimination de l'arsenic, il devrait viser l'élimination la plus complète possible de ce produit.

Les meilleurs procédés disponibles sont décrits dans les sections suivantes.



Hyperkeratose due à un empoisonnement à l'arsenic en Chine. Source : Health Impacts of Coal, Robert B. Finkelman, US Geological Survey, 2003

L'enlèvement l'arsenic peut se faire :

- i. Par oxydation et filtration : La forme oxydée (arséniate, As V) est plus facile à précipiter. Il faut donc oxyder la forme réduite (arsénite, As III) et, pour ce faire, plusieurs oxydants sont utilisables tels que le chlore, l'ozone et le permanganate de potassium. Une fois oxydé, l'arséniate pourra être éliminé par précipitation. L'élimination de l'arsenic par les procédés d'oxydation est réalisée par adsorption ou par coprécipitation avec les oxydes de fer et de manganèse. Les filtres à sable vert permettent aussi un abattement de la concentration d'arsenic dans les eaux à traiter.

- ii. Par coagulation, floculation et filtration : Une fois oxydé, l'arséniate peut être éliminé par précipitation et décantation en utilisant un sel d'aluminium ou de fer comme coagulant, ce dernier étant plus performant et pouvant atteindre des rendements de 80 à 90% d'enlèvement. Le taux de décantation devra être inférieur à 2 m/h. Des essais de traitabilité permettront d'ajuster la dose de coagulant à utiliser.

- iii. Par adoucissement à la chaux ou à la magnésie : La coprécipitation de l'arsenic avec la chaux, à un pH supérieur à 10,5, donne un rendement d'élimination supérieur à 95%. La magnésie $[Mg(OH)_2]$ donne aussi d'excellents résultats. Le traitement doit être complété d'une décantation et d'une filtration sur filtre bicouche.

- iv. Par adsorption sur alumine activée : L'alumine activée peut être utilisée en lits filtrants pour éliminer l'arsenic (III) ainsi que le fluor, le sélénium, la silice et les substances humiques. Elle est composée de grains de 0,3 à 0,6 mm de diamètre de Al_2O_3 . Sa surface spécifique varie de 150 et 400 g/m^2 . L'alumine activée en lits peut traiter de l'eau souterraine contenant des concentrations d'arsenic d'environ 100 $\mu g/L$. Le pH optimum étant de 5 ou 6, il est souvent nécessaire d'abaisser le pH de l'eau brute et/ou de l'alumine activée.
- v. Par échange d'ions : L'enlèvement de l'arsenic par échange d'ions avec une résine anionique est un choix judicieux, surtout lorsque la teneur en matières dissoutes est inférieure à 500 mg/L et que la teneur en sulfate est inférieure à 150 mg/L .

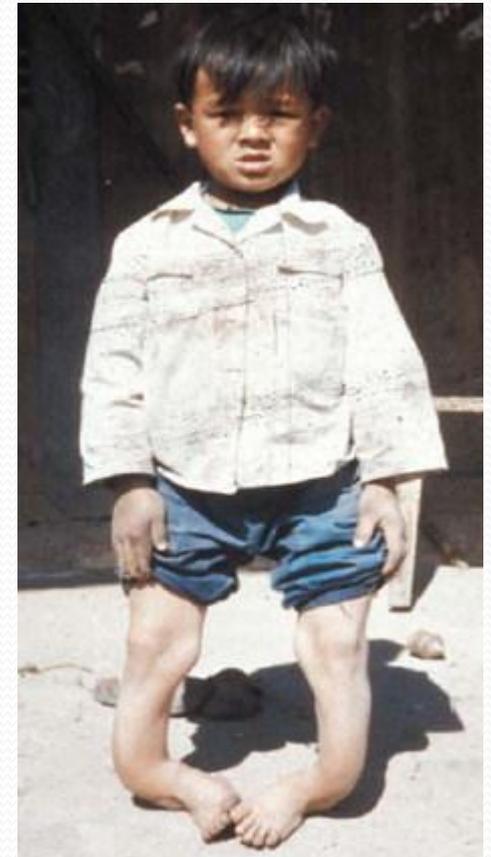
I.2.12- Enlèvement du fluorure

La présence de fluorure dans l'eau potable en trop grande quantité peut avoir des effets nocifs sur le développement et la santé des os. C'est pourquoi la recommandation concernant ce produit se situe à 1,5 mg/L et que l'ajout de fluorure dans l'eau potable ne dépasse pas 1,0 mg/L. Par contre, lorsque l'eau brute contient plus de 1,5 mg/L de fluorure, on doit chercher à l'éliminer.



Déformation osseuse due à un empoisonnement chronique au fluor en Chine. Source : Health Impacts of Coal, Robert B. Finkelman, US Geological Survey, 2003

Effet combiné d'une déficience en vitamine D et d'un empoisonnement chronique au fluor sur un enfant en Chine. Source : Health Impacts of Coal, Robert B. Finkelman, US Geological Survey, 2003



L'enlèvement du fluorure peut se faire :

- i. Par adsorption sur alumine activée : Pour ce type d'application, l'alumine activée est un produit granulaire de 0,3 mm utilisé en filtration. La vitesse de filtration sera fonction de la concentration de fluor à éliminer, à raison de 6 à 20 m/h pour des concentrations de 15 à 5 mg/L, respectivement. L'épaisseur de la couche de média sera de 1,5 m. Le produit épuisé sera régénéré à la soude caustique à 10 g/L à une vitesse de 5 m/h. Les eaux de régénération devront être récupérées séparément pour un traitement ultérieur par neutralisation.

ii. Par précipitation à la chaux : Par l'addition d'une dose importante de chaux, il est possible de réduire la teneur en fluorure de l'eau brute. Par contre, l'ajout de magnésie [$\text{Mg}(\text{OH})_2$] améliore le rendement. L'ajout d'un coagulant peut s'avérer nécessaire pour clarifier l'eau traitée. Dans ce type de procédé, les doses de réactifs sont importantes. À titre d'exemple seulement, on doit précipiter 130 mg de magnésium pour éliminer de 4 à 5 mg de fluorure. Le traitement peut se réaliser dans des décanteurs, et doit être complété par une filtration.

I.2.13- Enlèvement des chlorures

L'effet des chlorures est strictement esthétique et pratique. En quantité élevée, il donne un goût désagréable à l'eau et peut provoquer un accroissement de la corrosion des conduites. C'est pourquoi la recommandation concernant ce produit est de 250 mg/L.

Le seul traitement efficace pour l'enlèvement des chlorures est l'osmose inverse et l'enlèvement optimal est obtenu en ajoutant du charbon actif granulaire avant les membranes. Plusieurs systèmes de dessalement de l'eau de mer sont installés un peu partout dans le monde. L'utilisation de l'OI pour éliminer les chlorures peut se présenter dans un cas d'eau souterraine saumâtre (cas Bendafel).

I.3- Approvisionnement en eaux de surface et traitement

I.3.1- Recherche en eau de surface et traitement

Les eaux de surface (cours d'eau, lacs, étangs) alimentées par le ruissellement des eaux de pluies, sont utilisées pour l'approvisionnement en eau. Par rapport à l'eau souterraine, l'eau de surface présente habituellement une plus grande variabilité en ce qui concerne la qualité. Elle est également plus vulnérable à la contamination, autant biologique que chimique. Finalement, les installations de traitement de l'eau de surface sont souvent plus complexes que celles qui traitent l'eau souterraine. Pour ces raisons, la recherche en eau de surface n'est souvent pas la première activité d'un projet.

Lorsque requis, les principales étapes d'analyse pour cette avenue de solution sont :

- Recenser les sources d'eau de surface (lacs, rivières et résurgences) disponibles à proximité du réseau de distribution;
- Favoriser en premier lieu l'utilisation des résurgences et particulièrement si elles peuvent être interceptées sous terre. Dans ce dernier cas, l'eau captée pourrait être assujettie aux critères de désinfection et de turbidité d'une eau souterraine (beaucoup moins sévères que pour une eau de surface);

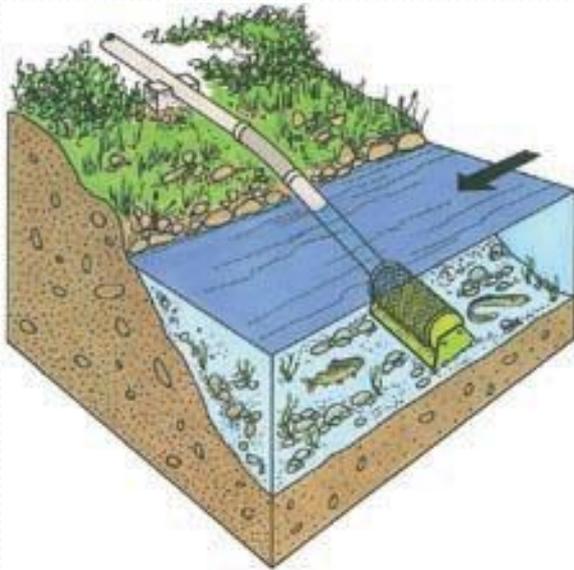
- Favoriser en second lieu les plans d'eau (lacs et réservoirs), car la qualité de l'eau brute est plus stable que celle véhiculée dans une rivière. De ce fait, le traitement est également plus sécuritaire et plus simple d'opération;
- Dans les cas de lacs, réservoirs et cours d'eau, caractériser le bassin versant et particulièrement les environs immédiats de la prise d'eau prévue (usages anthropiques et sources de pollution, nature du bassin versant, nombre d'utilisateurs, habitats particuliers, propriétés, etc.);
- Procéder à une caractérisation complète de la source d'eau de surface;

- Évaluer les conflits d'usages et les implications législatives, réglementaires et politiques connexes;
- Évaluer la capacité d'extraction admissible pour le plan d'eau ou le cours d'eau afin de préserver le débit écologique en aval du plan ou du cours d'eau;
- Évaluer le mode de captage admissible (prise d'eau, réservoir, etc.).

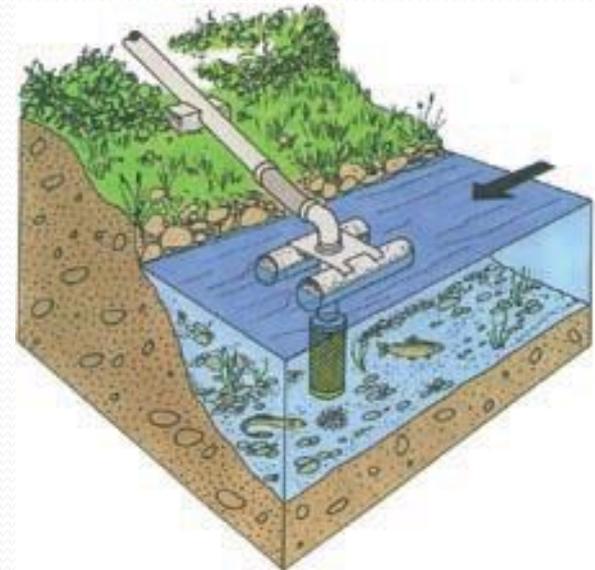
I.3.2- Système d'approvisionnement en eau de surface

L'approvisionnement par eau de surface comprend les systèmes avec prise d'eau dans :

- 1) Un cours d'eau à écoulement naturel ou régularisé;



Prise en fond du lit



Prise flottante

2) un lac naturel;

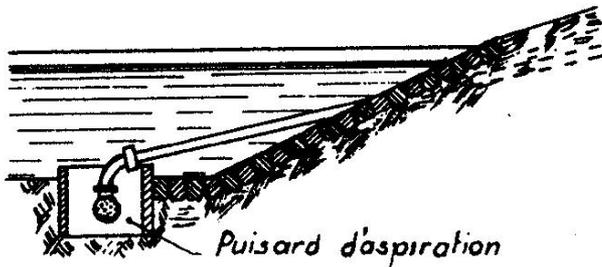


Figure 6 : Prise en fond de lit

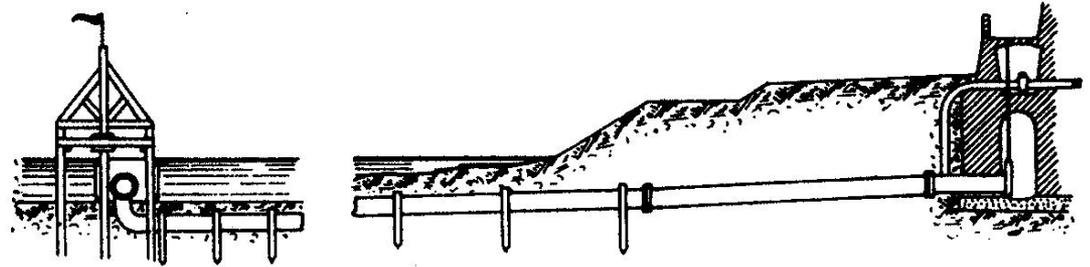


Figure 7 : Prise au milieu du courant

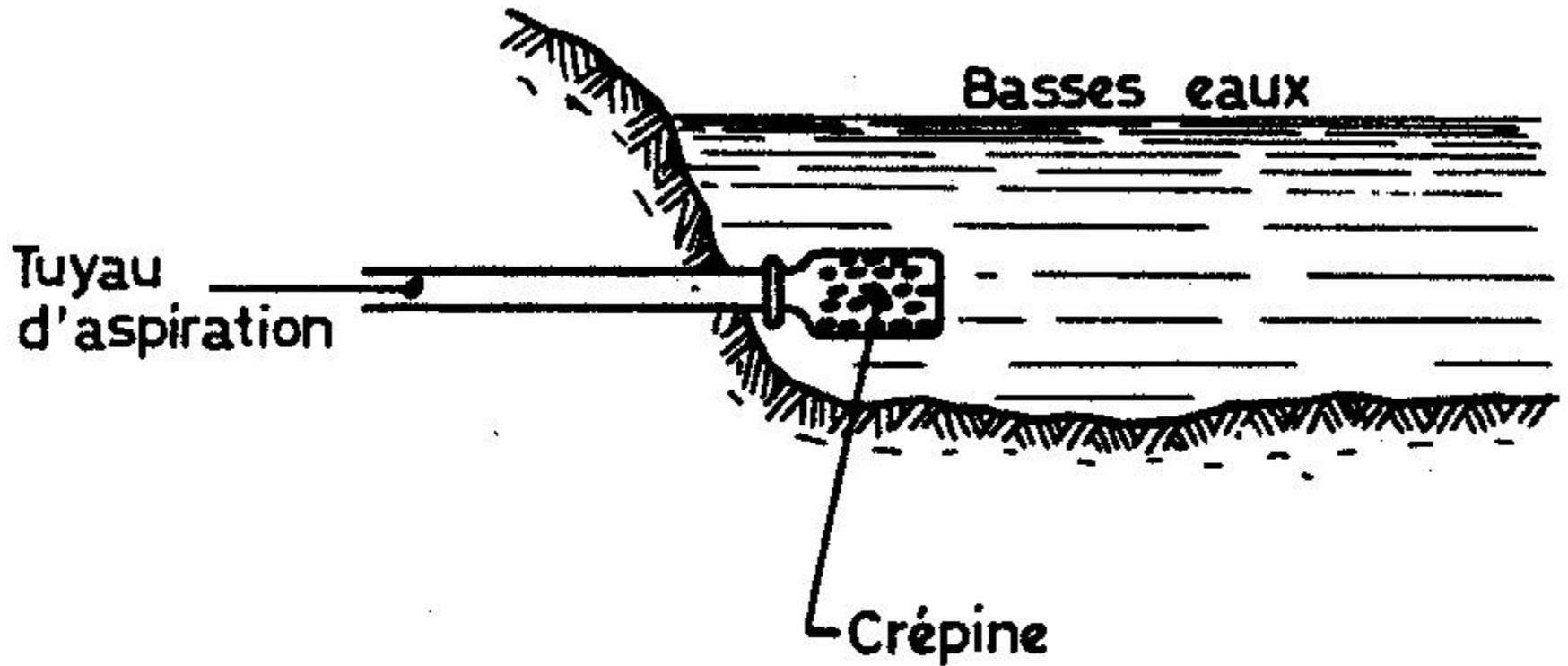
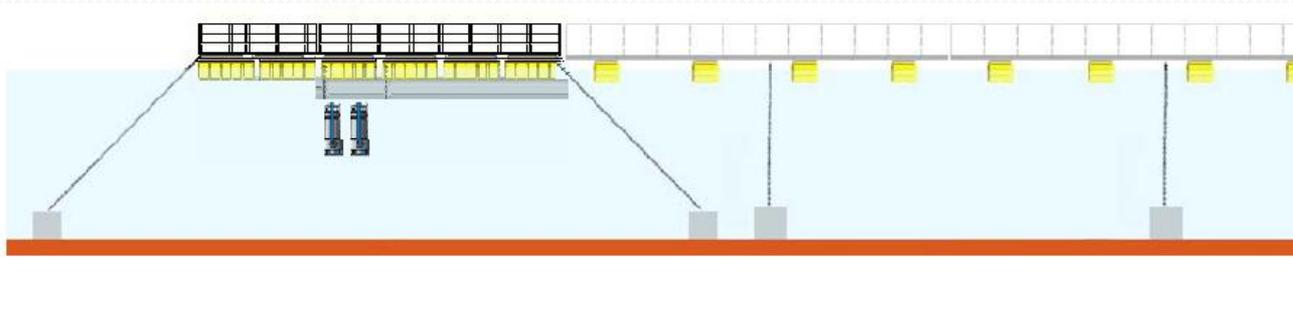


Figure 1 : Prise sommaire dans les berges.

3) un réservoir d'emmagasinage artificiel;



Station de pompage flottante

Toure de prise de Sidi El Abdeli



Toure de prise de Sekkak





Un système d'approvisionnement en eau doit puiser son eau brute à partir de la meilleure source disponible et qui soit à la fois économiquement rentable et techniquement possible à aménager en tenant compte des impacts environnementaux et de la vulnérabilité de la source d'eau;

La conception des ouvrages doit se faire de façon à assurer le maintien d'une qualité d'eau brute adéquate dans le temps (influence des tributaires, remise en suspension des sédiments, etc.). Dans les installations importantes, il est préférable d'utiliser deux entrées autonomes jusqu'au poste de pompage d'eau brute ou au regard de rive;

Le système d'approvisionnement en eau de surface (ouvrage d'entrée, conduite d'adduction et poste de pompage ou regard de rive) doit comporter des aménagements remplissant les fonctions suivantes :

- prévenir l'entrée de débris grossiers en conduite sans générer de problème de colmatage fréquent;
- éviter l'entraînement des poissons dans le système et limiter la sédimentation;
- prévenir le piégeage des poissons dans le système;

Tout projet de prise d'eau doit tenir compte de la faune aquatique qui habite le plan ou cours d'eau visé.

I.3.3- Qualité de l'eau de surface

a) Mesures préventives

Tous les facteurs susceptibles d'affecter à court ou à long terme la qualité de l'eau puisée à une source doivent être considérés et tout particulièrement les points suivants :

- 1) Inventorier et évaluer, de façon sommaire (cartographie, photographie aérienne, informations auprès des municipalités, etc.) les différents usages anthropiques situés immédiatement en amont :



Ghardaïa, Vue satellite et aérienne

- Agriculture;
- Production animale;
- Émissaire d'eaux usées municipales, traitées ou non;
- Rejets industriels;
- Sols contaminés;
- Sites d'enfouissement;
- Sites de villégiature;
- Secteurs où le sol est dénudé;
- Exploitation forestière.

Barrage Sekkak Mars 2009



- 2) Évaluer sommairement les variations possibles de qualité lors d'un étiage et d'une crue en termes de matières en suspension, matières organiques, couleur et débris;



3) Étudier et proposer, en fonction de la législation, les règlements et les politiques connexes, des mesures de contrôle et de protection du bassin versant et des cours d'eau tributaires du propriétaire, telles que :

- L'élimination des sources de pollution;
- L'acquisition de propriétés ou de terrains;
- La végétalisation des sols dénudés tout en évitant certaines espèces susceptibles d'altérer la qualité de l'eau (plantes annuelles et arbres à feuilles caduques);
- L'adoption de règlements municipaux prohibant les activités susceptibles de polluer;

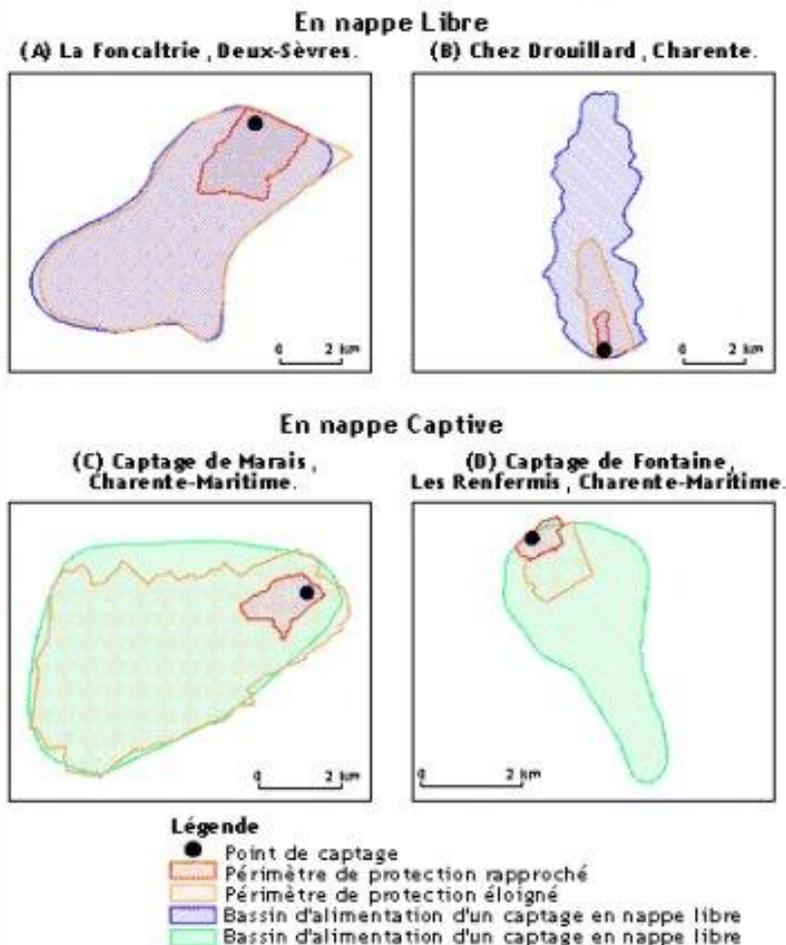
4) Évaluer les risques que la source soit atteinte par un déversement accidentel ou une fuite de matières pouvant être toxiques pour les consommateurs ou nuisibles au procédé de traitement (voie ferrée ou autoroute, industries, etc.);



5) Concevoir la prise d'eau de façon à assurer la meilleure qualité d'eau possible en évitant l'intrusion de débris ou d'autres matières nuisibles. Si un réservoir d'emmagasinage est prévu, évaluer l'influence des facteurs spécifiques comme le décapage, l'érosion et la stabilisation des berges, l'accès contrôlé, etc.;

6) Implanter une zone de protection minimale de 30 m ceinturant la partie terrestre de la prise d'eau au moyen d'une clôture d'une hauteur minimale de 1,8 m pour interdire l'accès au regard de rive, au poste de pompage ou autres ouvrages localisés sur la rive. Si une telle zone de protection ne peut être assurée, des mesures spéciales de protection doivent être envisagées. La barrière d'accès doit être cadénassée;

EXEMPLES DE SUPERPOSITION DE PÉRIMÈTRE DE PROTECTION ET DE BASSIN D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE, EN FONCTION DU TYPE DE NAPPE CAPTÉE



Source : ORE à partir de l'étude DRASS/ANTEA 'Identification des bassins d'alimentation des ressources en eau prioritaires et vulnérables aux pollutions diffuses mobilisées au titre de l'adduction d'eau dans la région Poitou-Charentes'.

- 7) Construire des fossés pour détourner les eaux de ruissellement vers l'aval de la prise d'eau;
- 8) Installer des affiches aux endroits stratégiques indiquant qu'il s'agit d'une source d'approvisionnement en eau potable;
- 9) Il est recommandé aux exploitants de prévoir un ou plusieurs plans d'urgence pour tenir compte des situations où la source d'eau de surface serait affectée par un ou plusieurs événements inhabituels susceptibles d'introduire dans la source d'eau brute de nouveaux contaminants ou des contaminants existants en quantités excessives. Les mesures à prendre pour identifier et réduire les risques d'impact sur le traitement ou sur l'eau traitée sont à considérer.

b) Critères de qualité

La qualité de l'eau brute doit être déterminée à partir d'un échantillonnage sur une période de temps suffisamment longue pour pouvoir évaluer les caractéristiques bactériologiques, physiques et chimiques de l'eau, leur évolution dans le temps et le choix d'un procédé de traitement, le cas échéant.

I.3.4- Réservoirs d'emmagasinage

Selon la source d'eau de surface choisie, un réservoir d'emmagasinage pourra être requis de manière à assurer un approvisionnement d'eau brute minimum, en tout temps, à l'installation de traitement.

Dans la mesure du possible, les réservoirs d'emmagasinage doivent être considérés uniquement dans les situations où la source d'eau de surface naturelle (cours d'eau ou lac) ne peut garantir le débit journalier maximum de conception pour l'installation de traitement et/ou dans les cas où la qualité physico-chimique de la source d'eau de surface naturelle est sujette à des variations brusques. Dans certains cas, le réservoir d'emmagasinage pourra servir comme prétraitement en amont de l'installation de traitement (aération/oxygénation, décantation naturelle, contrôle de la croissance des algues, contrôle des goûts et odeurs, ajustement du pH, etc.).

I.3.5- Dégrillage et microtamisage

I.3.5.1 Dégrillage

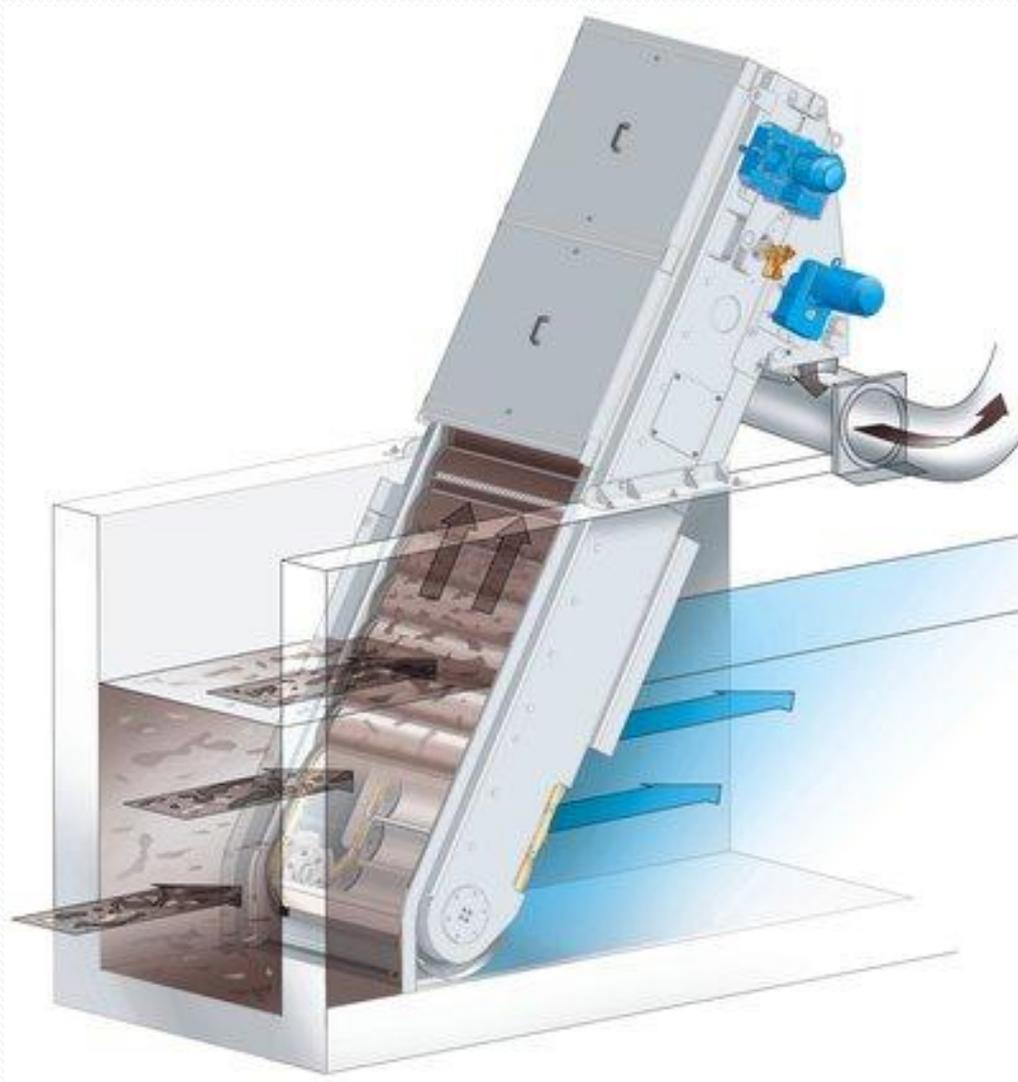
Le dégrillage permet d'enlever les débris de dimensions intermédiaires, afin d'éviter qu'ils interfèrent avec le fonctionnement des équipements aval. Il sert également à empêcher l'accès des poissons aux ouvrages aval (poste de pompage, conduite et installation de traitement). Pour ces raisons, il doit être localisé dans le regard de rive, au poste de pompage d'eau brute ou à l'entrée de l'usine, s'il s'agit d'une alimentation gravitaire. Trois types de dégrilleurs peuvent être utilisés à cette fin :

a) Grilles à nettoyage manuel



b) Grilles mobiles à nettoyage automatique

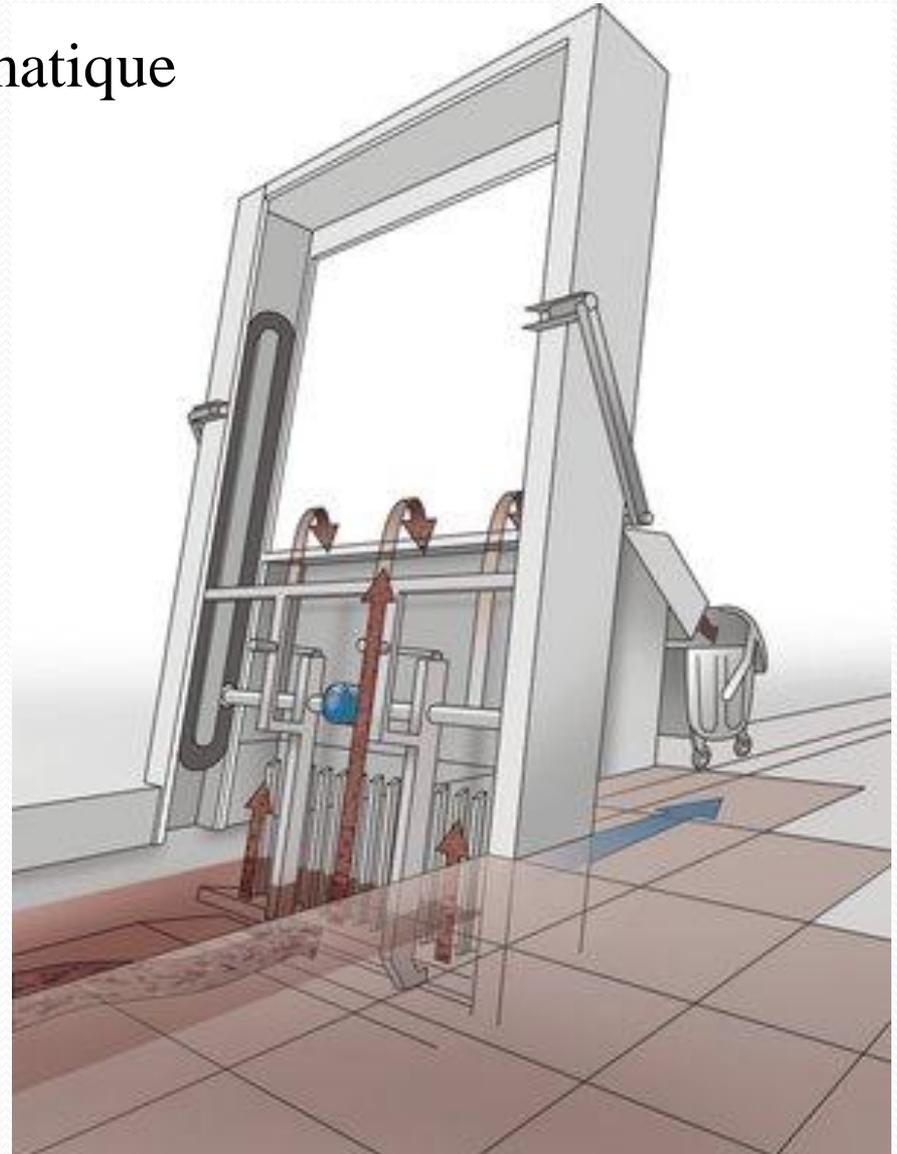




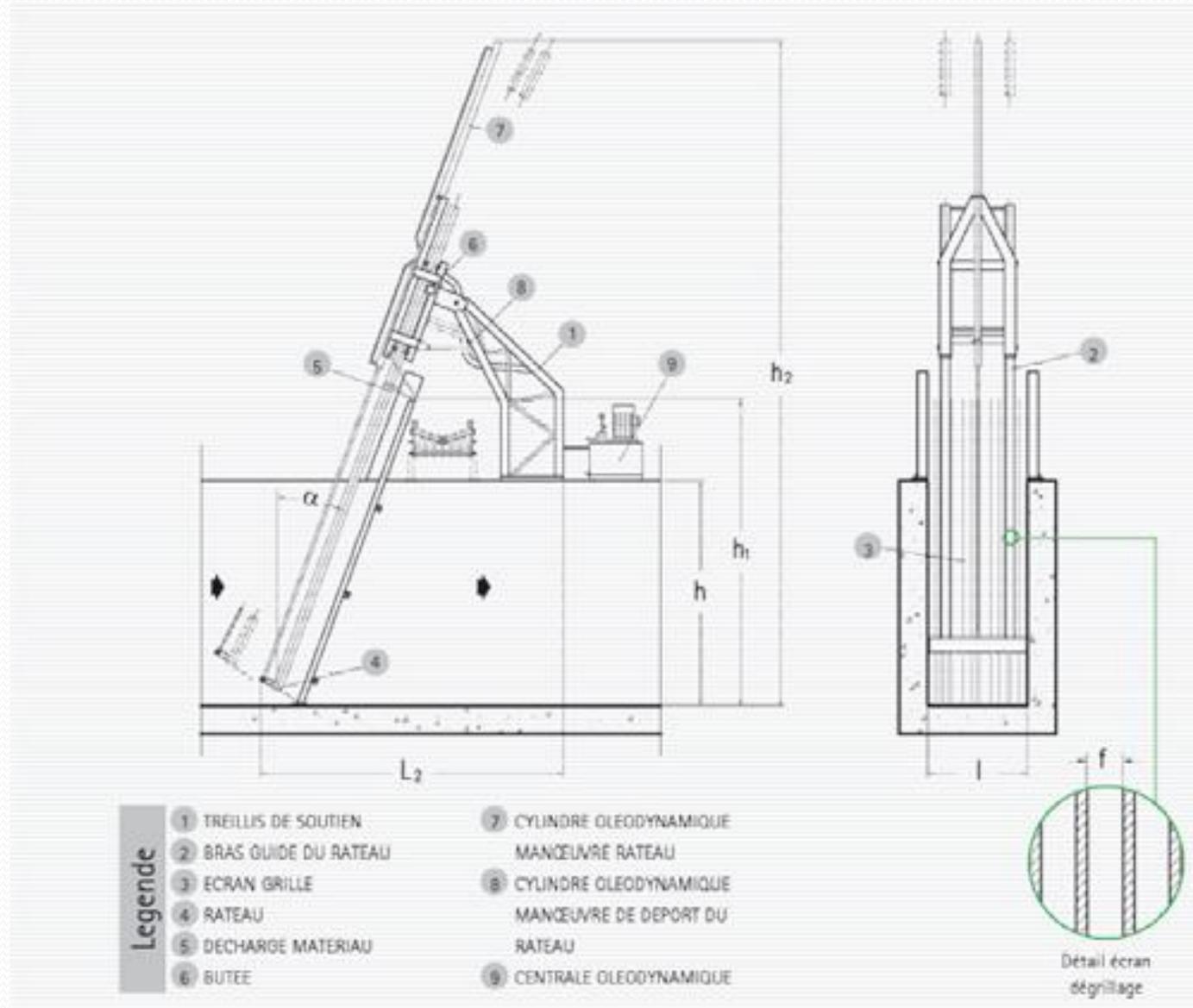
Grille droite à nettoyage continu (froyennes)



c) Grilles fixes à nettoyage automatique



Degrilleur verticale oleodynamique



Degrilleur verticale oleodynamique







Le domaine d'application pour chacun des types de grilles est présenté ci-après.

Type de grilles	Taille de l'installation
Grilles à nettoyage manuel	Petite et moyenne avec faible charge de débris
Grilles mobiles à nettoyage automatique	Moyenne (< 20 000 m ³ /j)
Grilles fixes à nettoyage automatique	Grande envergure (> 20 000 m ³ /j)

De faibles charges de débris sont habituellement observées lorsque l'ouvrage d'entrée de la prise d'eau est localisé dans un lac et qu'elle est éloignée de toute source de transport de débris (cours d'eau de recharge par exemple). Dans le cas d'un cours d'eau dont la charge saisonnière en débris peut varier rapidement (feuilles en automne par exemple) et/ou n'est pas documentée (aucune prise d'eau existante), il est préférable de prévoir des grilles à nettoyage automatiques.

Ces dernières permettent d'éviter le nettoyage parfois quotidien que nécessitent les grilles à nettoyage manuel.

Les critères de conception pour ces différents types de grilles sont présentés ci-après.

Dimension des mailles

4 à 10 mm de côté

Vitesse d'approche

7,5 à 15 cm/s

Angle de la grille

60 à 80 degrés par rapport à l'horizontale

Lorsqu'une grille à nettoyage manuel est utilisée, il est préférable de la faire précéder d'une grille plus grossière afin d'éviter qu'elle ne se colmate trop rapidement dû aux feuilles et autres débris plus volumineux.

Les matériaux constituant la grille doivent être résistants à la corrosion.

Le fonctionnement du dispositif de nettoyage de la grille est généralement discontinu. Il peut être commandé soit par un système cyclique à cadence (1 min à 1 h) et durée réglable (1 à 15 min), soit par un indicateur de perte de charge différentiel ou encore par une combinaison des deux systèmes.



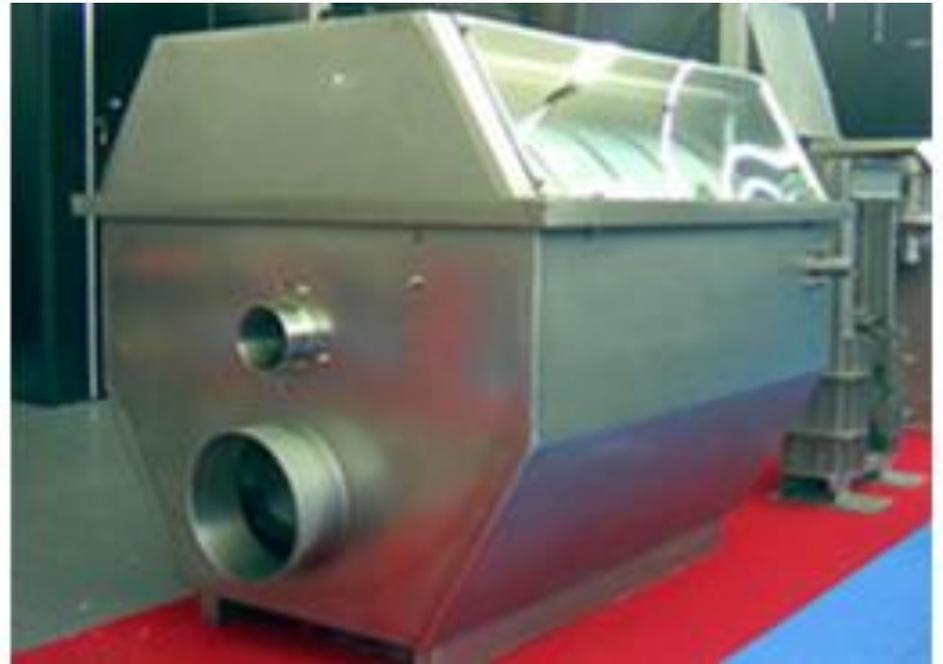
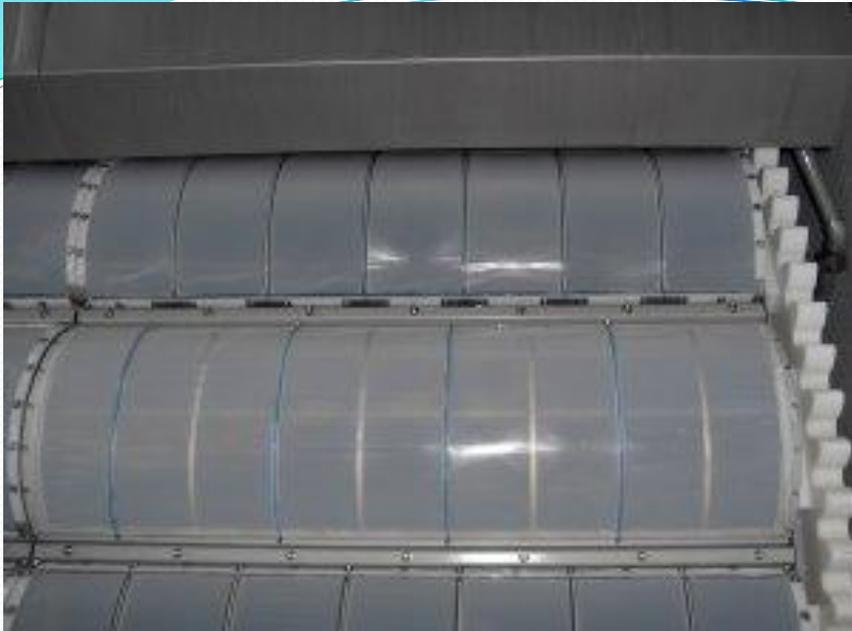
I.3.6- Microtamisage

Le microtamisage permet l'enlèvement des fines matières en suspension (MES) présentes dans l'eau à l'aide d'une toile métallique (microtamis) à mailles très serrées. Ces dernières sont habituellement montées sur un cylindre rotatif horizontal (bien qu'il en existe également d'autres types) qui est installé de façon à ce qu'il soit partiellement immergé. Un système à nettoyage automatique est requis pour éliminer les MES retenues lorsque l'eau traverse les microtamis.



La conception de cet équipement doit tenir compte des points suivants :

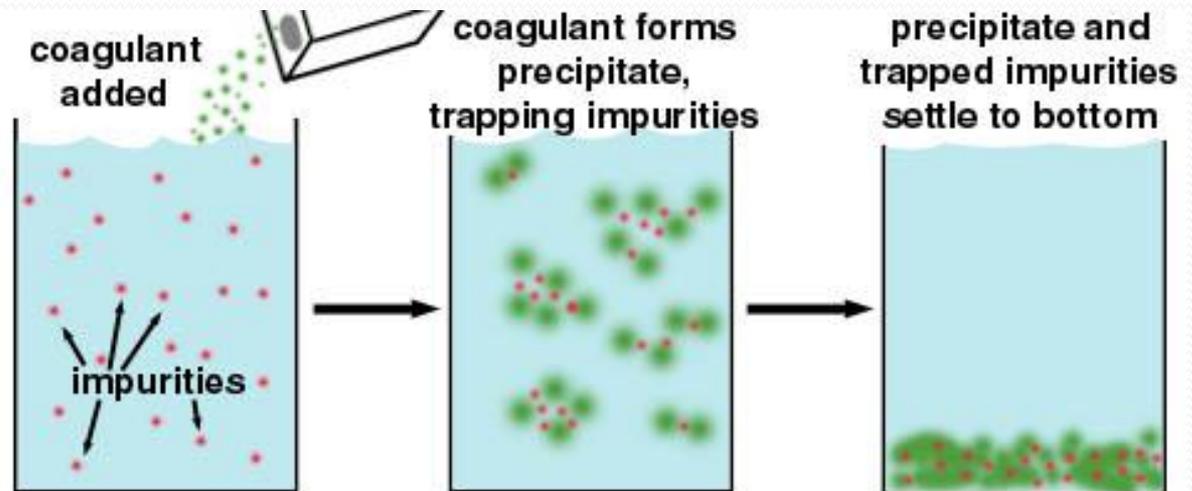
- Le microtamis est conçu pour retirer des solides spécifiques (des algues par exemple). Le diamètre des ouvertures du tamis doit être choisi en fonction de cet usage particulier;
- Une attention doit être apportée au choix du matériau formant le tamis pour éviter des problèmes de corrosion;
- Si une désinfection est requise en prétraitement, il faut tenir compte de l'effet de l'ajout du désinfectant sur les tamis;
- Il faut prévoir des ouvrages permettant de contourner chaque unité;
- La récupération des matières retenues par les tamis et leur disposition est à examiner.



I.3.7- Coagulation

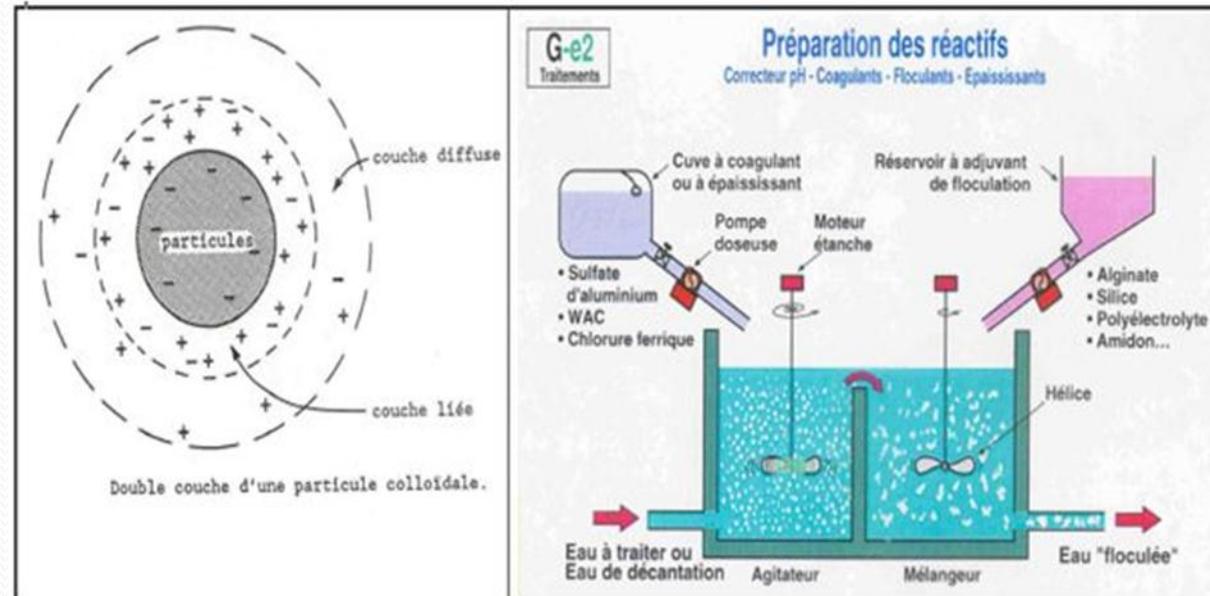
I.3.7.1- Description

La coagulation est un processus qui consiste à neutraliser les charges portées par les substances colloïdales ou dissoutes indésirables à l'aide d'un produit chimique de charge opposée, appelé coagulant, afin de faciliter leur agglomération en flocons décantables ou filtrables. Le coagulant peut être introduit dans un bassin de mélange rapide ou dans un mélangeur statique en ligne qui génèrent tous deux une violente agitation au point d'injection.



La coagulation est toujours la première étape du traitement physico-chimique. Elle précède ainsi la floculation/décantation/filtration, la filtration directe ou la filtration membranaire (microfiltration ou ultrafiltration).

En eau de surface, la coagulation est utilisée lorsque l'on désire enlever la couleur vraie, la turbidité ainsi que les algues, mais elle peut également être utilisée à d'autres fins (arsenic $+5$, etc.).





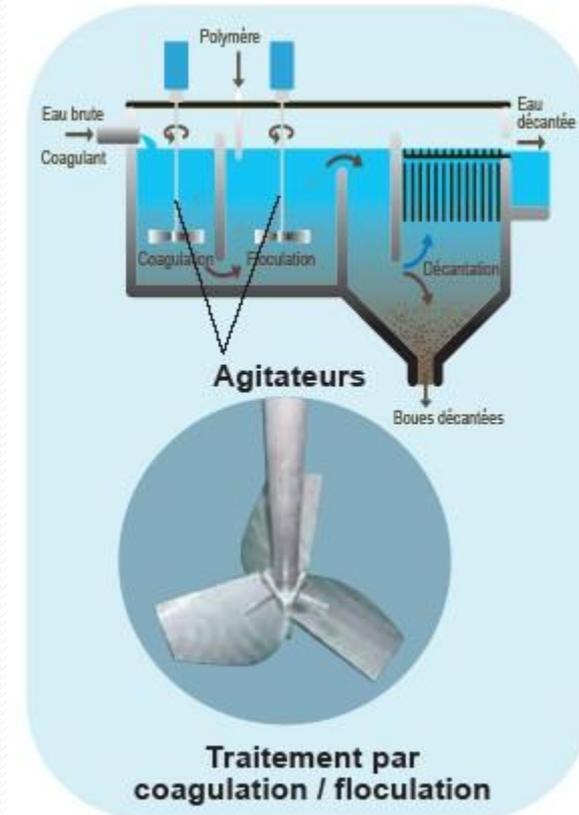
Lorsque l'ajout d'un produit alcalin ou acide est requis pour optimiser la coagulation, celui-ci devrait toujours être injecté soit en amont (de préférence), soit au même endroit que le coagulant afin que les conditions propices à la coagulation soient présentes au moment de l'introduction du coagulant.

I.3.7.2- Critères de conception

a) Bassin de coagulation

- Le temps de rétention hydraulique d'un tel bassin doit être conforme aux recommandations du fournisseur du décanteur (ou autre ouvrage appelé à fournir une garantie de performance sur le procédé) et être d'au moins 1 à 2 minutes, sur la base du débit de conception. En eau froide, il peut être parfois préférable de prolonger la rétention pour permettre un contact efficace entre l'eau et le coagulant. Le temps de rétention requis peut également varier selon la vitesse de réaction du coagulant utilisé;

- Le bassin doit être équipé d'une unité mécanique de mélange rapide. Le gradient de vitesse doit respecter les recommandations du fournisseur du type de décanteur utilisé et être de l'ordre de 300 à 1500 s⁻¹ selon les applications (les valeurs supérieures s'appliquant pour la coagulation par neutralisation des charges).
- L'entrée d'eau brute ne doit pas être dirigée directement sur l'arbre ou l'hélice de l'agitateur;
- L'entrée et la sortie du bassin doivent être disposées de manière à éviter les courts-circuits hydrauliques.



b) Mélangeur statique

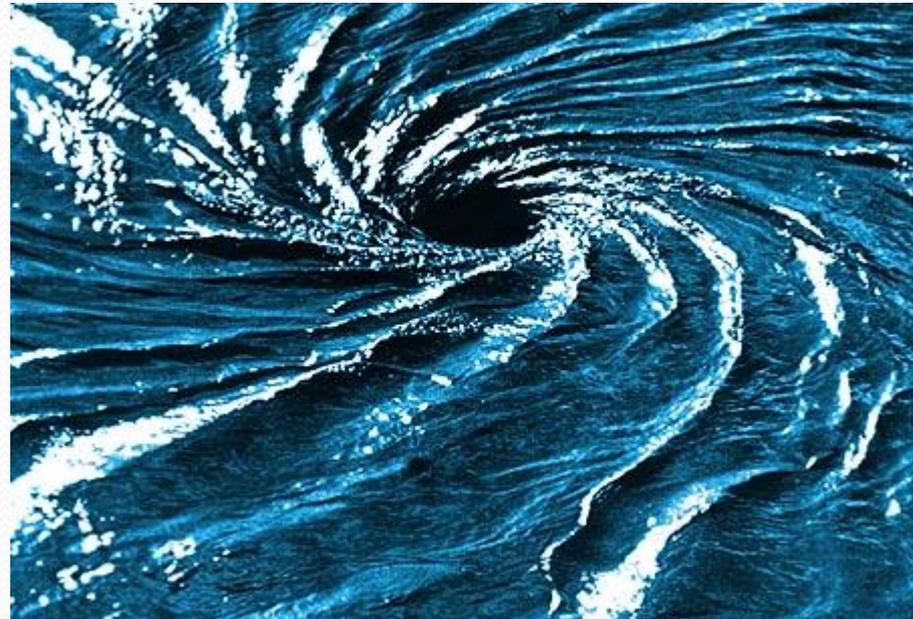
Le mélangeur statique peut être utilisé lorsque le mode de coagulation principal se fait par neutralisation des charges (le temps de réaction du coagulant est court, soit de l'ordre de 0,5 à 1,0 s) et lorsque le débit d'eau brute ne varie pas ou très peu (l'énergie de mélange varie avec le débit). Le nombre d'éléments de mélange intérieur doit être choisi en fonction du débit et des produits chimiques injectés. Ces éléments doivent être amovibles pour des raisons d'entretien.

L'injection du coagulant doit se faire, de préférence, directement dans le mélangeur statique.

c) Autres éléments importants de conception

- Le dosage doit être effectué de façon continue et proportionnelle au débit;
- Lorsqu'un agitateur est utilisé, le coagulant doit être injecté dans la zone où la turbulence est la plus grande, soit au-dessus ou au-dessous de l'hélice selon qu'elle refoule ou aspire l'eau. Il est souhaitable de prévoir au moins un autre point de dosage supplémentaire pour s'assurer que le mélange sera optimisé pour toutes les périodes de l'année;

- Lorsqu'un mélangeur statique est utilisé avec des pompes de type à pulsations, la fréquence de pulsation de ces dernières doit être beaucoup plus élevée que dans le cas d'un bassin de mélange rapide (en raison du faible temps de séjour);
- Des déflecteurs peuvent devoir être nécessaires dans le bassin de coagulation pour éviter la formation d'un vortex, ce dernier pouvant diminuer l'efficacité du mélange.



I.3.8- Flocculation

I.3.8.1- Description

La flocculation est l'étape de traitement qui suit la coagulation. Elle vise à favoriser la croissance de floccs par une agitation lente et prolongée de l'eau provenant des bassins de coagulation. Elle est réalisée dans un bassin pourvu d'une unité mécanique d'agitation et implique habituellement l'ajout d'un flocculant.

La flocculation doit obligatoirement être réalisée avant l'étape de clarification et peut être aussi utilisée avant une filtration directe.



I.3.8.2- Critères de conception

Certains procédés de décantation intègrent l'étape de floculation et par conséquent, les critères de conception découlent alors des exigences du fabricant. Dans d'autres cas, elle est faite séparément.

En tout temps, le bassin, le système d'agitation et les équipements connexes doivent être conçus pour :

- Assurer le temps nécessaire pour la floculation (de 6 à 30 minutes) au débit de conception. Une floculation trop longue conduit à la destruction progressive du floc;
- Permettre l'ajustement de l'intensité de mélange en pourvoyant les agitateurs de variateurs de vitesse;
- Éviter le bris du floc (vitesse maximale d'extrémité de pale inférieure à 0,6 et à 1,2 m/s respectivement pour un floc fragile et un floc fort);
- Éviter la déposition du floc dans le bassin ($G > 10 \text{ s}^{-1}$);
- Résister à la corrosion.

- La configuration du bassin doit être conçue pour assurer une bonne distribution de l'eau afin d'éviter les courts-circuits et prévenir la destruction du floc aux entrées et sorties du bassin;
- Le dosage d'un flocculant doit être effectué de façon continue et proportionnelle au débit. Il doit parfois être réajusté selon la charge de MES (dosage du coagulant et turbidité);
- Il est souhaitable de prévoir plus d'un point de dosage du flocculant.

- Il importe de ne pas briser le floc lors de son transfert du flocculateur à la zone de décantation. Les bassins de floculation doivent être situés près des décanteurs (s'ils n'en font pas déjà partie) et les vitesses d'acheminement de l'eau floculée vers les bassins de décantation se situent préférentiellement entre 0,15 et 0,45 m/s pour éviter la déposition et le bris des floes, ceci doit être fait en minimisant la turbulence aux coudes et autres changements de direction;
- Il est recommandé d'installer une lumière, de préférence submergée, à chaque bassin de floculation afin de permettre l'observation du floc. L'observation est le paramètre de contrôle le plus important pour la floculation. Sous une même intensité d'agitation, la grosseur du floc est proportionnelle à sa résistance. Plus le floc est dense et de grande taille, mieux il décantera.

Les éléments suivants peuvent être considérés pour optimiser la conception des flocculateurs :

- La profondeur du bassin ne devrait pas excéder cinq mètres en raison des courants instables parfois induits dans le bassin au-delà de cette profondeur;
- Des déflecteurs peuvent être utilisés pour éviter la formation d'un vortex et améliorer l'efficacité du mélange;
- Parfois, il est avantageux d'utiliser deux ou trois bassins en série. Le cas échéant, l'intensité de mélange devra être décroissante (de $G = 60 \text{ s}^{-1}$ à 15 s^{-1}) dans chacun des bassins. Le temps total de floculation doit respecter les exigences susmentionnées;

- La dimension des pales doit respecter un ratio $D/T = 0,2$ à $0,4$ (D=longueur des pales et T = diamètre équivalent du bassin);
- Le choix et le dosage du flocculant doivent être déterminés en laboratoire par un *jar test* sur l'eau à traiter ou encore par des essais pilotes. Tout flocculant utilisé en eau potable doit, au préalable, avoir été approuvé par un organisme spécialisé, en vue d'une utilisation en eau potable;
- Les polymères organiques à moyen et haut poids moléculaire sont les plus utilisés. La charge du polymère importe peu généralement. La silice activée est également utilisée comme flocculant.

Technologie de floculation

Temps de résidence minimum

Coagulant seul

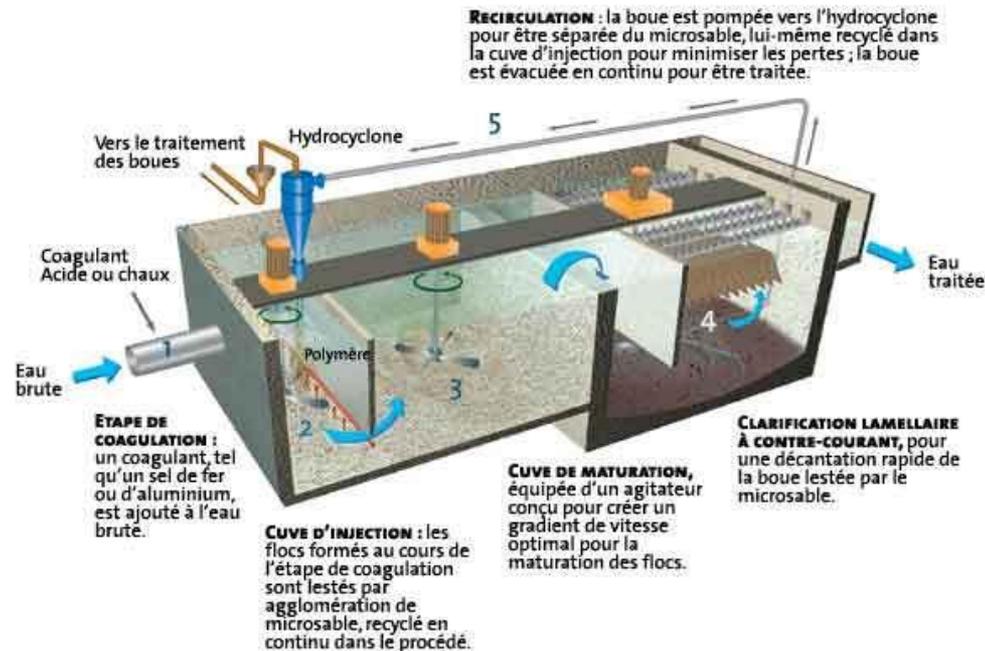
30 minutes

Coagulant et floculant

15 minutes

Coagulant, floculant et microsable

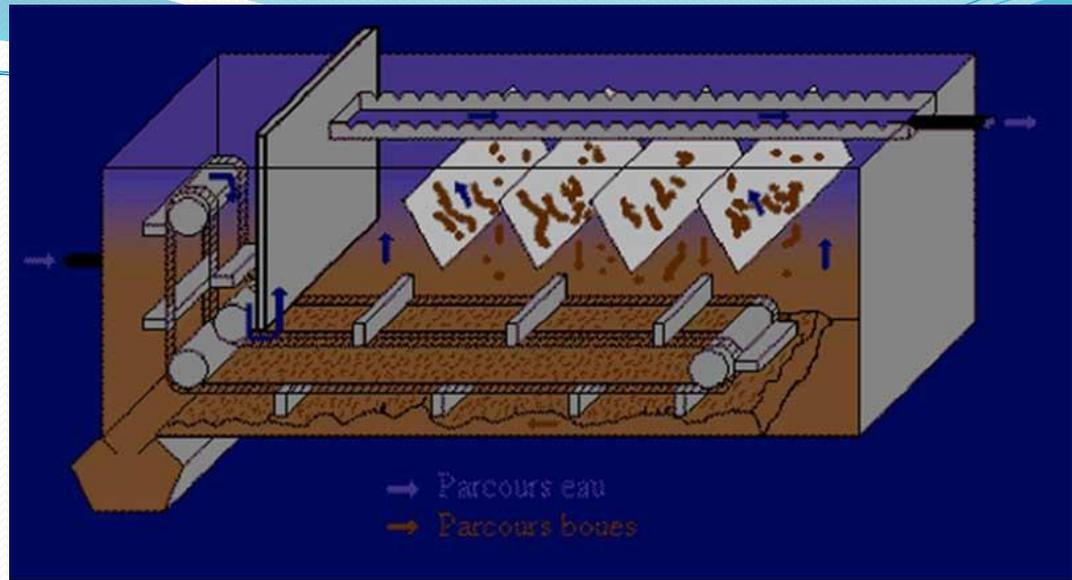
6 minutes



I.3.9- Clarification

I.3.9.1 Décantation

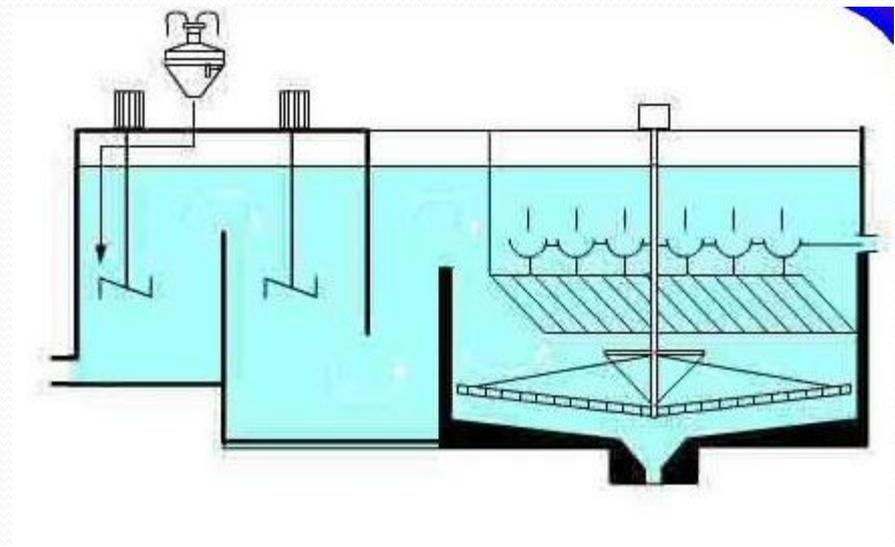
Champs d'application



La décantation physico-chimique permet la séparation solide-liquide désirée. Elle doit obligatoirement être précédée d'une coagulation et d'une floculation en plus d'être suivie d'une filtration.

L'étape de décantation est nécessaire lorsque la charge de l'eau brute est trop élevée pour permettre l'usage d'une filtration directe sans provoquer le colmatage trop rapide des filtres.

La décantation physico-chimique peut être utilisée pour réduire les impuretés d'origine particulaire (turbidité) et/ou dissoutes (couleur vraie ou COT, fer, sulfures, arsenic valence 5, dureté, etc.). Les matières dissoutes doivent préalablement avoir été précipitées et/ou adsorbées à un floc de coagulant.





Il existe deux types de décanteur :

i. Décanteur simple

- Décanteurs à flux horizontaux
- Les décanteurs à flux verticaux

ii. Décanteur lamellaire

I.3.9.2- Filtration

La filtration est la barrière ultime et obligatoire de la filière de traitement des eaux dans la majeure partie des cas. Elle vise à réaliser ou à compléter, à travers un lit filtrant, la réduction des particules en suspension, des coliformes, des virus, des parasites ainsi que la turbidité. Sans elle, plusieurs filières de traitement ne pourraient obtenir de crédits pour l'enlèvement des virus et des kystes de protozoaires.

Les filières de traitement incorporant une filtration peuvent être de type physico-chimique, physique, biologique ou adsorptive.

Peu importe le type de filtre retenu, les équipements suivants sont exigés pour chaque filtre :

- Un débitmètre avec totalisateur du débit;
- Un dispositif de mesure de perte de charge;
- Un système de contrôle de débit à la sortie de chaque filtre pour assurer une répartition égale entre les filtres;
- Des robinets d'échantillonnage pour l'eau brute et l'eau filtrée (avant l'ajout d'autres produits chimiques);
- Un turbidimètre en continu sur chaque filtre avec enregistreur et alarme.

Pour des eaux brutes de bonne qualité, une filtration directe (excluant l'étape de décantation) est parfois possible et peut inclure ou non l'étape de floculation, mais la coagulation et la filtration demeurent nécessaires.

Pour le traitement des eaux potables, on utilise principalement:

- a) Filtration rapide sur sable (Selon le cas elle se met en œuvre dans des appareils ouverts à écoulement gravitaire, ou fermés sous pression);
- b) Filtration lente sur sable;

I.3.10- Filtration membranaire

I.3.10.1- Description

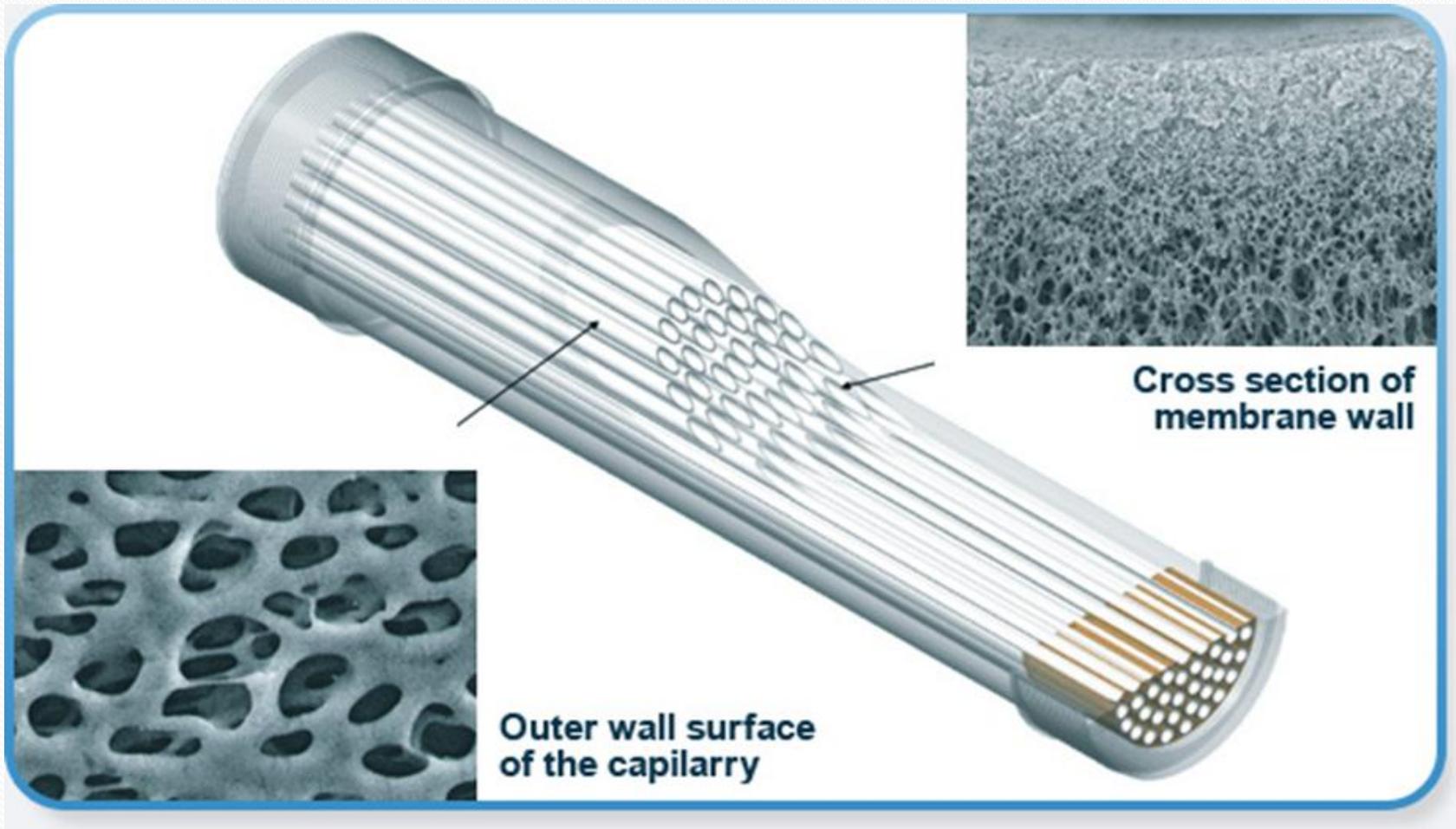
Les membranes sont fabriquées à partir de polymères organiques ou à partir de matières inorganiques (métaux, oxydes métalliques, verre, carbone, carbure de silicium, etc.). Les principaux polymères utilisés pour fabriquer des membranes sont:

- Les polymères dérivés de la cellulose (acétate, bi- ou tri-acétate, cellulose régénérée);
- Les polyamides;
- Les polysulfones et les polyéthersulfones;
- D'autres polymères (polypropylènes, fluorures de polyvinylidène, polycarbonates, etc.).

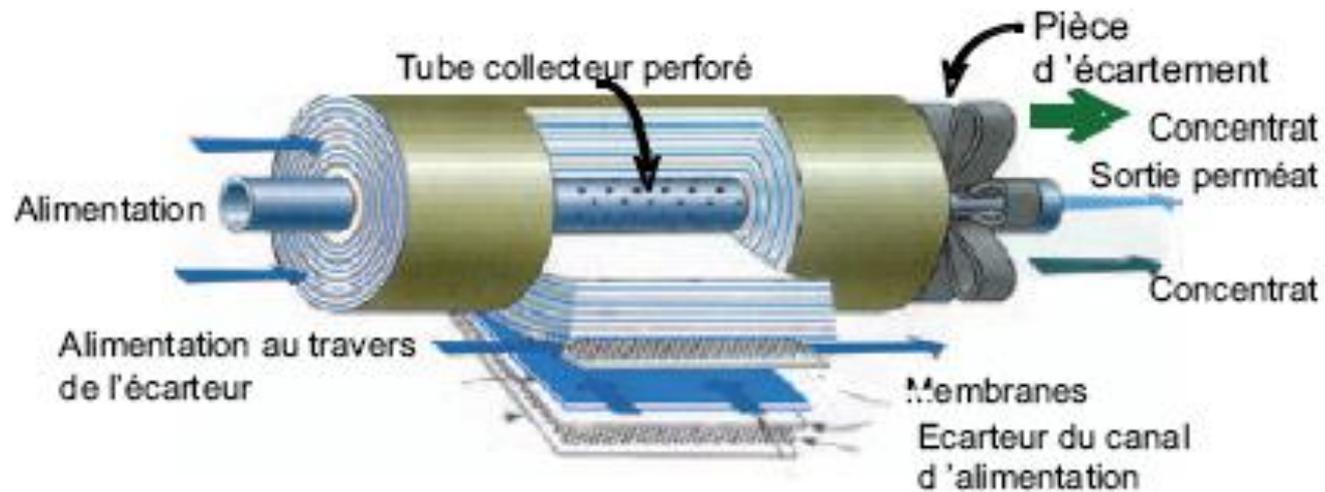


Les membranes sont fabriquées sous forme plane ou tubulaire. En pratique, la désignation de membranes tubulaires est réservée aux plus gros tubes (diamètre intérieur supérieur à 6 mm) alors que la désignation de fibres creuses est réservée aux tubes fins (diamètre externe inférieur à 2 mm). À l'exception de certaines membranes de MF, les membranes ont une structure asymétrique, c'est-à-dire qu'elles sont constituées d'une couche superficielle très mince (0,1 à 0,5 μm d'épaisseur) de très fine porosité et d'une sous-couche plus épaisse de porosité beaucoup plus large. La séparation a lieu dans la couche superficielle tandis que la sous-couche confère une résistance mécanique à la membrane. Les deux couches peuvent être faites de différents matériaux comme c'est le cas pour les membranes composites (*Thin Film Composite*, TFC).

Membranes tubulaires

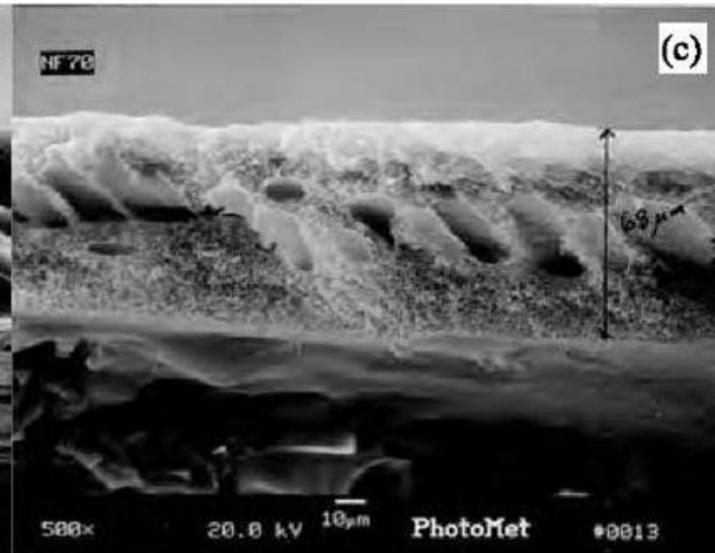
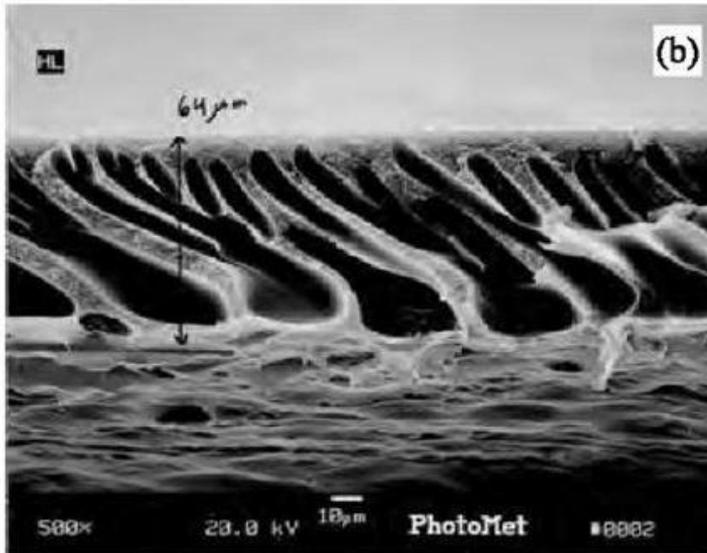
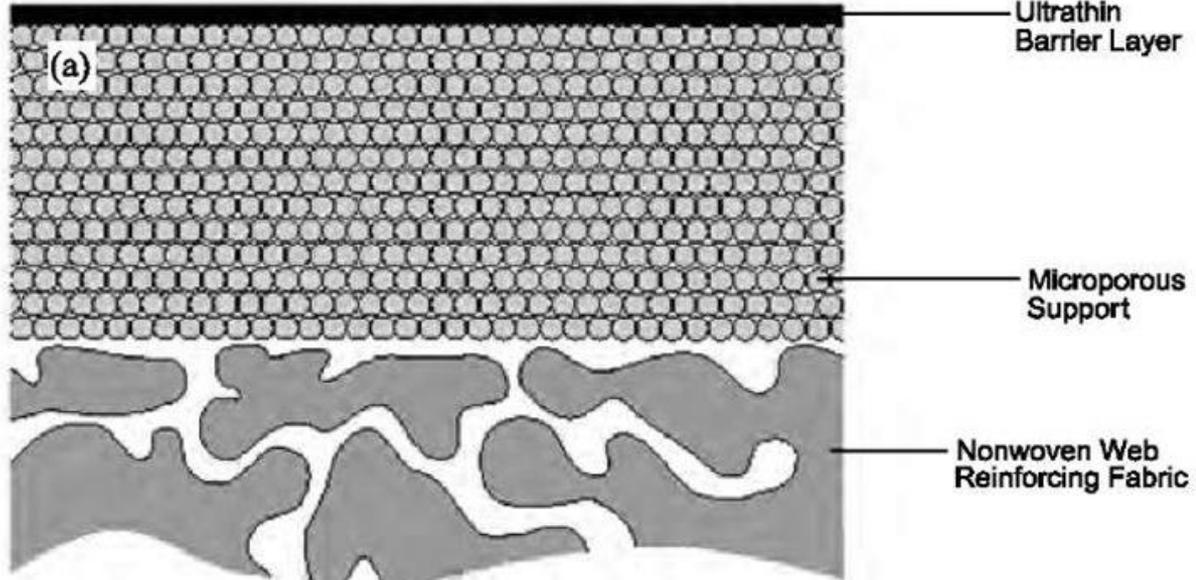


Les membranes planes

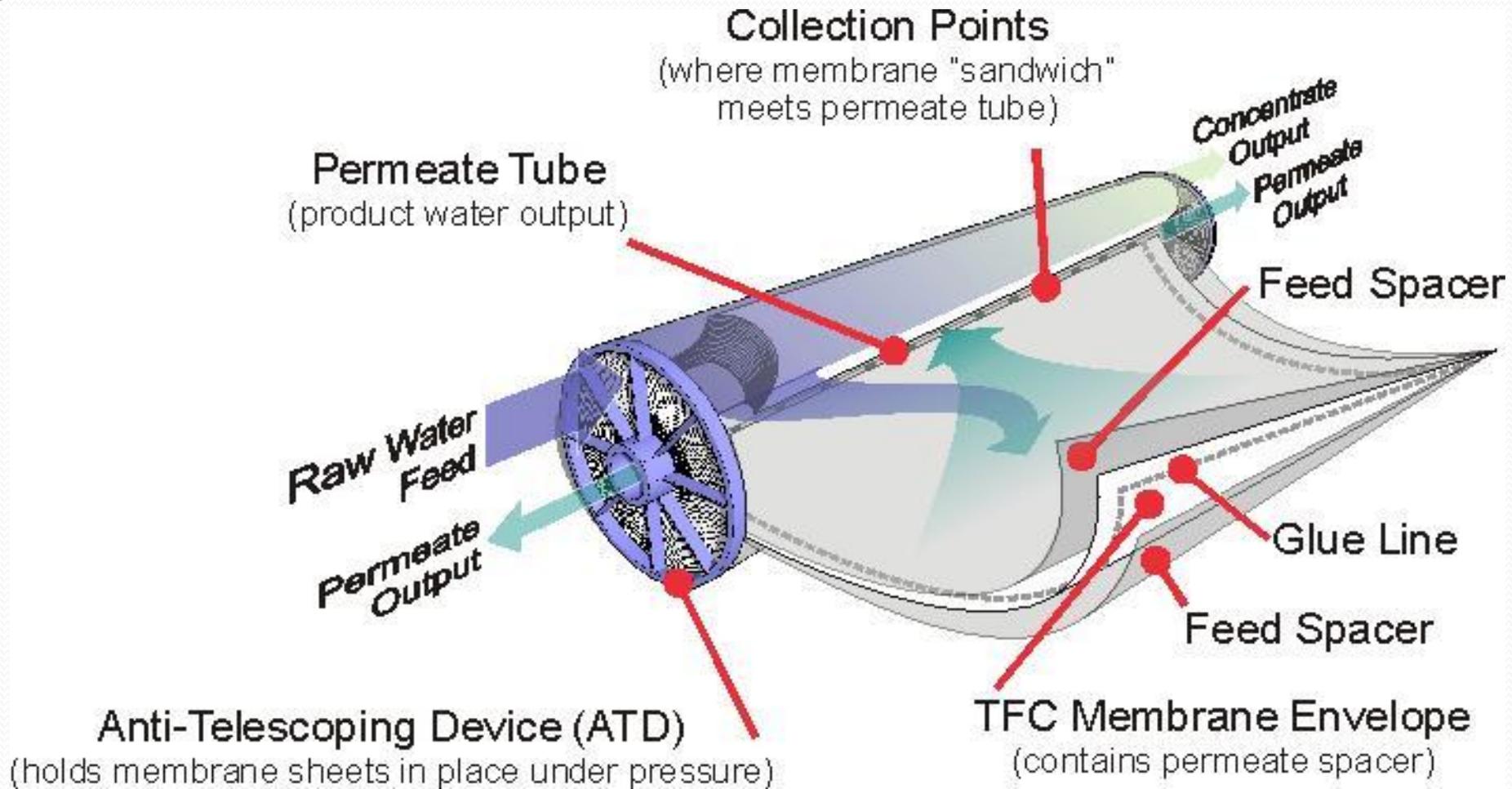


Le perméat est drainé
en spirale vers le
collecteur

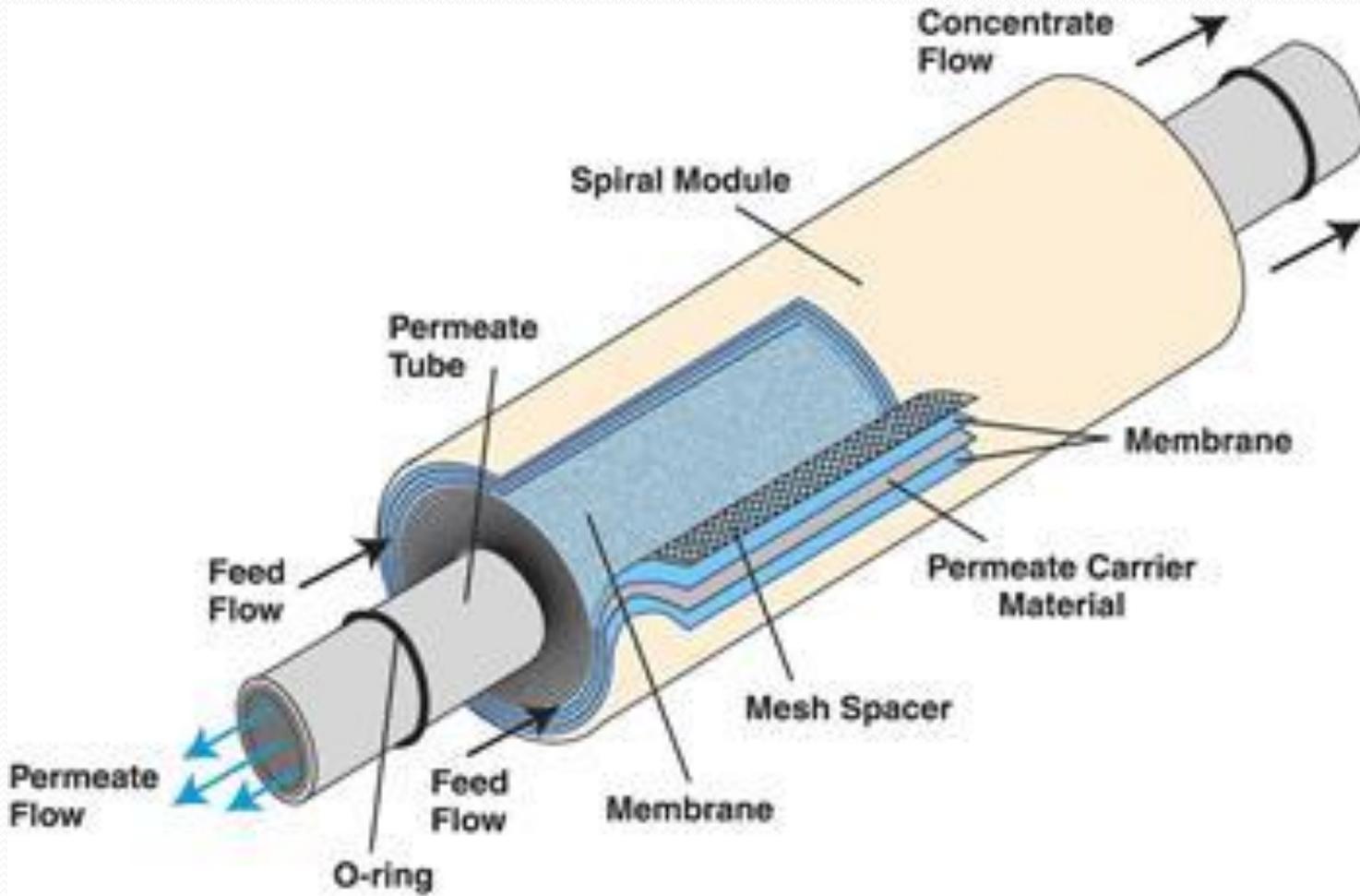
Thin Film Composite, TFC



Thin Film Composite (TFC)



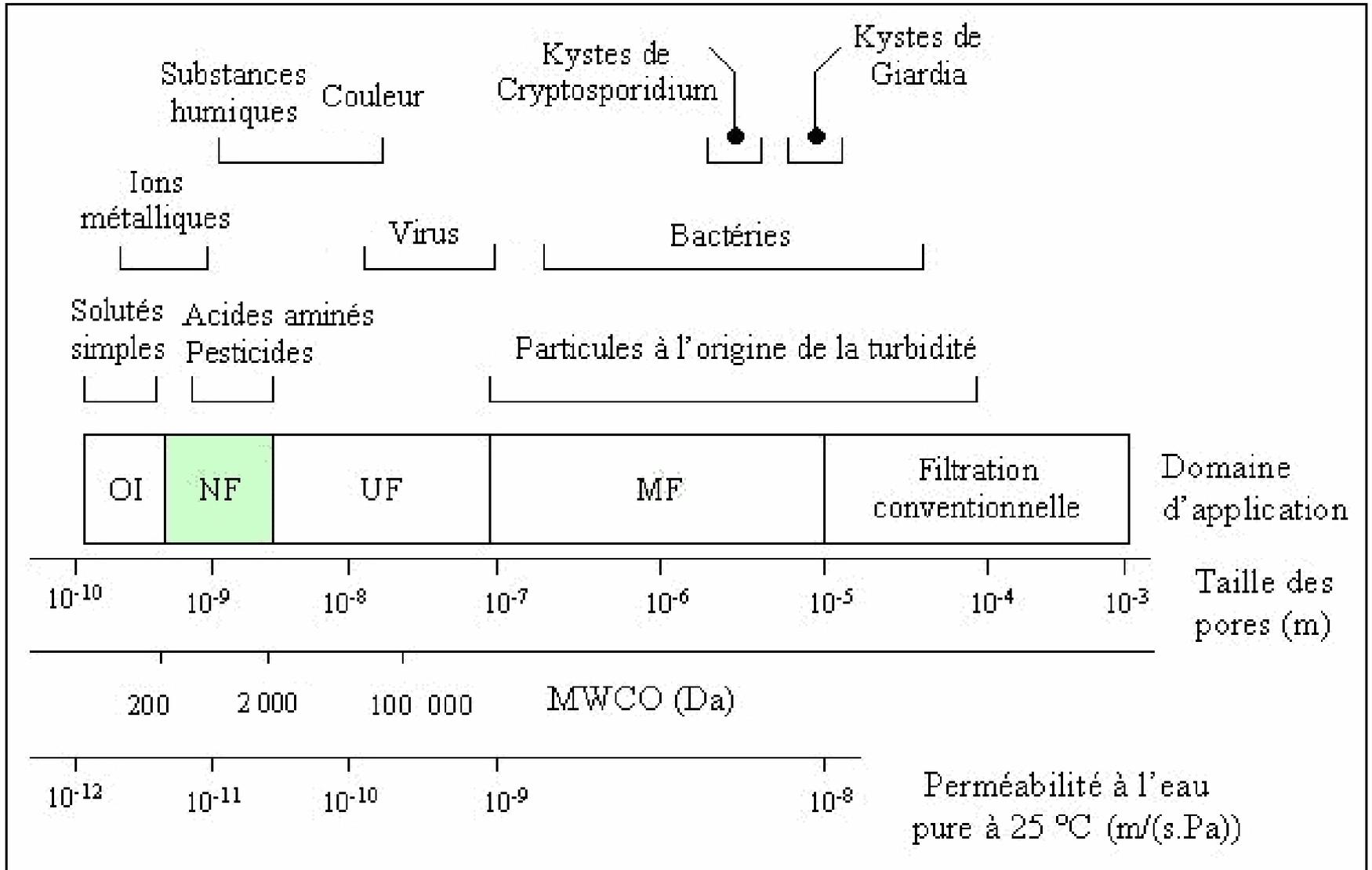
Cellulose Triacetate (CTA)



I.3.10.2- Classification des membranes

Le pouvoir de séparation d'une membrane dépend de sa structure poreuse et de la nature du matériau membranaire. Les ordres de grandeur des tailles des pores des membranes d'OI, de NF, d'UF et de MF sont présentés au tableau 5. Les membranes sont aussi souvent classées en termes de masse molaire des colloïdes ou des solutés qui peuvent être retenus par une membrane. En particulier, les membranes sont souvent définies suivant leur seuil de coupure (*molecular weight cutoff* dont l'abréviation MWCO est bien connue) qui correspond à la masse molaire des solutés retenus à 90% par une membrane.

Classification des procédés membranaires



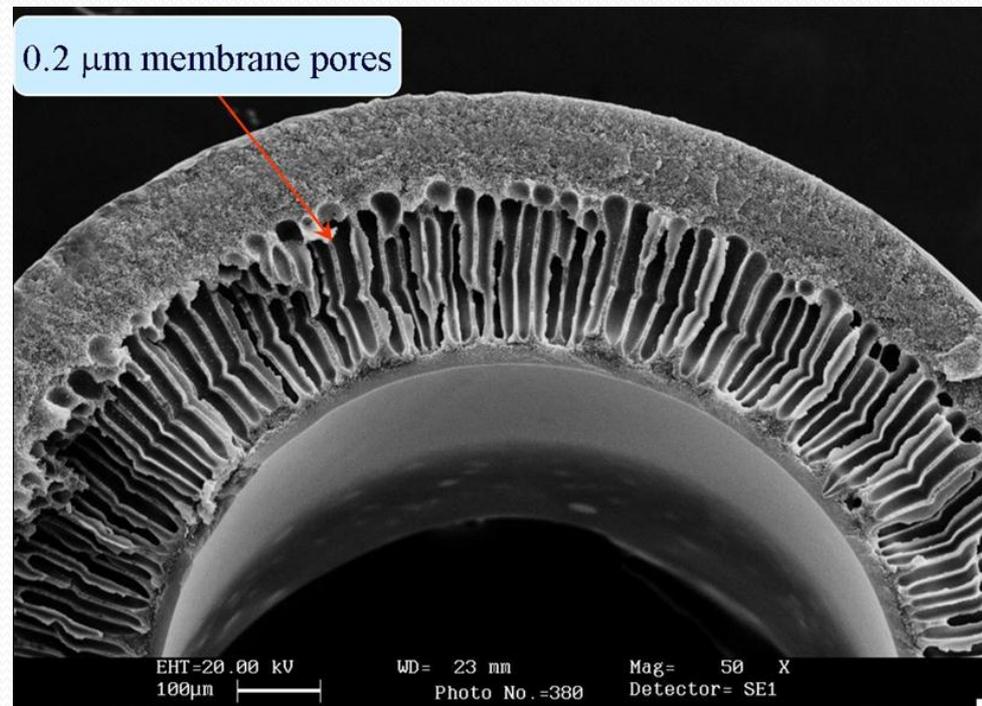
À moins de spécifier les conditions dans lesquelles le seuil de coupure a été déterminé, cette classification doit être utilisée prudemment et ne devrait servir qu'à situer grossièrement le pouvoir de séparation d'une membrane. Les membranes peuvent aussi être caractérisées par des taux de rétention de substances de référence qui sont généralement :

- NaCl en OI;
- MgSO₄, CaCl₂ ou sucrose en NF;
- Dextran ou protéine en UF;
- micro-particules calibrées en MF.

Il est important de connaître les conditions dans lesquelles les taux de rétention ont été mesurés (pression transmembranaire, débit d'écoulement tangentiel ou mode d'agitation et puissance d'agitation, température, concentration, taux de récupération) car les taux de séparation observés dépendent des conditions d'opération. Soulignons aussi que peu d'informations sont généralement disponibles sur les propriétés de surface des membranes (charge de surface, hydrophobicité) même si ces caractéristiques jouent un rôle important dans la séparation, en particulier en NF et en OI.

Il est important de considérer que la porosité d'une membrane correspond à une distribution de tailles de pores et non à une taille de pore unique. Ainsi, la porosité peut être donnée de façon nominale ou absolue. La porosité nominale considère la taille du pore moyen de la membrane, ce qui implique qu'il y a des pores plus grands que celui mentionné mais sans que la taille limite soit précisée.

La porosité absolue, quant à elle, considère la taille du pore le plus gros de la distribution, ce qui est un élément essentiel, surtout lorsqu'on aborde la question de la désinfection.



I.3.10.3- Perméabilité

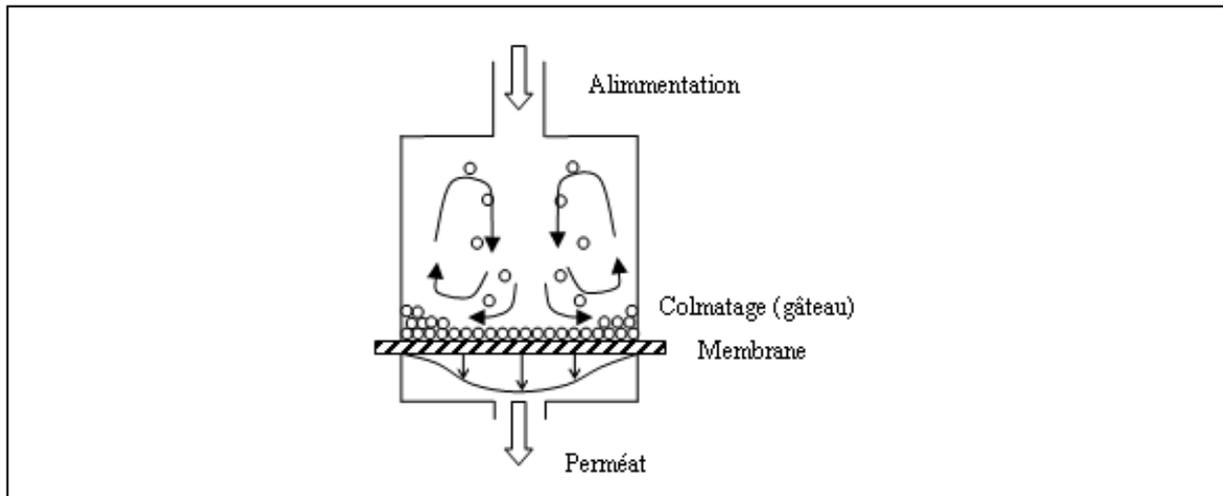
La perméabilité d'une membrane à une eau déminéralisée dépend de sa porosité. La perméabilité exprime la proportionnalité entre la vitesse de perméation à l'eau déminéralisée et la pression transmembranaire à une température donnée (unités en $\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s.Pa})$ ou équivalent). La mesure de la perméabilité permet de vérifier l'état d'une membrane, en particulier l'effet du colmatage. Comme pour les autres milieux filtrants, cette perméabilité augmente avec la température de l'eau. Les manufacturiers fournissent habituellement des corrélations empiriques qui permettent de prédire la perméabilité des membranes à différentes températures de l'eau. En première approximation, il est possible de considérer que la perméabilité d'une membrane est inversement proportionnelle à la viscosité de l'eau. À titre d'exemple, et en ne tenant compte que de l'effet sur la viscosité de l'eau, mentionnons que la perméabilité d'une membrane est approximativement divisée par 1,7 lorsque la température passe de 20 à 2°C.

I.3.10.4- Mise en œuvre des membranes

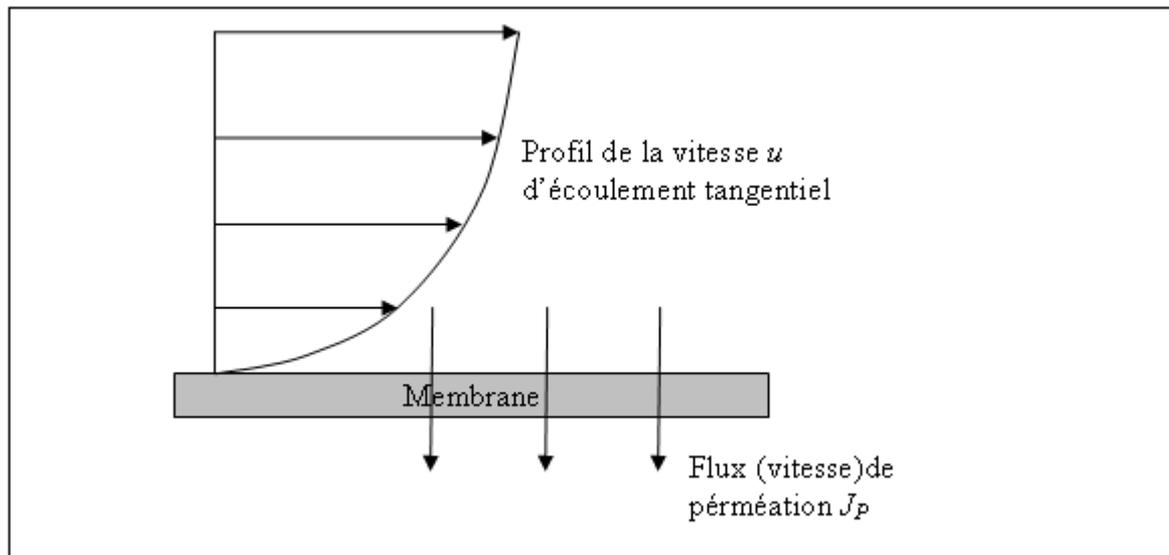
I.3.10.4.1- Modes de filtration

À l'exception de certains systèmes de MF et d'UF, qui peuvent être opérés en écoulement frontal, les procédés membranaires sont habituellement opérés selon un mode d'écoulement tangentiel aux membranes. C'est l'une des principales différences entre la filtration conventionnelle de surface et la filtration membranaire. Avec un écoulement tangentiel, l'eau à traiter ne passe pas au complet à travers la membrane.

Cellule de Filtration Frontale

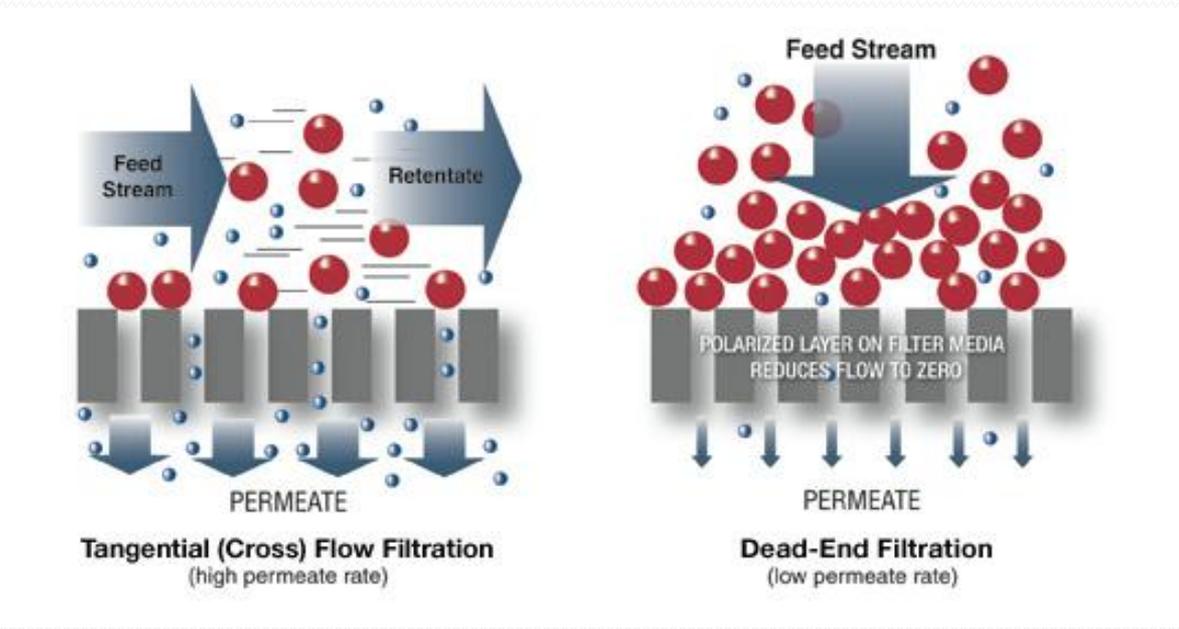


Écoulement tangentiel



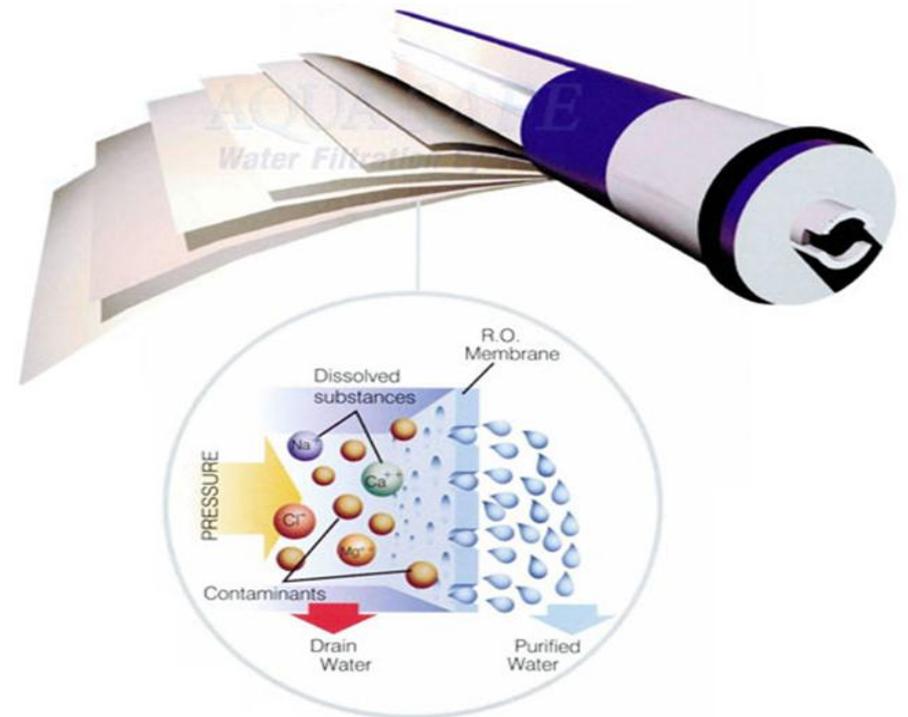
La filtration frontale crée un dépôt de produit sur la surface membranaire qui peut endommager le produit, avec une moindre productivité et un "encrassement" de la membrane.

L'encrassement réduit le taux de filtration jusqu'à ce qu'il s'arrête éventuellement. La Filtration à Flux Tangentiel (TFF) implique une nouvelle circulation du rétentat au travers de la surface membranaire. Ce doux flux tangentiel agit pour réduire l'encrassement de la membrane, maintenir un haut taux de filtration et fournir de meilleurs rendements des produits recherchés à partir des échantillons introduits dans la solution.



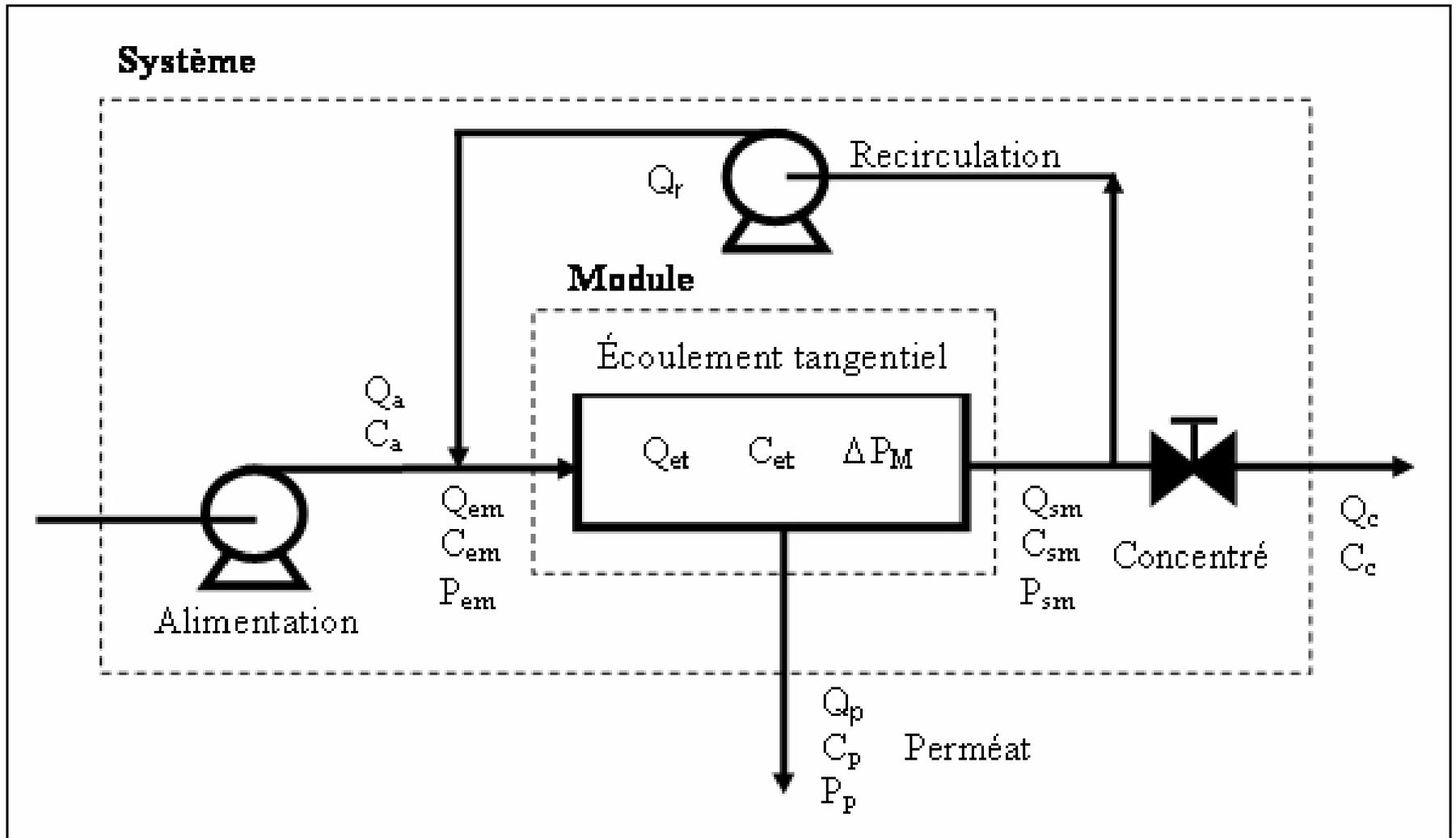
Le principal avantage de l'écoulement tangentiel, par rapport à l'écoulement frontal, est le fait que le mouvement tangentiel de l'alimentation balaie la surface de la membrane. Ce balayage accélère la remise en suspension des particules déposées ou accumulées à proximité de la membrane.

Cela accélère aussi le transport des solutés, qui tendent à s'accumuler à la surface de la membrane, vers le cœur de l'écoulement.



Le courant d'entrée appelé « alimentation » se divise en deux courants de sortie : le « perméat » qui passe à travers les pores de la membrane et le « concentré » qui est rejeté. Dans certaines configurations, le concentré peut être partiellement recirculé en amont du procédé afin d'augmenter le débit d'écoulement tangentiel Q_{et} et donc le balayage de la surface de la membrane. Cela peut aussi servir à augmenter le taux de récupération global du système TR_G , c'est-à-dire le pourcentage d'eau de l'alimentation qui passe dans le courant de perméat. L'écoulement tangentiel a été développé pour permettre de réduire l'accumulation de matière à proximité de la membrane. Cette accumulation de matière est causée par un phénomène nommé « polarisation de la concentration ». Ce phénomène entraîne une augmentation du risque de colmatage des membranes et une augmentation du gradient de pression osmotique.

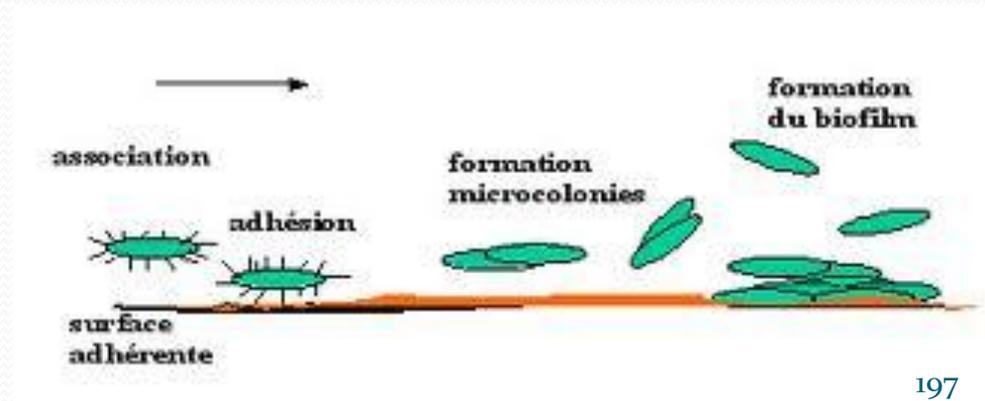
Diagramme d'un procédé membranaire sous pression à écoulement canalisé avec boucle de recirculation



Le colmatage des membranes implique qu'il est nécessaire d'effectuer des rinçages et des lavages chimiques de façon périodique afin d'enlever la matière qui s'est déposée à la surface des membranes causant ainsi une baisse de leur perméabilité. Les différents types de nettoyage, selon le type de module utilisé, sont les suivants :

- Rinçage hydrodynamique
- Rétrolavage à l'eau ou à l'air
- Nettoyage mécanique avec des balles de mousse (modules tubulaires)
- Lavages chimiques par trempage et/ou circulation d'une solution nettoyante (NaOH, HCl, détergent, désinfectant, enzymes)

Une consigne de nettoyage peut être fixée lorsque la perméabilité des membranes corrigée à 25 °C a diminué d'un certain pourcentage par rapport à sa valeur initiale au début du cycle de filtration. Des nettoyages peuvent aussi être faits à fréquence fixe pour prévenir le colmatage irréversible des membranes. Les lavages chimiques sont habituellement réalisés en cycles acides, en cycles de désinfection et en cycles basiques. Les cycles acides peuvent permettre d'éliminer le colmatage inorganique, ceux de désinfection d'éliminer le colmatage biologique tandis que les cycles basiques peuvent éliminer le colmatage par la matière organique. En général, les lavages chimiques sont plus efficaces en eau chaude (25 à 35 °C).



I.3.10.4.2- Modules membranaires

Pour les rendre opérationnelles, les membranes sont insérées dans des dispositifs compacts appelés modules membranaires. Ces modules peuvent être à écoulement libre ou bien à écoulement canalisé (insérés dans des caissons pressurisés). Les deux types de modules les plus fréquemment utilisés dans le domaine de la production d'eau potable sont les modules à fibres creuses et les modules spiralés.

Il existe aussi les modules à plaques et cadres et les modules tubulaires mais ils sont moins fréquemment utilisés dû à leur plus faible compacité.



a) Modules à fibres creuses

Les modules à fibres creuses peuvent contenir des dizaines de milliers de fibres creuses cylindriques obtenues par filage. Leur diamètre externe varie de 500 à 2000 microns tandis que leur diamètre interne varie de 350 à 1000 microns. La peau de la membrane peut être soit à l'intérieur soit à l'extérieur des fibres.



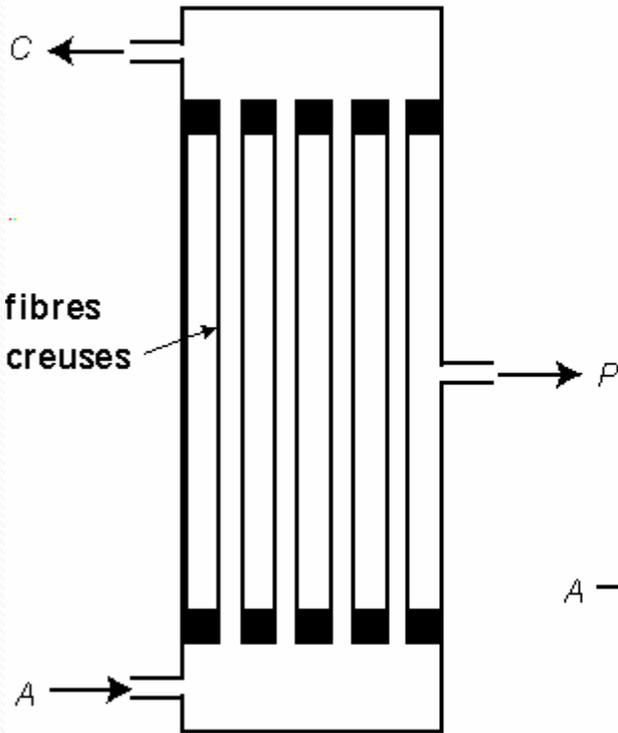


Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :

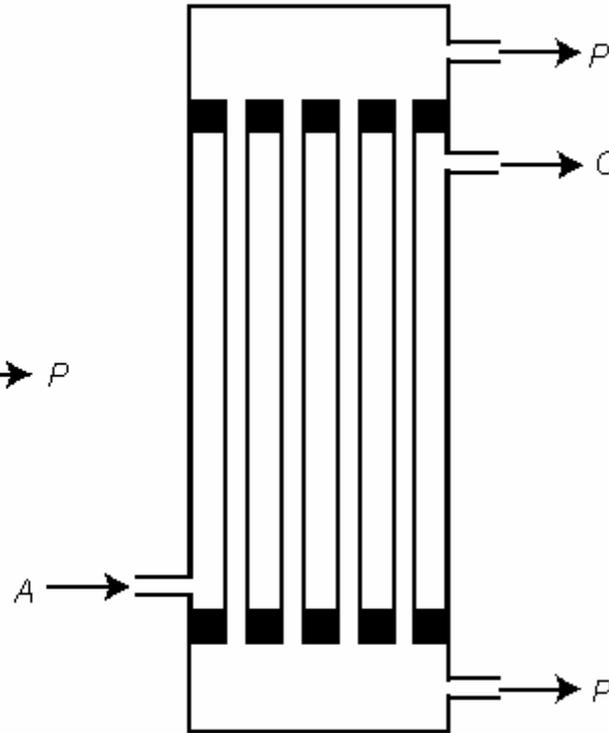
- *Configuration Int-Ext* (figure a) : comme dans les tubes, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres; il y a écoulement tangentiel canalisé à l'intérieur des fibres;
- *Configuration Ext-Int* (figures b et c) : l'eau à traiter circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres; l'écoulement entre les fibres est libre.

Modules à fibres creuses

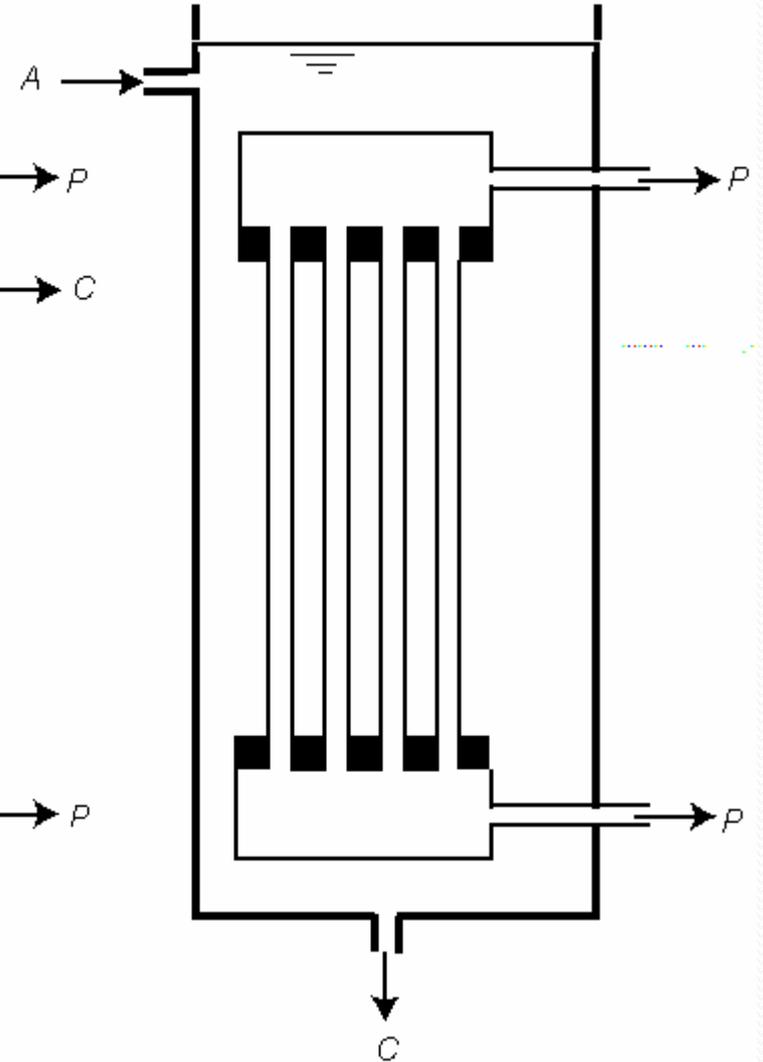
(a)



(b)



(c)

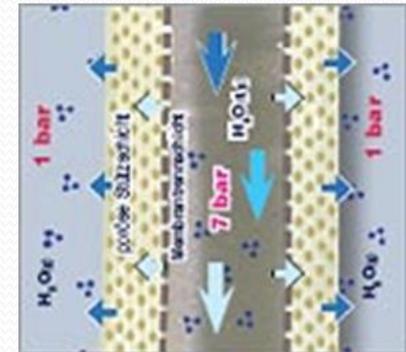
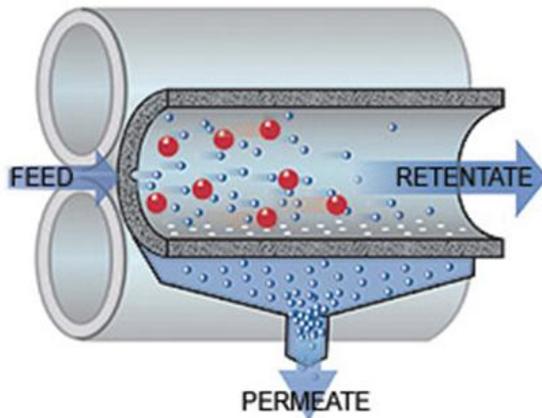


A : alimentation

C : concentré

P : perméat

Dans les deux cas, les membranes sont assemblées en faisceaux et leurs extrémités sont noyées dans des bouchons de colle qui isolent le perméat de l'eau à traiter. Un module industriel peut être constitué de dizaines de milliers de fibres. Les fibres creuses supportent des rétrolavages. L'écoulement à l'intérieur des fibres creuses devrait être laminaire.



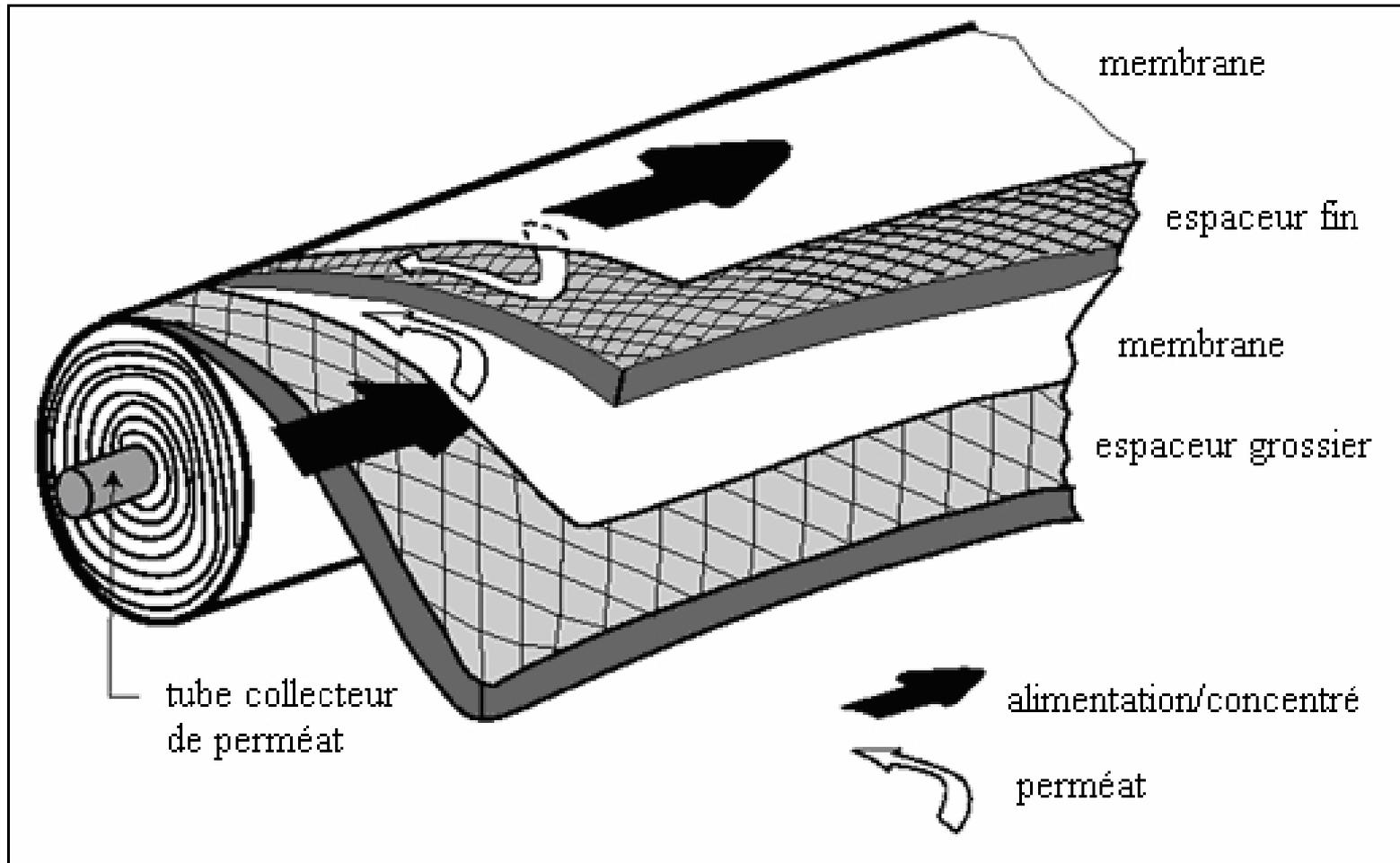
b) Modules spiralés

Les modules spiralés sont les modules les plus utilisés dans le domaine de la NF et de l'OI. Elles sont composés d'enveloppes membranaires planes enroulées de façon serrée autour d'un tube collecteur de perméat. Chaque enveloppe comprend une feuille de membrane pliée en deux de chaque côté d'une fine grille d'espacement en plastique (appelé : espaceur fin) servant à acheminer le perméat vers le tube collecteur. Les deux extrémités opposées ouvertes de l'enveloppe sont scellées ensemble avec de la colle tandis que l'extrémité opposée au pli est collée au tube collecteur perforé à cet endroit. L'espace entre chaque enveloppe constitue un canal d'écoulement tangentiel pour l'alimentation et il est partiellement comblé par une autre grille d'espacement en plastique cette fois plus grossière (appelé : espaceur grossier).

En plus d'avoir la fonction principale de séparer les enveloppes les unes des autres, l'espaceur grossier sert de promoteur de turbulence afin de minimiser le colmatage des membranes. Les enveloppes et les espaceurs grossiers sont donc disposés en alternance et ils sont ensuite enroulés ensemble autour du tube collecteur de perméat. Une couche de plastique rigide recouvre le module spiralé de forme cylindrique afin de lui conférer une résistance mécanique et de pouvoir l'insérer dans un caisson pressurisé de même forme.

Les modules industriels ont un diamètre de 0,2 m, une longueur de 1 m et contiennent environ 35 m² de surface membranaire. A priori, ce type de configuration ne permet pas de faire des rétrolavages.

Représentation simplifiée d'un module spirulé



I.3.10.4.3- Systèmes

Un système membranaire comprend essentiellement :

- Un système de prétraitement (procédé de séparation et/ou ajout de produits chimiques);
- Des pompes;
- Un système d'agitation (système à membranes immergées);
- Un ensemble de modules;
- Un post-traitement chimique.

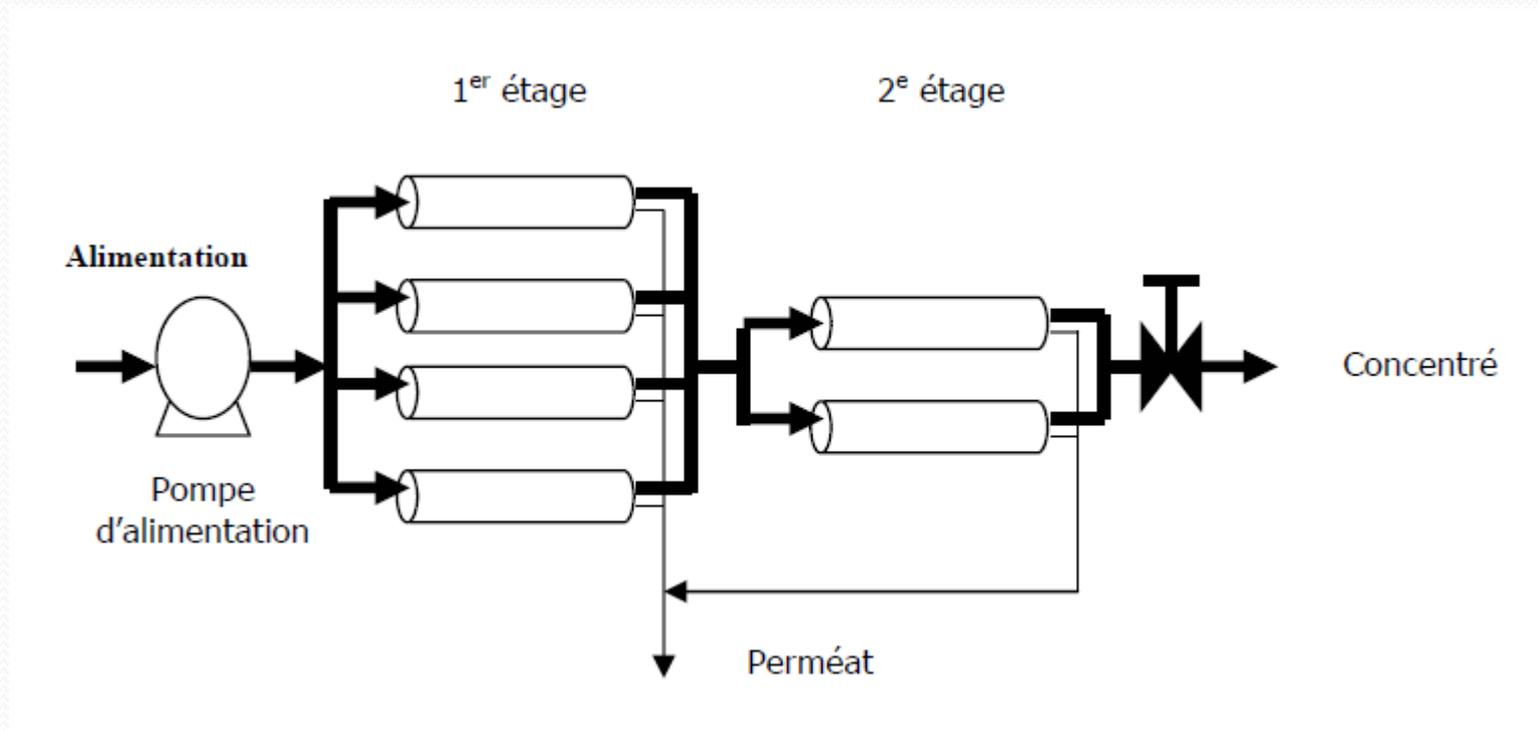


Le prétraitement vise à prévenir le colmatage prématuré des membranes et/ou l'obstruction des canaux d'écoulement tangentiels. Il peut s'agir d'un autre procédé membranaire. Les pompes servent à bâtir la pression transmembranaire. Les pompes ou un système d'agitation permettent la circulation de l'eau à traiter dans les modules ou entre les modules. La séparation est effectuée dans les modules membranaires. Le posttraitement chimique permet d'ajuster, ou de réajuster, la composition chimique de l'eau traitée.

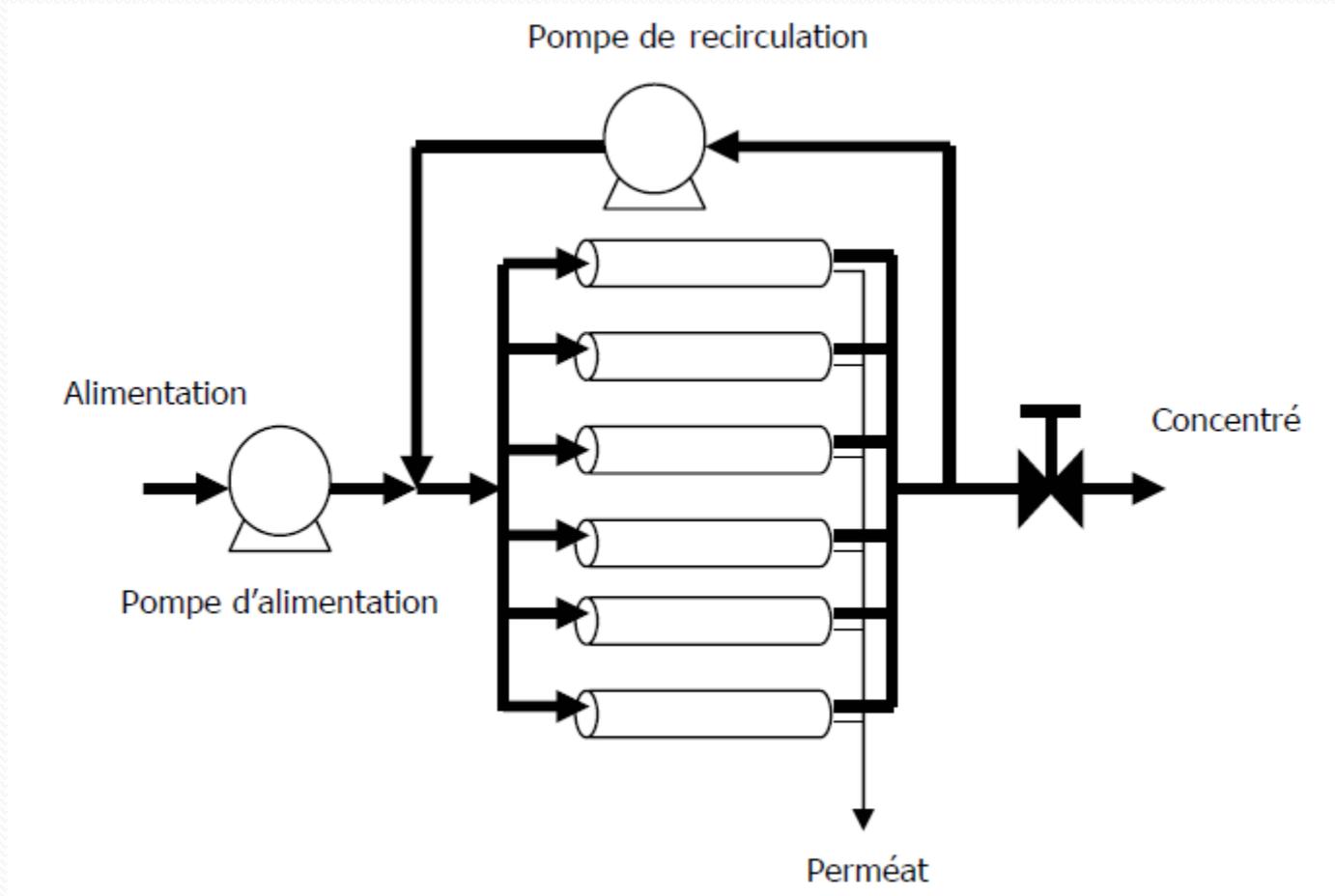
Suivant la manière dont est appliquée la pression transmembranaire, deux types de systèmes peuvent être distingués :

a) les systèmes de filtration sous pression

Exemple de configuration multi-étages

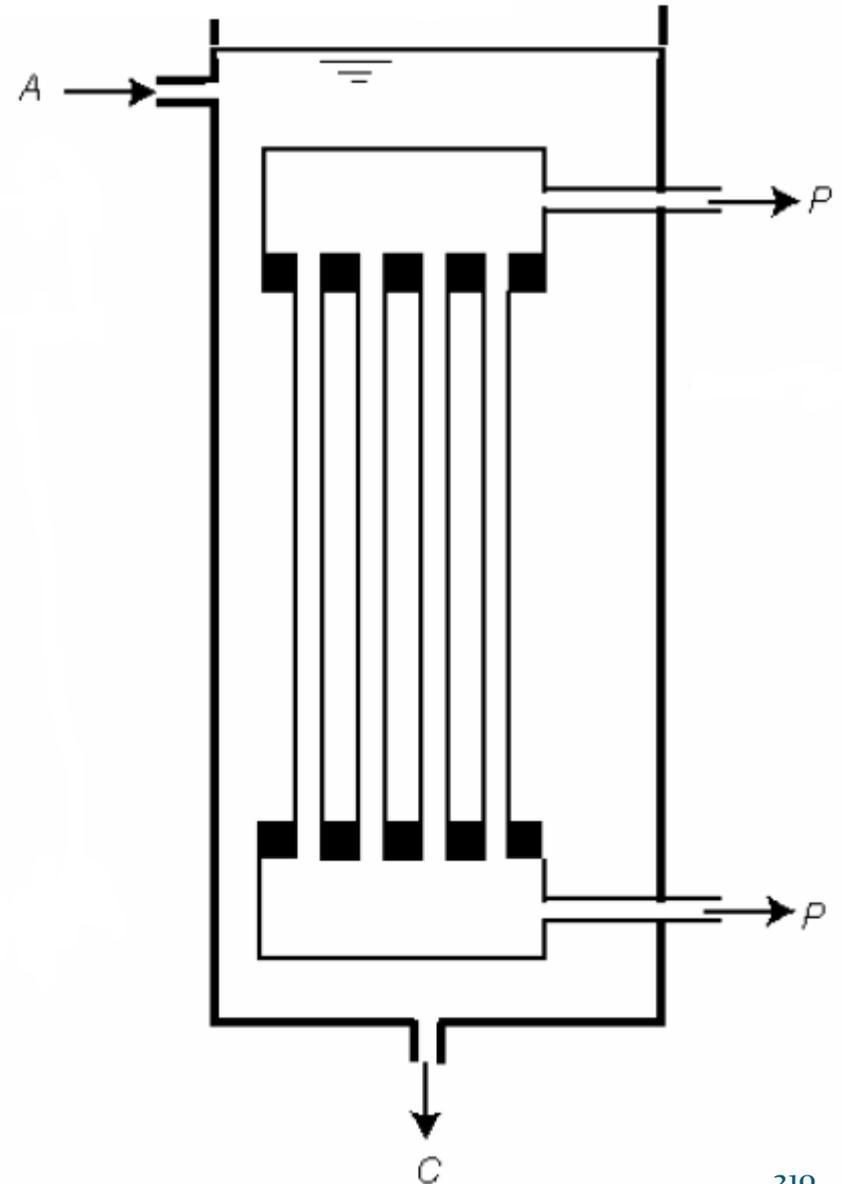


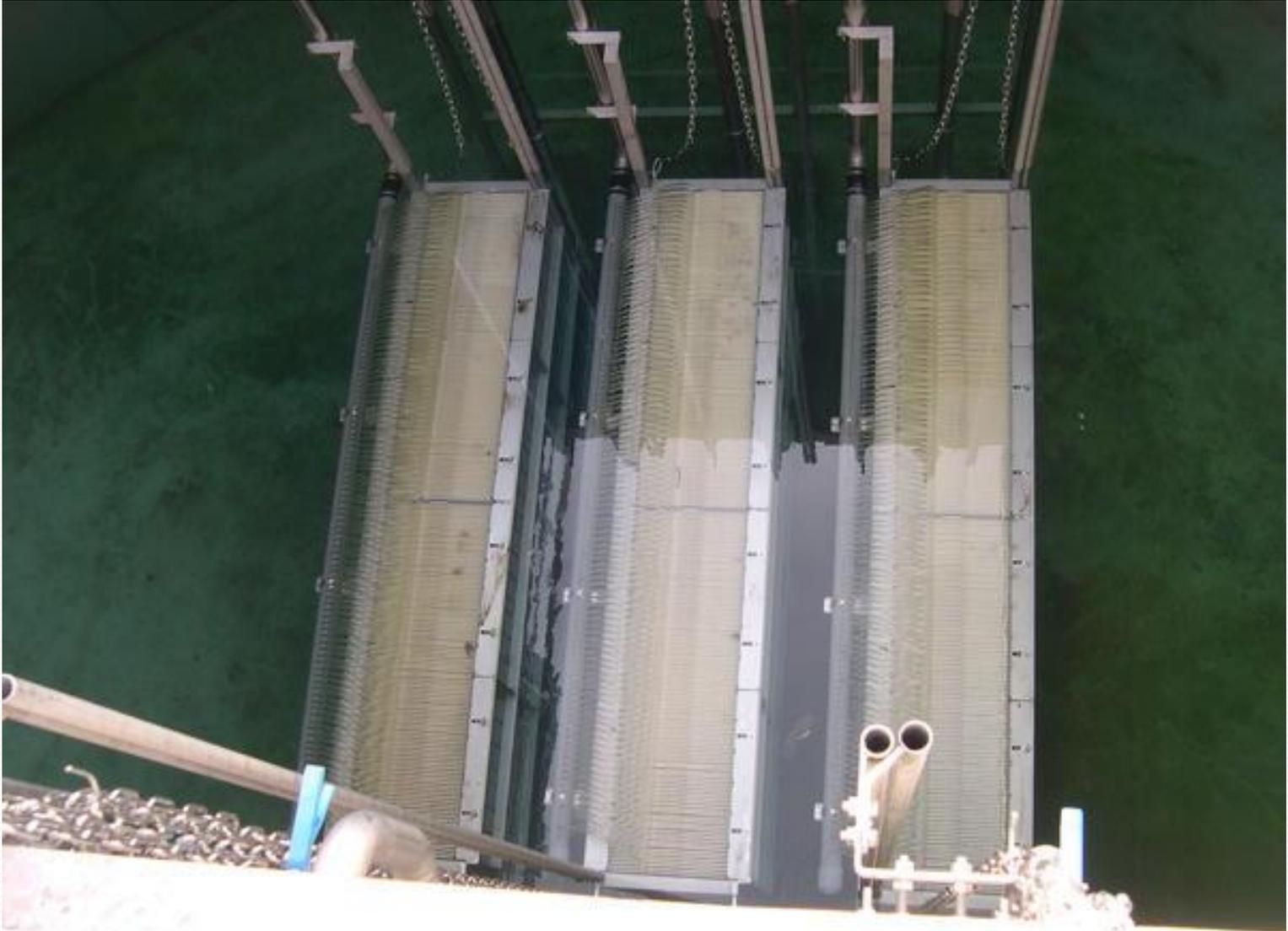
Exemple de configuration avec recirculation



b) les membranes immergées

Unités à membranes immergées





I.3.10.4.3- Règles de conception

La conception est un processus itératif car il n'est pas évident, à moins de posséder suffisamment de données sur des cas très similaires, de déterminer d'emblée quelle est la meilleure conception du point de vue économique. En premier lieu, les types de procédé et de membrane qui s'appliquent sont identifiés en fonction des objectifs de traitement. Ensuite, tout dépendant des moyens et du temps dont on dispose, plusieurs choix de modules, de configurations et de conditions d'opération peuvent être comparés en vue de trouver la solution la plus économique qui permet d'atteindre les objectifs que l'on s'est fixés. Cela peut être fait en partie de manière théorique et en partie de manière expérimentale.

a) Choix du type de membrane

L'objectif de séparation le plus contraignant devrait permettre de faire un tri dans les procédés membranaires (Classification des procédés membranaires) . En eau de surface, les membranes se distinguent essentiellement par l'enlèvement, ou non, des virus et par le niveau d'enlèvement du COT. En eau souterraine, les membranes se distinguent essentiellement par leur taux de rétention des sels.

Le matériau membranaire conditionne certaines limites de fonctionnement (pH, concentration en désinfectant, etc.). Il ne faut pas oublier qu'une filtration membranaire peut être combinée avec un autre procédé pour augmenter le taux de séparation.

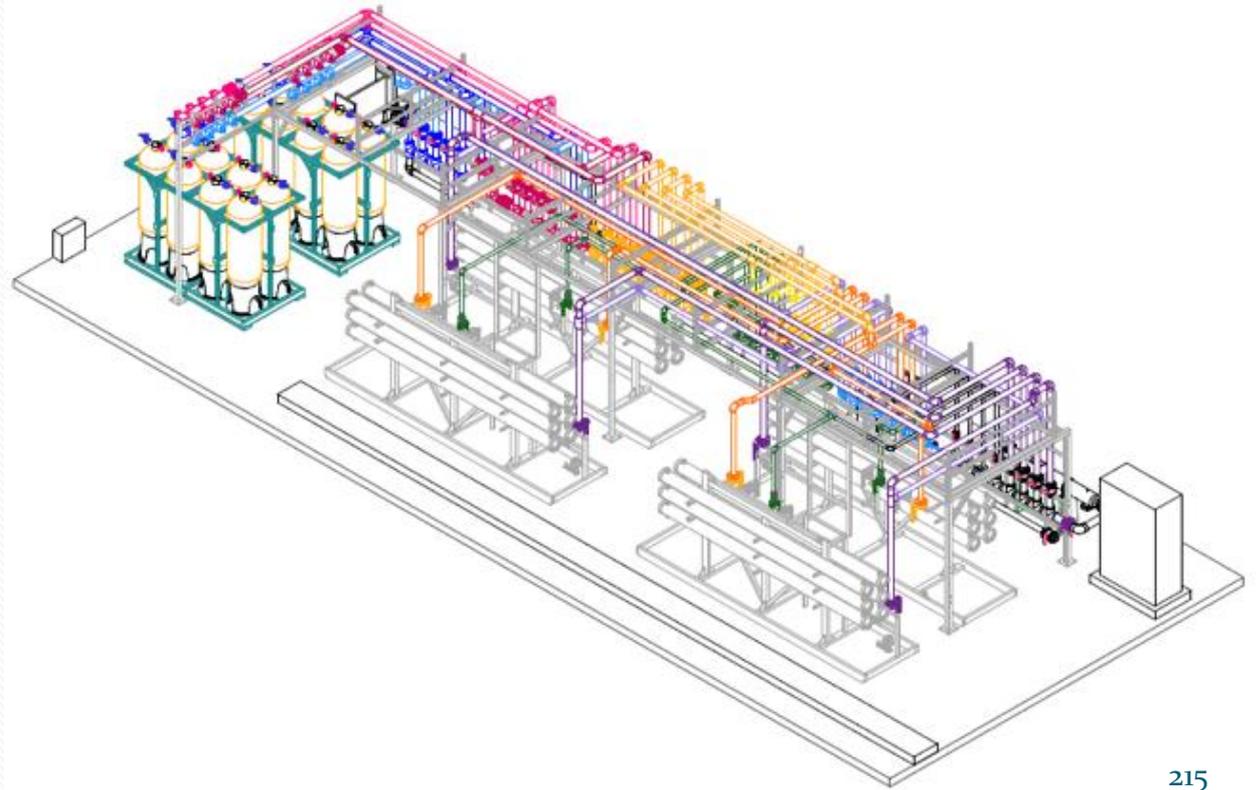


b) Choix du type de module

Pour un procédé et une membrane donnés, il peut exister plusieurs types de modules disponibles. Le choix du module va orienter grandement la conception. Comme cela a déjà été dit, il n'est pas facile d'identifier d'emblée quel type de module est le plus avantageux. Les modules se distinguent par :

- Leur compacité;
- La taille de leurs canaux d'écoulement tangentiels;

- Le dispositif qui assure l'étanchéité entre les compartiments d'eau à traiter et de perméat (lié à l'intégrité des systèmes);
- Les possibilités de mode d'opération;
- Leur plus ou moins grande facilité de montage et de démontage.



D'après Aptel et Buckley (1996) :

- Pour les modules spiralés, le ratio surface de membrane/volume de module est de 700 à 1000 m²/m³.
- Pour les modules à fibres creuses, le ratio surface de membrane/volume de module est de plus de 1000 m²/m³.

Pour une surface de membrane donnée, ce ratio détermine la taille du système.

La taille des canaux d'écoulement tangentiels a un effet sur :

- Le niveau de pré-filtration requis pour éviter d'obstruer les canaux d'écoulement tangentiels;
- L'énergie requise pour maintenir l'écoulement tangentiel;
- La perte de charge due à l'écoulement tangentiel;
- La facilité de désinfection et l'accessibilité à la surface des membranes;
- Le volume mort.

Tableau 6 Caractéristiques des modules (adapté de Aptel et Buckley, 1996)

	module spiralé	fibres creuses int-ext	Fibres creuses ext-int
Compacité	++	+++	+++
Facilité de nettoyage chimique	-	-	-
Lavage mécanique	-	-	-
Rétrolavage	-	+++	+++
Faible perte de charge (écoulement tangentiel)	++	+	+++
Pré-filtration requise	-	+	++

+++ : net avantage

- : net désavantage



Du point de vue de l'obstruction des canaux d'écoulement tangentiels, les modules à fibres creuses avec alimentation par l'extérieur des fibres peuvent être opérés sans pré-filtration ou avec une pré-filtration grossière. Les manufacturiers fournissent aussi un débit d'alimentation maximal pour chaque type de module qui est fonction de la taille et de la forme des canaux d'écoulement tangentiels, et aussi de la résistance mécanique des différents composants du module.

I.3.10.4.4- Principe du colmatage

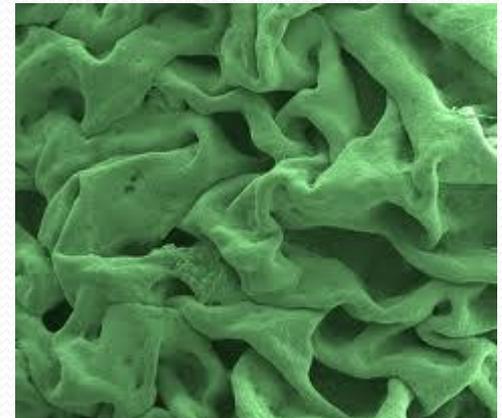
Le colmatage des membranes peut constituer un élément limitant important dans l'application des procédés membranaires à la production d'eau potable. D'abord, ce phénomène peut réduire de façon irréversible ou non la perméabilité des membranes. Cela implique donc une dépense d'énergie supplémentaire pour produire une quantité de perméat constante. Ensuite, plus le colmatage est important, plus il faudra accorder du temps et de l'argent aux lavages chimiques. La durée de vie des membranes s'en trouvera aussi réduite. Finalement, le colmatage peut aussi faire varier le pouvoir de séparation des membranes.

Il existe deux principales catégories de colmatage :

- le colmatage microbologique ;
- le colmatage abiotique.

Dans le cas d'un colmatage microbologique, des microorganismes peuvent s'attacher, croître à la surface des membranes et produire suffisamment de substances polymériques extracellulaires pour faciliter le développement d'un biofilm à la surface des membranes.

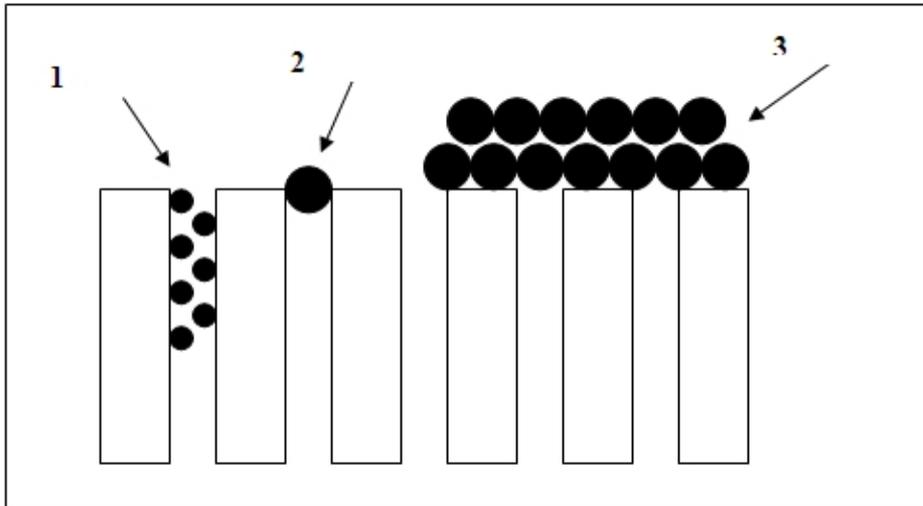
Biofilm



En plus des microorganismes il y a de nombreux éléments colmatants présents dans les eaux naturelles tel que les particules, les colloïdes, les substances organiques dissoutes et les substances inorganiques peu solubles. Toutefois, les matières inorganiques sont considérées comme peu influentes sur le colmatage par rapport à la MON dans le cas des eaux douces de surface colorées et peu minéralisées. C'est la fraction humique de la MON qui par sa nature hydrophobe contribue, a priori, le plus significativement au colmatage. Ces agents colmatants sont associés au colmatage abiotique qui peut se manifester de deux façons :

- par le dépôt de matière à l'intérieur des pores de la membrane;
- par le dépôt de matière à sa surface.

La figure ci-dessous illustre différents scénarios de colmatage abiotique d'une membrane.



Scénarios de colmatage
d'une membrane

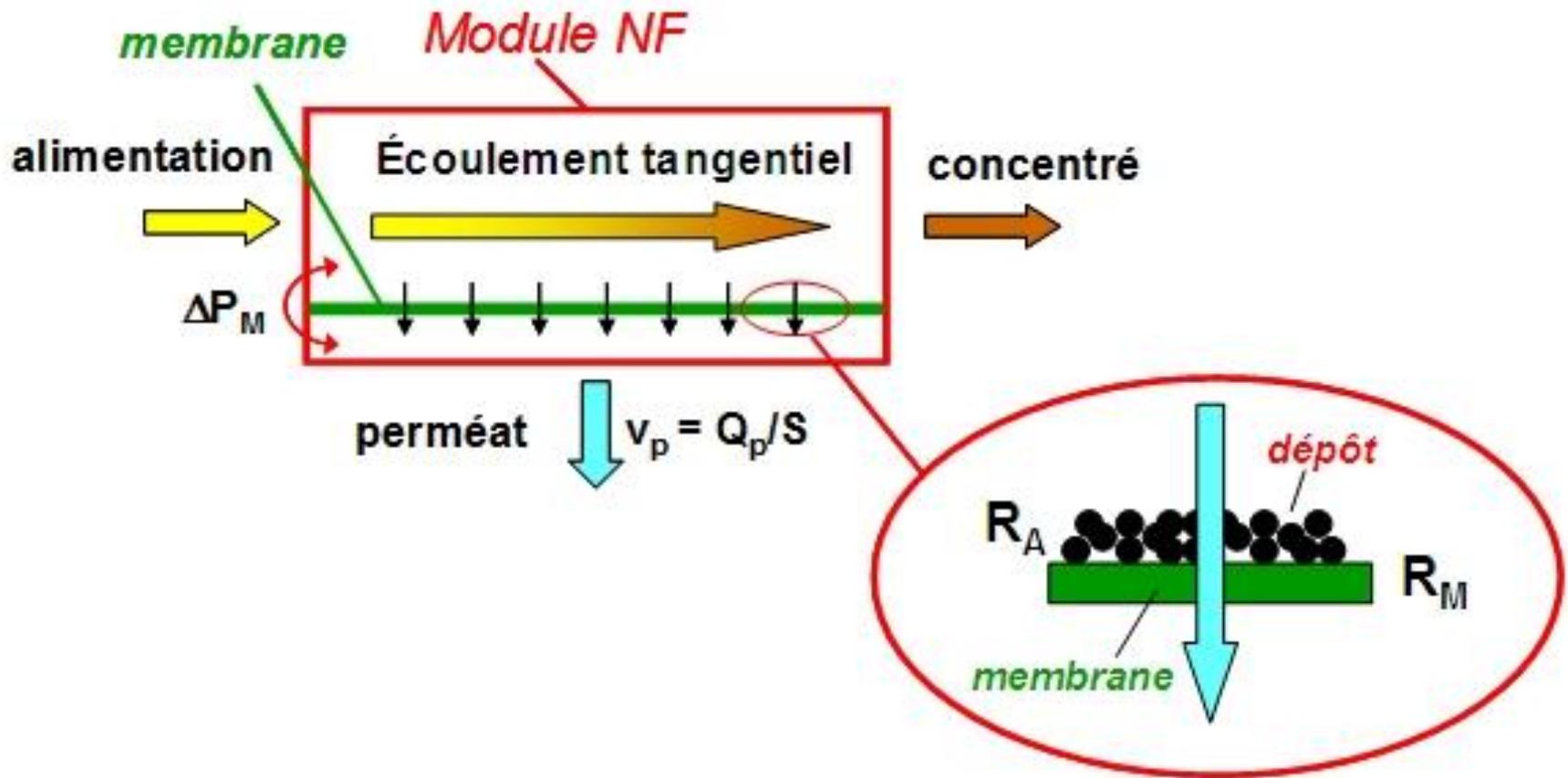
Dans le scénario 1, il y a blocage partiel du pore par l'adsorption de fines particules à l'intérieur de celui-ci. Dans le scénario 2, il y a blocage total du pore par rétention stérique d'une plus grosse particule. Enfin, dans le scénario 3, il y a formation d'un dépôt de particules à la surface de la membrane. Ce dépôt est communément appelé « gâteau ».



Le colmatage à l'intérieur ou à l'entrée des pores est un phénomène a priori très rapide tandis que le colmatage par formation d'un gâteau est un phénomène qui s'échelonne dans le temps.

Le gâteau peut être assimilable à une deuxième membrane. Il génère en effet une résistance hydraulique additionnelle à l'écoulement de l'eau à travers les pores de la membrane. Ensuite, le gâteau peut permettre une séparation plus poussée de la matière, ce qui va d'autant plus augmenter le colmatage (phénomène auto-accélération).

Le colmatage des membranes



I.3.10.4.5- Prévention du colmatage

Il existe plusieurs façons de prévenir le colmatage des membranes et l'obstruction des canaux d'écoulement tangentiels des modules membranaires. La première stratégie à préconiser est un enlèvement préalable des matières colmatantes soit par une préfiltration soit par un traitement conventionnel. La préfiltration peut s'effectuer par une autre étape de filtration membranaire de porosité plus grossière. Par exemple, il serait possible d'utiliser une étape de MF comme prétraitement à la NF. Pour les modules spiralés de NF et d'OI, le seuil de coupure de la préfiltration varie généralement de 1 à 25 μm .

Finalement, une manière simple mais qui peut s'avérer coûteuse de prévenir le colmatage irréversible des membranes est d'effectuer de fréquents nettoyages.

I.3.10.4.6- Rejets du procédé

Les chaînes de traitement utilisant des membranes produisent différents types de rejets :

concentré, eaux de rinçage, eaux de lavage.

Les techniques de disposition de ces rejets varient en fonction de leur nature et de leur volume ainsi que des conditions environnementales. Le concentré est rejeté en continu pendant la production. Rappelons que le débit et la composition du concentré sont liés au taux global de récupération et au taux global de séparation. Généralement, comme le taux de récupération est supérieur ou égal à 75%, cela signifie que le débit de concentré correspond au maximum à 25% du débit d'alimentation. Les eaux de rinçage et de lavage sont générées de manière discontinue.



Lorsque les chaînes de traitement utilisant les membranes ne comportent aucun ajout de produit chimique dans l'eau brute, les rejets des membranes ne constituent en réalité qu'un concentré des substances présentes dans l'eau brute. Sous réserve de rencontrer les objectifs environnementaux de rejet, les concentrés pourraient être rejetés directement dans le milieu récepteur.

Lorsque la chaîne de traitement comprend un ou plusieurs ajouts de produits chimiques dans l'eau brute (coagulant, oxydant, acide, agent anti-tartre, etc.), les rejets des membranes contiennent, en plus des substances présentes dans l'eau brute, les produits chimiques injectés pour traiter l'eau.

Chapitre II

Critères généraux pour les installations de traitement

II.1- Débits de conception

De la prise d'eau jusqu'à la sortie du traitement (typiquement à l'entrée du réservoir d'eau traitée), les ouvrages sont habituellement conçus sur la base de la valeur maximum du débit journalier prévu au terme de la période de conception. Ce débit doit inclure les besoins propres des installations (lavage des filtres par exemple).

Les situations particulières où le stockage d'eau traitée ne permet pas de faire face aux variations horaires de la demande méritent d'être analysées en détail.



II.2- Redondance

Pour les installations de grande capacité qui comprennent déjà plusieurs unités de traitement, le principe de redondance peut facilement être appliqué sans augmentation importante de coûts.

Par contre, pour les petites installations, certaines dérogations sont possibles pour réduire les coûts de construction. Il revient au concepteur de justifier ces dérogations en vérifiant si elles ont une implication majeure sur la qualité de l'eau distribuée.

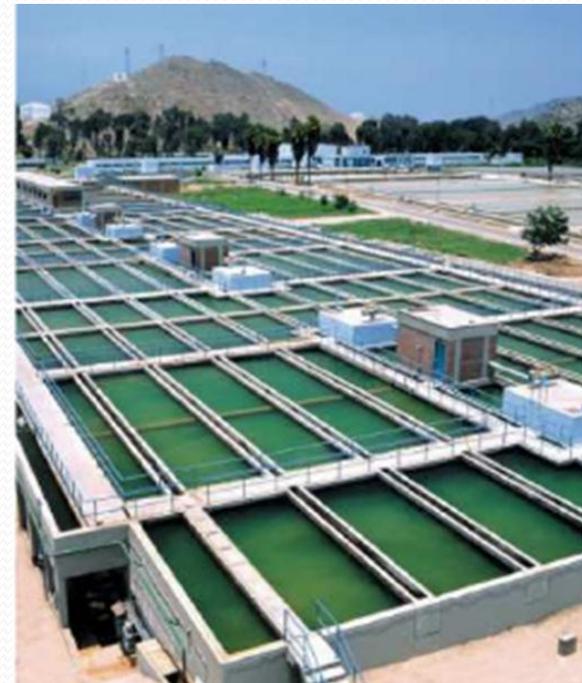


Toute installation de traitement doit être pourvue d'au moins deux unités de filtration ou plus pour une opération continue et sans interruption de service lors des travaux de d'entretien ou de réparation des filtres. Les unités de filtration doivent pouvoir traiter le débit journalier maximum de conception lorsqu'une unité de filtration est mise hors service et chaque unité de filtration doit pouvoir opérer indépendamment.

Dans le cas particulier de la filtration membranaire, l'unité de base de filtration est le caisson, lequel peut comprendre un certain nombre de modules membranaires.



La redondance des unités de traitement est laissée à la discrétion du concepteur qui doit considérer l'impact de l'arrêt d'une de ces unités sur le reste de la chaîne de traitement. Par ailleurs, lorsque le débit de conception est supérieur à $1500 \text{ m}^3/\text{j}$, il est préférable de prévoir au moins deux décanteurs pouvant répondre au minimum, au débit journalier moyen de conception lorsqu'une unité est mise hors service.



II.3- Autres éléments généraux de conception

II.3.1- Localisation de l'installation de traitement

La localisation de l'installation de traitement doit tenir compte des éléments suivants :

- L'installation de traitement doit être facilement accessible en toutes saisons;
- Tous les équipements doivent être situés dans un endroit à l'abri de toute pollution où ils ne risquent pas d'être endommagés par les inondations;

- Les autorités concernées devraient être consultées relativement à tout ouvrage qui pourrait entraver l'écoulement naturel d'un cours d'eau, tel un barrage, ou un projet impliquant le remplissage de berges;
- La localisation de l'installation de traitement doit être à l'extérieur des zones inondables;
- Les facilités d'élimination des eaux de lavage et des boues doivent privilégier le rejet à l'égout.

II.3.2- Aménagement de l'installation de traitement

L'aménagement d'une installation de traitement doit tenir compte des éléments suivants :

- L'aspect fonctionnel de l'installation de traitement;
- L'espace de laboratoire requis (incluant un comptoir avec lavabo, des prises d'analyse pour l'eau brute, l'eau traitée, l'eau désinfectée ainsi que des eaux des différentes étapes de traitement et l'espace nécessaire pour les équipements d'analyse);
- L'espace pour le bureau du ou des opérateurs;
- Les utilités sanitaires telles que toilettes et lavabo;

- La possibilité d'agrandissement futur de l'installation de traitement;
- La possibilité d'améliorer la filière de traitement dans l'éventualité d'un raffermisssement des normes;
- L'espace pour le traitement et l'élimination des boues;
- Les facilités d'accès;
- La protection du site (clôture et barrière cadenassée) contre les intrus, les vols, les sabotages et le vandalisme;
- La nature du sol et de la topographie;

- Le drainage du site et du remblayage requis pour prévenir toute entrée d'eau de surface et prévoir l'élimination de ces eaux;
- La facilité de livraison des produits chimiques dans les endroits réservés à cette fin;
- La sécurité et l'hygiène du personnel.



II.3.3- Bâtiment

La conception du bâtiment devra être faite en conformité avec les éléments suivants :

- Une ventilation adéquate, particulièrement dans les pièces abritant de l'équipement mécanique qui pourraient produire des vapeurs nocives et des produits pulvérulents (charbon en poudre, chaux, carbonate, etc.). La ventilation sera adaptée à chacun de ces produits;
- Un éclairage adéquat qui peut fonctionner à basse température (< 10°C.) et qui tient compte des besoins spécifiques à certains endroits (p. ex. lecture de cadrans ou autres tâches d'opération);

- Un chauffage adéquat et la protection des bassins contre le gel;
- Un drainage adéquat et une disposition en cas de trop-pleins des unités;
- Des planchers suffisamment lisses pour éviter l'accumulation de saleté et faciliter le nettoyage;
- Une déshumidification de l'air ambiant, si nécessaire, pour contrôler la condensation sur les équipements et ouvrages métalliques;
- La flexibilité d'opération et l'accessibilité à l'équipement en vue de l'opération, de l'entretien ou du remplacement;
- Des commodités d'opération comprenant l'installation d'escaliers, de passerelles ou de rampes partout où l'opération et l'entretien courant le requièrent;

- La sécurité de l'opérateur, c.-à-d. l'installation de dispositifs pour protéger le personnel des contacts dangereux avec l'équipement mécanique ou électrique ainsi que la disposition des tuyaux de façon à éviter les risques de s'y frapper;
- La protection contre le gel si des conduites doivent être exposées à de basses températures tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des murs;
- L'entreposage des produits chimiques et de l'équipement de dosage dans des pièces séparées, au besoin, pour réduire les risques d'accidents et les problèmes de poussières ou de fuites de gaz;
- La prévision lors de la construction des murs de béton des ouvertures requises pour permettre le passage futur des tuyaux.

- Les salles de doseurs doivent être facilement accessibles pour faciliter les services d'entretien, de surveillance et de réparation;
- Les planchers de ces salles doivent être lisses, imperméables, antidérapants et légèrement inclinés (minimum de 2,5%) pour assurer un drainage adéquat;
- Autour des bacs de solutions, des réservoirs et des conduites, on devra prévoir un système de drainage adéquat pour évacuer rapidement les déversements accidentels ou vidanger le produit chimique;

II.3.4- La prévention associée à l'utilisation spécifique d'un produit chimique

Cette section aborde les propriétés spécifiques des principaux produits chimiques en ce qui a trait à leur manutention et dosage sécuritaires. Si plus de renseignements s'avéraient nécessaires,

consulter les fiches techniques et signalétiques des réactifs fournies par le manufacturier ainsi que la réglementation à cet égard.



ça tue

Lettre inscrite : T
Produit: Très Toxique



ça explose

Lettre inscrite : E
Produit: Explosif



ça irrite

Lettres inscrites : Xi
Produit: Irritant



ça fait flamber

Lettre inscrite : O
Produit: Comburant



ça ronge

Lettre inscrite : C
Produit: Corrosif



ça flambe

Lettre inscrite : F
Produit: Inflammable



ça empoisonne

Lettres inscrites : N
Produit: Nocif

II.3.5- Éléments particuliers de conception

a) Protection des réservoirs d'eau claire

S'assurer que les bassins d'eau claire ne seront pas contigus à des bassins d'eau non-potable. Si c'est le cas, séparer les bassins par un mur ou une cloison double. Pour les installations existantes ayant un mur ou une cloison simple, la situation actuelle peut être maintenue en autant qu'une inspection régulière est réalisée et ne révèle pas un problème d'étanchéité. Dans le cas d'unités préfabriquées en acier placées sur une base de béton au-dessus du réservoir d'eau claire, l'exigence mentionnée précédemment ne s'applique pas, car de telles installations sont munies d'un double fond.

b) Génératrice d'urgence

Une génératrice d'urgence peut être exigée lorsque l'eau doit être traitée et/ou pompée dans le réseau de distribution durant les pannes de courant. Elle sera nécessaire notamment dans les cas où la panne entraînerait une cessation complète du service (p. ex., lorsqu'il n'y a pas de source auxiliaire d'urgence à la source principale);



c) Filtres gravitaires

- Les filtres doivent être logés dans une bâtisse chauffée;
- Les drains de toit ne sont pas acceptés sur les filtres;
- Les fenêtres donnant directement sur les filtres sont à déconseiller afin d'éviter le développement des algues;
- Un éclairage adéquat de la surface des filtres est nécessaire pour la surveillance des matériaux en expansion. Un dispositif, règle graduée ou autre, doit être installé à l'intérieur des filtres de manière à pouvoir suivre la hauteur du lit de matériaux filtrants en place au fil des lavages;

- Les murs intérieurs des filtres doivent être lisses et verticaux;
- Des rebords d'une hauteur minimale de 90 mm et des garde-corps sont exigés autour des filtres;
- Les passerelles d'accès aux filtres doivent avoir une largeur minimale de 600 mm et être localisées pour permettre une inspection et un entretien faciles;
- Le milieu filtrant sera lavé et tamisé et exempt de matières étrangères.

d) Filtres au sable vert, sur média conditionné et autres médias

Les accessoires requis sur chaque filtre sont :

- Un système de contrôle du débit pour assurer l'équipartition entre les filtres;
- Un système d'isolation à l'entrée et à la sortie de chacun des filtres;
- Une jauge de perte de charge;
- Une prise d'échantillonnage d'eau brute et d'eau filtrée;

e) Conduites d'alimentation

- Les conduites d'alimentation des réactifs chimiques doivent être :
 - ✓ Aussi courtes que possible;
 - ✓ Durables et résistantes au choc et à la corrosion;
 - ✓ Protégées contre le gel;
 - ✓ Accessibles sur toute la longueur;
 - ✓ Faciles à nettoyer;
- Les conduites transportant les gaz doivent être inclinées vers le haut à partir du cylindre vers les doseurs;
- Les conduites d'alimentation doivent être conçues en fonction de la caractéristique de la solution à transporter. Pour les solutions corrosives, elles doivent assurer une application efficace avec un minimum de risques de corrosion pour les équipements communs.

- Identification des conduites :

le code de couleurs suivant est recommandé pour la tuyauterie des installations de traitement d'eau potable.

NATURE DU CONTENU	COULEUR
Conduites d'eau	
Eau brute	Vert olive
Eau après clarification	Aqua
Eau traitée	Bleu-aqua
Conduites de produits chimiques	
Alun ou coagulant primaire	Orange
Ammoniaque	Blanc
Suspension de charbon	Noir
Caustique	Jaune avec bandes vertes
Chlore (gaz ou solution)	Jaune
Lait de chaux	Vert clair
Ozone	Jaune avec bandes oranges
Composés phosphatés	Vert clair avec bandes rouges
Polymères ou aide-coagulants	Orange avec bandes vertes
Permanganate de potassium	Violet
Carbonate de sodium	Vert clair avec bandes oranges
Acide sulfurique	Jaune avec bandes rouges
Bioxyde de soufre	Vert clair avec bandes jaunes
Rejets liquides	
Eau de lavage	Brun clair
Boues	Brun foncé
Égout	Gris foncé
Autres conduites	
Air comprimé	Vert foncé
Gaz	Rouge
Autres conduites	Gris clair
Divers	
Poignées de vannes, équipement contre le feu	Rouge
Pompes et moteurs	Même couleur que les tuyaux ou d'une teinte plus pâle ou plus foncée
Moteurs d'urgence	Orange brûlé
Vacuum	Gris foncé



Par ailleurs, l'identification descriptive des conduites comporte de nombreux avantages sur le code de couleurs. Il diminue les coûts de maintenance et d'inventaire de peinture, en plus de permettre une plus grande précision que celle du code de couleurs.

L'identification descriptive doit comprendre : le nom de la substance, le sens de l'écoulement et les sources de dangers, telles que gaz toxique ou explosif, acides, eau chaude, vapeur, etc.

f) Eau de service

- L'eau utilisée pour la dissolution des produits solides, pour la dilution des solutions ou pour l'alimentation des pompes doseuses doit être potable et désinfectée adéquatement. Elle doit être en quantité suffisante, d'une pression adéquate et suffisamment adoucie lorsque requis. Quand l'eau est utilisée pour la préparation d'une solution spécifique par dilution, les mesures de débit sont exigées (dosage des solutions de fluorures);
- Les conduites d'eau alimentant les pompes doseuses devront être munies de vannes antiretour.

II.3.6- La prévention dans la conception d'une installation de production d'eau potable

Afin de déterminer les mécanismes de prévention qui devront être retenus à chacune des étapes de traitement, il faut déterminer, dans un premier temps, les dangers qu'elles représenteront pour le travailleur dans l'exercice de ses fonctions. Souvent, les risques apparaissent lorsque le travailleur doit intervenir à des fins d'entretien sur les infrastructures et les équipements relatifs à un procédé. Ils prennent de l'ampleur à partir du moment où il pénètre à l'intérieur des bassins, goulottes et conduites, qui sont dans la plupart des cas des espaces clos. Ces postes de travail peuvent constituer un piège et sont donc hautement risqués pour quiconque y accède.

Les tableaux qui suivent mettent en relief les dangers que peuvent représenter les postes de travail pour le travailleur. Dans un deuxième temps, le concepteur s'assurera que les mécanismes de prévention à la source retenus seront aptes à faire face aux dangers qui découlent des différentes tâches. À cet effet, une deuxième série de tableaux résumant les options qui s'offrent à lui. Encore une fois, il s'agit de considérations d'ordre général. Un poste de travail en particulier peut comporter des risques n'apparaissant pas dans les tableaux.

Abréviations utilisées dans les tableaux :

- NA : non-applicable;
- AV : à vérifier;
- X : inhérent au poste de travail;
- SPR : selon le procédé retenu.

Tableau : Risques encourus par le personnel dans les différents postes de travail

ÉNUMÉRATION DES RISQUES PAR POSTE DE TRAVAIL (TABLEAU 1 DE 3)	Dégrillage	Poste de relèvement	Bassins de mélange / de floculation	Décanteur	Filtre gravitaire	Bassin d'ozonation	Réservoir distribution d'eau potable	Autres procédés
Chute dans les puits mouillés ou dans un bassin	X	X	X	X	X	X	X	AV
Noyade par immersion dans les eaux	X	X	X	X	NA	X	X	AV
Glissade sur une surface mouillée ou rendue glissante par l'apport d'eau, de sédiments ou de boue	X	X	X	X	X	X	X	AV
Blessure à un ou des membres lors d'une remise en marche inopinée des pompes ou des appareils mécaniques lors de leur entretien	X	X	X	X	X	NA	X	AV
Dégagement instantané de pression lors du travail sur une conduite pressurisée ou sur ses accessoires (vanne, clapet, régulateur de pression, pompe, etc.)	X	X	X	X	NA	X	X	AV
Submergence accidentelle du bassin lors des travaux de vidange et de nettoyage	X	X	X	X	X	X	X	AV
Chute d'équipements ou d'accessoires d'un palier à l'autre, particulièrement au moment de leur levage	X	X	X	X	X	X	X	AV

ÉNUMÉRATION DES RISQUES PAR POSTE DE TRAVAIL (TABLEAU 2 DE 3)	Dégrillage	Poste de relèvement	Bassins de mélange / de floculation	Décanteur	Filtre gravitaire	Bassin d'ozonation	Réservoir distribution d'eau potable	Autres procédés
Entraînement et coincement aux orifices d'aspiration des pompes	NA	X	NA	NA	NA	NA	X	AV
Infection contractée au contact d'eaux, sédiments et équipements contaminés	X	X	X	X	X	NA	NA	AV
Contact avec des produits de lubrification servant à l'entretien des équipements	X	X	X	X	X	NA	X	AV
Isolement dans un espace clos que constitue un bassin ou un puits mouillé ou sec	X	X	X	X	NA	X	X	AV
Contamination de l'air ambiant par des produits chimiques utilisés pour nettoyer ou désinfecter	X	X	X	X	X	X	X	AV
Émanation d'un réactif volatil se dosant à cette étape de traitement ou encore en amont	X	X	X	X	X	X	X	AV
Contamination de l'air ambiant par des produits chimiques volatils utilisés pour l'entretien des équipements en espace clos	X	X	X	X	X	X	X	AV
Électrisation lors d'emploi d'outillage électrique ou de travaux sur les composantes électriques du procédé	X	X	X	X	X	X	X	AV

ÉNUMÉRATION DES RISQUES PAR POSTE DE TRAVAIL (TABLEAU 3 DE 3)	Dégrillage	Poste de relèvement	Bassins de mélange / de floculation	Décanteur	Filtre gravitaire	Bassin d'ozonation	Réservoir distribution d'eau potable	Autres procédés
Vandalisme dû à l'isolement du poste de relèvement et/ou de traitement	X	X	X	X	X	X	X	AV
Éclairage insuffisant lors d'intervention dans l'espace clos que constituent les puits mouillés ou les bassins	X	X	X	X	NA	X	X	AV
Refroidissement en présence d'eau froide et de l'humidité ambiante	X	X	X	X	NA	X	X	AV
Incendie de composantes électriques (filage, transformateur, démarreur, moteur, etc.)	X	X	X	NA	NA	NA	X	AV
Exposition aux bruits provenant de la mécanique de procédé	NA	X	NA	NA	NA	NA	X	AV

Tableau 15-4 Prévention à la source à implanter dès l'étape de conception

PRÉVENTION À LA SOURCE PAR POSTE DE TRAVAIL (TABLEAU 1 DE 2)	Dégrillage	Poste de relèvement	Bassins de mélange / de Flocculation	Décanteur	Filtre gravitaire	Bassin d'ozonation	Réservoir distribution d'eau potable	Autres procédés
Le pourtour d'un bassin ouvert doit être muni en tout temps de garde-corps réglementaires	X	NA	X	X	X	NA	NA	SPR
Il y a lieu de munir les regards et trappes d'accès de garde-corps démontables afin de prévenir les chutes lorsqu'ils sont ouverts	X	X	X	X	X	X	X	SPR
Lorsque la profondeur de descente dépasse trois mètres il faut prévoir l'installation de paliers et de crinolines de sécurité ou l'emploi d'un dispositif anti-chute	X	X	X	X	X	X	X	SPR
Pour évacuer l'eau et les saletés pouvant s'accumuler sur le plancher, installer des goulottes et des drains alimentant un puisard d'évacuation	X	X	X	X	X	NA	X	SPR
Doter tous les mécanismes de transmission externes de gardes de protection amovibles	X	X	X	X	X	X	X	SPR
Munir les équipements (mécaniques, hydrauliques, pneumatiques, électriques et autres) de dispositifs de verrouillage afin d'intervenir sur ceux-ci de façon sécuritaire lors d'entretien ou de réparation	X	X	X	X	X	X	X	SPR

PRÉVENTION À LA SOURCE PAR POSTE DE TRAVAIL (TABLEAU 2 DE 2)	Dégrillage	Poste de relèvement	Bassins de mélange / de Floculation	Décanteur	Filtre gravitaire	Bassin d'ozonation	Réservoir distribution d'eau potable	Autres procédés
Indiquer clairement la charge maximale autorisée sur les dispositifs de levage employés pour soulever les équipements	X	X	X	X	NA	NA	X	SPR
Identifier comme espaces clos les puits, goulottes et bassins	X	X	X	X	X	X	X	SPR
L'installation de tapis non conducteurs permet, dans les endroits à risques, de limiter les dangers d'électrisation	X	X	NA	NA	NA	NA	NA	SPR
Prévoir les infrastructures limitant l'accès aux stations de relèvement et postes de traitement qui se trouvent à l'écart des installations principales ou en milieu isolé	X	X	X	X	X	X	X	SPR
Installer des disjoncteurs différentiels pour personnes (GFI) sur les prises monophasées de 120/240 volts situées à proximité des puits mouillés, goulottes et bassins	X	X	X	X	X	X	X	SPR
Munir le poste de travail d'extincteurs de type ABC en nombre suffisant	X	X	X	X	X	X	X	SPR
Fournir une bouée de sauvetage munie d'un câble lorsque la surface du bassin est ouverte, ne serait-ce qu'en partie	X	NA	NA	X	X	NA	NA	SPR
Isoler du reste de la station, chauffer et ventiler séparément	X	NA	NA	NA	si biofiltre	NA	NA	SPR

II.4 Services d'eau à la station

II.4.1 Eau potable

L'approvisionnement en eau potable d'une installation de traitement doit être effectué à partir d'un point d'eau où tous les produits chimiques auront été complètement mélangés.

II.4.2 Eau non potable

- Toute sortie d'eau non potable doit être clairement identifiée comme telle, de même que tout tuyau souterrain ou exposé;
- Le nombre de sorties d'eau non potable devrait être réduit au minimum pour réduire les risques d'erreur.

II.4.3 Robinets d'échantillonnage

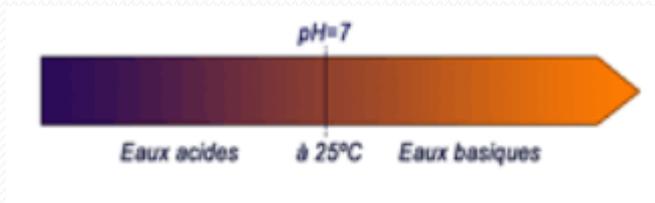
- Des robinets d'échantillonnage doivent être placés de façon à pouvoir prélever des échantillons d'eau de chaque source et du point approprié de chaque unité de traitement;
- Des robinets d'échantillonnage doivent être prévus à tout point du système susceptible d'être contaminé;
- Les robinets utilisés pour le prélèvement d'échantillons pour fins d'analyses microbiologiques doivent être de type lisse sans tamis ou autres pièces susceptibles de devenir une source de contamination.

Chapitre III

Stabilisation et contrôle de la corrosion

III.1- Introduction

Certains traitements impliquant l'ajout de produits chimiques, comme des coagulants, altèrent la stabilité de l'eau en modifiant l'équilibre calco-carbonique. En conséquence, dans certains cas, l'équilibre de l'eau doit être réajusté en cours ou en fin de traitement pour assurer sa stabilité durant la distribution. Le réajustement de l'équilibre calco-carbonique de l'eau peut aussi être requis pour des eaux naturelles, désinfectées ou non, car il suffit d'un pH un peu abaissé ou d'une minéralisation affaiblie pour créer un déséquilibre.



Les eaux destinées à la consommation humaine doivent avoir un pH compris entre 6,5 et 8.



On parlera par exemple de corrosion acide du fer pour des pH inférieurs à 9,5...

D'une façon générale, les ajustements requis dépendent :

- i. de la qualité de l'eau brute;
- ii. du traitement appliqué;
- iii. des matériaux avec lesquels elle entre en contact;
- iv. des conditions hydrauliques du réseau de distribution.

À cause de ces interactions souvent complexes, chaque cas doit être traité de façon individuelle et faire l'objet d'essais de traitabilité.

III.2- Définitions

La corrosion interne est la détérioration de la paroi ou du revêtement intérieur d'une conduite résultant de réactions chimiques ou physiques avec l'eau. Cette dégradation peut découler :

- de l'érosion mécanique du revêtement



P. Ex. Un écoulement trop rapide provoque l'usure d'un coude

- de la mise en solution des matières composant le revêtement ou la paroi de la conduite ou encore de réactions électrochimiques érodant le métal des parois.



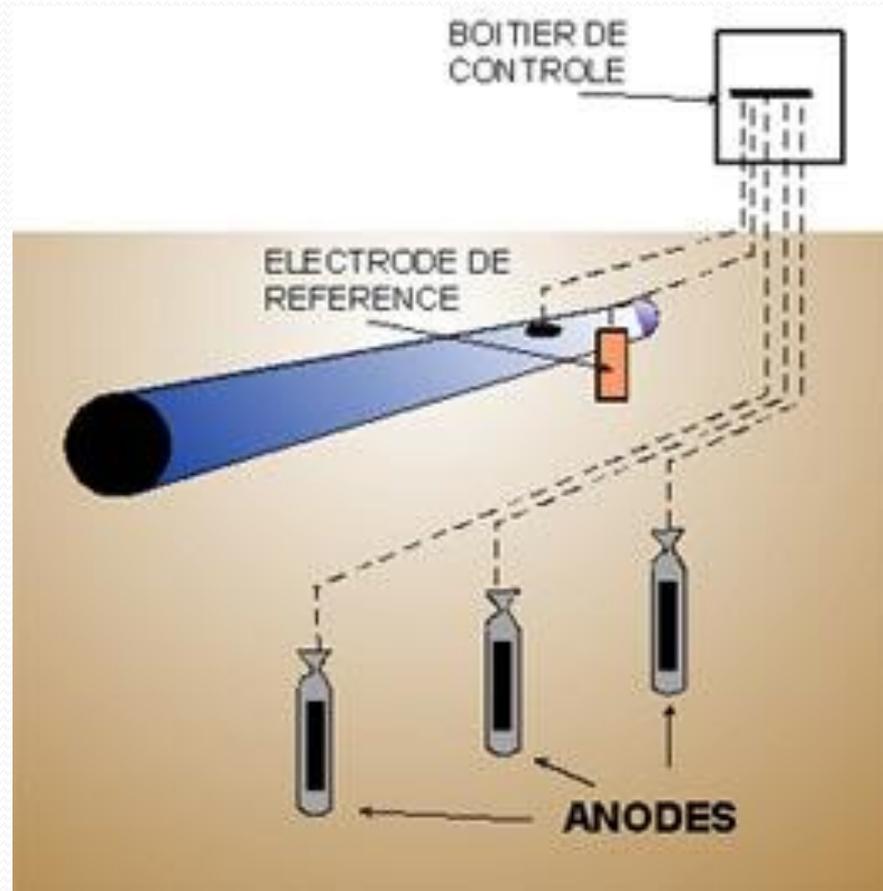
L'*agressivité* d'une eau peut être définie comme sa propension à dissoudre les métaux avec lesquels elle est en contact.

Par opposition, une eau *entartrante* est une eau qui a tendance à précipiter les carbonates de calcium pouvant ainsi laisser un dépôt sur les métaux avec lesquels elle est en contact.

La *protection cathodique* est une inhibition de l'échange électronique entre l'anode et la cathode (précipitation à la cathode).



La *protection anodique* vise la mise en place d'une couche de passivation résistante à la corrosion.



La *séquestration* est la formation, suite à l'ajout de réactifs chimiques, de complexes chimiques assez stables pour maintenir une certaine quantité de sous-produits de la corrosion en solution. En absence de séquestrants (silicates ou polyphosphates), le fer soluble issu de la corrosion précipite en milieu alcalin oxygéné et provoque l'apparition d'une couleur ocre.



III.3- Problèmes associés à une eau corrosive ou entartrante

La corrosion se manifeste par :

- i. la formation de tubercules sur les parois des conduites;
- ii. l'apparition d'une couche d'oxydes ou de piqûres;
- iii. l'amincissement de la paroi;
- iv. La mise en solution de métaux.

Il en résulte une dégradation de la qualité de l'eau, une diminution des performances hydrauliques ainsi qu'une augmentation des coûts de distribution de l'eau attribuable :

- À l'augmentation du coût de pompage relié aux dépôts et à la friction hydraulique;
- Au relargage de particules de rouille;
- À l'augmentation des activités biologiques;
- À l'augmentation de la concentration en fer, en cuivre ou en plomb (effet sur la santé);
- Aux plaintes des consommateurs liées à la couleur de l'eau ou à son mauvais goût;
- À la perte d'eau ou de pression d'eau causée par des bris de conduites. La diminution de la pression causée par un bris ou pendant la réparation augmente le risque d'intrusion de contaminants dans le réseau;

- À l'augmentation de la demande en chlore, ce qui nécessite l'augmentation des dosages aux usines, voire même l'installation de points d'interchloration sur le réseau. Des dosages plus élevés de chlore augmentent le risque de formation de sous-produits de la chloration comme les trihalométhanes (THM);
- À la diminution de la protection des incendies liée à la diminution potentielle du débit;

- À l'augmentation du coût de traitement des eaux usées : le dégagement de sous-produits de corrosion sur toute la longueur du réseau de distribution et de la tuyauterie privée ainsi que l'ajout d'inhibiteurs de corrosion contenant des phosphates ou des métaux (comme le zinc) constituent parfois des sources de contamination importantes pour les installations d'épuration des eaux usées. Cela peut aller jusqu'à les empêcher de respecter les normes de rejet ou d'élimination des boues;
- Aux réclamations des citoyens pour des souillures sur la lessive et pour des dégâts d'eau dans les domiciles exigeant le remplacement du réseau interne de distribution;
- Au remplacement des chauffe-eau.

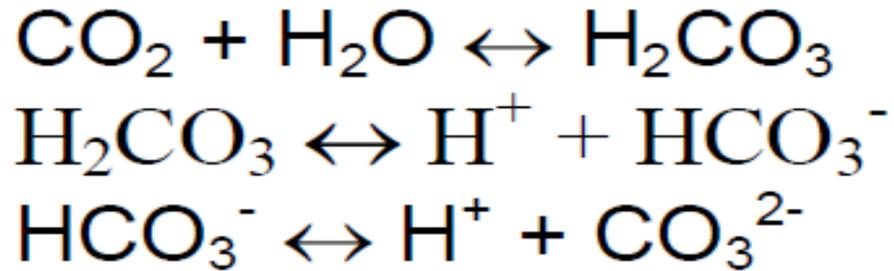
Une eau entartrante est caractérisée par sa capacité à précipiter du carbonate de calcium. Le principal impact de ce type d'eau est l'augmentation du coût de pompage due aux dépôts et à la friction hydraulique. Certaines conduites peuvent être complètement obstruées, ce qui peut entraîner soit leur remplacement, soit un curage suivi d'une réhabilitation (application d'un revêtement (ciment ou époxy) sur les parois internes d'une conduite).

Revêtement Époxy

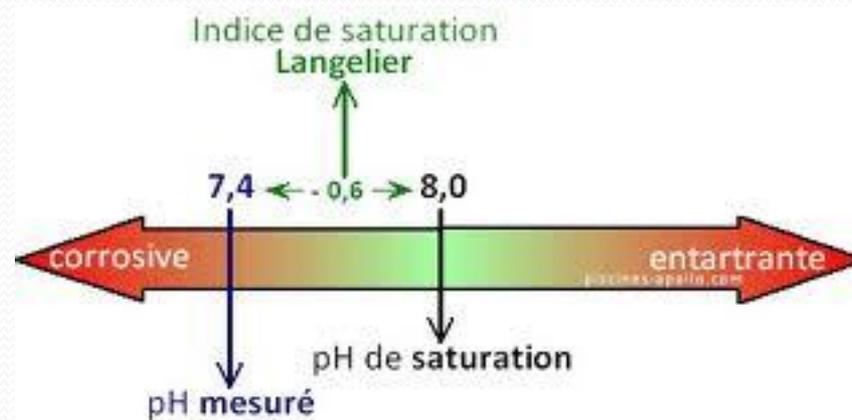


III.4- Facteurs qui influencent la corrosion ou l'entartrage

L'agressivité de l'eau est contrôlée par trois équations fondamentales :



Le caractère agressif ou incrustant d'une eau est régi par le pH de saturation (pH_s). Si le pH de l'eau est inférieur à son pH_s, l'eau dissout le calcaire : elle est alors dite « agressive ». Si le pH de l'eau est supérieur à son pH_s, elle tend à précipiter le calcaire et est alors dite « incrustante ». Si le pH de l'eau est égal à son pH_s, elle est alors dite « à l'équilibre ».



La corrosivité de l'eau dépend de ses caractéristiques, des conditions hydrauliques (vitesse de l'eau, temps de séjour), de la température ainsi que de la nature des matériaux avec lesquels elle entre en contact. La croissance bactérienne dans un réseau de distribution contribue à la corrosion en fournissant un milieu propice aux réactions corrosives. Les mécanismes responsables de la corrosion sont souvent une combinaison complexe de procédés physiques, chimiques et biologiques.

Plusieurs substances présentes naturellement dans l'eau, comme la matière organique naturelle (MON), les silicates et les phosphates, peuvent réduire la corrosion. Les problèmes d'eau rouge ou jaune sont souvent observés dans des eaux ayant peu de matière organique.

Le traitement de l'eau peut augmenter sa corrosivité en :

- enlevant ou en modifiant la MON;
- diminuant l'alcalinité;
- augmentant les concentrations de chlorure et de sulfate lorsque des sels d'aluminium ou de fer sont utilisés pour la coagulation ou lorsque des dosages de chlore élevés sont utilisés.

La fluoration à l'aide d'acide hydrofluorosilicique peut diminuer l'alcalinité et le pH et ainsi augmenter la corrosivité de l'eau. L'adoucissement par échanges ioniques ou par séparation membranaire peut aussi augmenter le niveau de corrosivité de l'eau traitée. Enfin, l'ozonation peut aussi contribuer à augmenter la corrosivité de l'eau en transformant la matière organique en molécules de poids moléculaire plus faible et en la rendant plus acide.

Tableau III.1 : Facteurs qui influencent la corrosion

Facteurs	Effet
pH	Un faible pH risque de faire augmenter la vitesse de corrosion. Un pH élevé peut protéger la tuyauterie et ralentir la vitesse de corrosion, causer une dézincification du laiton ou des dépôts bleu clair (hydroxydes) dans les tuyaux de cuivre.
Alcalinité et Carbone inorganique dissous (CID)	Favorisent parfois la formation d'une couche protectrice et la stabilisation du pH. Une alcalinité de faible à modérée réduit la corrosion de la plupart des matériaux. Une forte alcalinité favorise la corrosion du cuivre, du plomb et du zinc.
Oxygène dissous (OD)	Accélère de nombreuses réactions de corrosion.
Chlore résiduel	Entraîne une augmentation de la corrosion métallique, plus particulièrement du cuivre, du fer et de l'acier. Ralentit la corrosion d'origine microbienne.
Matières totales dissoutes (MTD)	Un taux élevé de MTD tend à augmenter la conductivité et la vitesse de corrosion.
Dureté calcique	Le calcium précipite parfois sous forme de CaCO_3 , ce qui protège la tuyauterie et freine la corrosion. Mais ceci risque également de causer de la turbidité et un entartrage excessif.
Chlorures Sulfates	De fortes concentrations de chlorures et de sulfates favorisent la corrosion du fer, du cuivre et de l'acier galvanisé.
Sulfures d'hydrogène	Caused un accroissement de la vitesse de corrosion.
Ammoniaque	Risque d'augmenter la solubilité de certains métaux tels que le cuivre et le plomb.

Polyphosphates	Peuvent réduire la formation de tubercules sur les parois des tuyaux de fer et d'acier, ce qui les gardent lisses. En faibles concentrations, ils risquent toutefois de favoriser la corrosion du fer et de l'acier. Il est possible qu'ils attaquent et affaiblissent le revêtement de ciment de la tuyauterie en amiante-ciment. Ils font augmenter la solubilité du plomb et du cuivre et préviennent la formation et le dépôt de CaCO_3 . Les polyphosphates sont des agents séquestrants pour le fer ferreux, ce qui minimise l'apparition d'eaux rougeâtres. Ils peuvent aussi revenir à l'état d'orthophosphates pour former une pellicule protectrice.
Orthophosphates	Peuvent former une pellicule protectrice.
Silicates	Sont des agents séquestrants (pour les ions métalliques) et forment une pellicule protectrice. Les solutions de silicates augmentent le pH et l'alcalinité.
Couleur naturelle et matières organiques	Peuvent freiner la corrosion en recouvrant la surface des tuyaux. Certaines substances organiques favorisent la formation de complexes métalliques et accélèrent la corrosion ou la mise en solution de métaux.
Fer ou manganèse	Réagissent parfois avec la surface interne des tuyaux en amiante-ciment, formant ainsi une couche protectrice. Dans les conduites métalliques, ils risquent de précipiter et de déposer un film sur les parois, ce qui les protégera ou, dans le cas du cuivre, y fera des piqûres de corrosion.
Zinc	Réagit parfois avec la surface interne des tuyaux en amiante-ciment et d'autres types de tuyaux pour former une couche protectrice. Il tend à précipiter aux endroits faisant office de cathodes et y laisse des dépôts protecteurs.
Cuivre	Entraîne de la corrosion par piqûres dans la tuyauterie galvanisée.
Magnésium (et peut-être d'autres métaux traces)	Risque d'inhiber la précipitation du CaCO_3 sous forme de calcite sur les surfaces des conduites et d'y favoriser plutôt son dépôt sous forme d'aragonite, plus soluble que la calcite.

III.5- Méthodes de mesure

La corrosion a plusieurs causes et ses effets sont multiples. En conséquence, il n'existe aucune méthode fournissant toutes les réponses. Cependant, une combinaison de plusieurs méthodes permet de mieux cerner les problèmes et d'identifier les solutions.

On peut séparer les méthodes en deux catégories : les méthodes directes et les méthodes indirectes qui s'appuient sur certaines informations relatives à la qualité de l'eau.

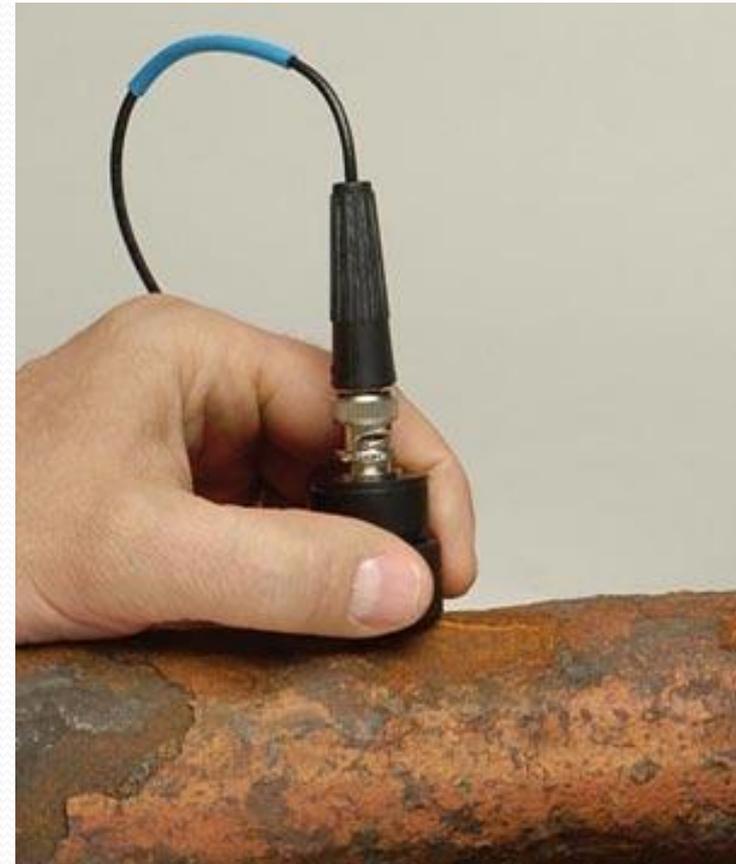


Méthodes directes :

- *Inspection visuelle macroscopique (œil nu) et microscopique.*
L'observation de l'intérieur des conduites est très utile et peu coûteuse. Elle permet de déterminer le type et l'étendue de la corrosion;
- *Mesure du taux de corrosion (perte de poids, méthode électrochimique, consommation d'oxygène, dissolution de métaux).*
Le tableau III-2 décrit brièvement ces quatre méthodes et donne leur utilité et leur limite;



- *Analyse chimique des dépôts.* Donne des informations sur la composition des dépôts de corrosion (carbonate, phosphate, sulfate, chlorure, silicate, oxygène, fer, plomb, cuivre, zinc, etc.);
- *Analyses par ultrasons.* Ces analyses permettent d'examiner la structure des dépôts de corrosion ou de la couche protectrice.



Méthodes indirectes :

- *Indices* (indice de Langelier, d'agressivité, de Larson, de saturation du carbonate de calcium, de Ryznar, etc.). En général, ces indices aident à avoir une meilleure compréhension du problème de corrosion. Ils ne permettent toutefois pas de prédire les réactions qui se produiront. Il existe des logiciels ou diagrammes (RTW et CORRODE) permettant de calculer rapidement ces indices, de tracer les diagrammes et d'estimer l'impact de plusieurs scénarios d'ajout de produits chimiques sur les caractéristiques finales de l'eau;

- *Essais hydrauliques.* Ils sont utiles pour déterminer le coefficient de Hazen-Williams(c). Le coefficient de friction est une propriété intrinsèque de la conduite qui est directement reliée à la rugosité de la surface interne de la conduite.

Une modification de la rugosité de la surface intérieure de la conduite, telle que l'enlèvement ou l'accumulation de dépôts corrosifs dans la conduite, engendre une variation du coefficient de friction.



- *Plaintes des consommateurs.* Les plaintes des consommateurs mettent souvent en évidence les problèmes de corrosion.

Tableau III-2 : Méthodes de mesure du taux de corrosion

Méthode	Principes sous-jacents	Applications	Limitations
Exposition de coupons (perte de poids)	La mesure cumulative de la perte de métal d'une surface définie pendant une période d'exposition prolongée donne un taux de perte de poids par unité de surface.	<ul style="list-style-type: none"> On convertit généralement les taux de perte de métal en taux de pénétration de la corrosion. Cette méthode fournit une indication visuelle concernant la morphologie de la corrosion et de l'entartrage. Les résultats sont considérés comme la mesure de corrosion; cette technique sert souvent de référence aux autres mesures de corrosion. On peut l'utiliser pour évaluer la tendance à la corrosion par piqûres et les taux de pénétration. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiert une exposition prolongée (< 90 jours). Il y a beaucoup de variabilité entre les mesures effectuées sur différents coupons (échantillons). Il faut effectuer plusieurs expositions afin de déterminer l'intervalle de confiance statistique. Ces essais sont assez dispendieux. La préparation des coupons demande une main-d'œuvre importante.
Méthode électrochimique	La plupart des méthodes électrochimiques donnent une estimation ponctuelle de la densité de courant de corrosion (taux d'échange électronique par unité de surface). À partir de la densité de courant, et en se servant de la loi de Faraday, on peut obtenir un taux d'oxydation du métal.	<ul style="list-style-type: none"> Cette mesure quasi instantanée convient bien aux méthodes directes (ou en ligne) de contrôle des procédés. Elle est utile pour évaluer l'efficacité relative de différentes stratégies de prévention de la corrosion et pouvoir ainsi choisir parmi un vaste éventail. Elle permet de réaliser une expertise sur des surfaces corrodées. On peut s'en servir pour construire un modèle électrochimique des surfaces corrodées. 	<ul style="list-style-type: none"> La préparation de l'échantillon est critique. La méthode ne s'applique généralement qu'aux surfaces qui se corrodent uniformément. La corrélation absolue avec la méthode de référence du coupon risque d'être faible (mesures de polarisation linéaire).
Consommation d'oxygène	On suppose que la consommation d'oxygène dissous réducteur est proportionnelle au taux d'oxydation du métal qui lui est associé.	<ul style="list-style-type: none"> Cette méthode fournit une mesure ponctuelle rudimentaire, à court terme, du taux de corrosion. L'analyse s'effectue en circuit fermé (avec recirculation) sur une portion assez grande de tuyauterie. 	<ul style="list-style-type: none"> Se limite généralement aux surfaces qui se corrodent rapidement (c.-à-d. le fer et l'acier). Il s'agit d'un outil de recherche en laboratoire. Les couples réducteurs en concurrence (c.-à-d. le chlore) brouillent la mesure.
Dissolution de métaux	La surface qui se corrode transmet des métaux à l'eau avec laquelle elle est en contact et dont le volume est connu. On suppose que le taux d'accumulation des métaux en solution équivaut au taux de corrosion.	<ul style="list-style-type: none"> On peut monter en laboratoire un circuit similaire à la plomberie de distribution (concentration en métaux de l'eau du robinet). On effectue normalement les mesures après une période de stagnation de l'eau dans les conduites. 	<ul style="list-style-type: none"> Le matériel d'essai requiert un conditionnement prolongé dans l'eau qu'on désire étudier. Les particules (issues des dépôts de corrosion) qui se détachent causent une grande variabilité dans les taux de libération des métaux. Cette méthode est dispendieuse et prend beaucoup de temps. La présence de dépôts de corrosion risque de brouiller les résultats.

III.6- Méthodologie pour choisir une stratégie de contrôle

La corrosion dépend à la fois des caractéristiques de l'eau et de son interaction avec les matériaux du réseau de distribution. Une méthode de contrôle peut avoir du succès dans un réseau et ne pas en avoir dans un autre ou même avoir différents résultats dans différentes parties d'un même réseau de distribution. Ainsi, le choix de la stratégie doit être fait en fonction des particularités de chaque système et des objectifs à atteindre.

- Documenter le problème (faire un diagnostic);
- Déterminer les objectifs (diminuer les plaintes, gérer les dépôts, diminuer la dissolution du cuivre et du plomb, etc.);
- Caractérisation du système :
 - Qualité de l'eau produite en fonction des saisons;
 - Connaissance du réseau (matériau et hydraulique (débit, pression, temps de séjour, sens d'écoulement, impasse, etc.).
- Choisir la stratégie à appliquer : élaborer un protocole expérimental qui comprend des essais à l'échelle de laboratoire (permet de tester une grande quantité de stratégies) et à l'échelle pilote (permet de comparer plusieurs stratégies dans des conditions plus représentatives des conditions réelles).

Implantation de la stratégie :

- Application de la stratégie retenue à l'ensemble du réseau de distribution ou à un secteur isolé pour débiter;
- Préparation du réseau à recevoir un changement;
- Élaboration d'un plan pour minimiser les inconvénients pour la population;
- Vérification de l'efficacité de la stratégie en fonction des objectifs visés.

III.7- Contrôle de la corrosion et de l'entartrage

Dans la majorité des cas, la corrosion ne peut être totalement éliminée. Elle doit cependant être réduite à un degré acceptable (n'entraînant pas de souillures ou de plaintes et qui ne réduit pas la vie utile des conduites). La corrosion par piqûres doit aussi être réduite au minimum.



Entartrage ou Corrosion



Macrographie interne
d'un tube corrodé

III.7.1 Choix des matériaux en contact avec l'eau et design du réseau

Dans certains cas, surtout pour de nouveaux réseaux, la corrosion des conduites peut être réduite en faisant un choix de matériaux adéquat et en optimisant le design du réseau. Lorsque cela est possible, le choix du matériau doit tenir compte des caractéristiques de l'eau et de la compatibilité des matériaux. Il est possible que des tuyaux de métal présentant des propriétés électrochimiques différentes, comme par exemple le cuivre et le fer galvanisé, forment une cellule galvanique en entrant en contact les uns avec les autres et entraînent ainsi de la corrosion.

Le tableau III-3 résume la résistance à la corrosion des principaux matériaux qui composent un réseau de distribution.



Voici plusieurs recommandations concernant le design d'un réseau de distribution :

- Éviter les impasses et les endroits stagnants;
- Choisir des matériaux qui ne corrodent pas;
- Installer des équipements permettant le drainage;
- Choisir la vitesse d'écoulement appropriée;
- Choisir le diamètre de conduite approprié;
- Choisir l'épaisseur de métal appropriée;
- Diminuer le stress mécanique;
- Éviter les coudes et les changements de direction brusques;
- Configurer le réseau selon une géométrie appropriée;
- S'assurer que les infrastructures seront faciles d'accès en vue des inspections, de l'entretien périodique et du remplacement des pièces endommagées;
- Éviter que le réseau ne serve de mise à la terre pour les circuits électriques.

À grande échelle, un réseau de distribution mal conçu risque de créer des secteurs où l'eau sera de mauvaise qualité et où la désinfection ne sera pas efficace. De même, un réseau mal conçu risque d'entraîner une turbidité élevée ainsi que des goûts et des odeurs désagréables.

Dans certains cas, il s'avère plus efficace de résoudre les problèmes de qualité de l'eau par la rénovation de certaines conduites plutôt que par un traitement.



Tableau 13-3 : Résistance des matériaux à la corrosion

Matériaux	Résistance à la corrosion	Principaux contaminants associés
Cuivre	Le cuivre présente une bonne résistance générale à la corrosion. Il est sujet aux attaques des éléments corrosifs suivants : vitesses d'écoulement élevées, eau douce, chlore, oxygène dissous, pH faible et fortes concentrations de carbone inorganique (alcalinité). Il est susceptible d'être endommagé par des piqûres de corrosion.	Le cuivre et possiblement le fer, le zinc, l'étain, l'antimoine, l'arsenic, le cadmium et le plomb à cause de la tuyauterie et des brasures associées.
Plomb	Il est sujet à la corrosion dans les eaux douces de pH < 8 et dans les eaux dures présentant un niveau élevé de carbone inorganique (alcalinité) et un pH inférieur à 7,5 ou supérieur à 8,5.	Le plomb.
Acier doux	Il est sujet à une corrosion uniforme, principalement due à de fortes concentrations en oxygène dissous et en chlore et à des eaux peu tamponnées.	Le fer, ce qui amène des plaintes relativement à la turbidité de l'eau et à sa coloration rouge.
Fonte ou fonte ductile (sans revêtement)	Les tuyaux en fonte risquent de subir une érosion de surface en présence d'eaux agressives et une tuberculisation en présence d'eaux peu tamponnées.	Le fer, ce qui amène des plaintes relativement à la turbidité de l'eau et à sa coloration rouge.
Fer ou acier galvanisé	Il est sujet à la corrosion galvanique du zinc en présence d'eaux agressives, surtout lorsqu'elles ne sont pas dures. Le contact avec des éléments faits de cuivre accélère la corrosion, de même que les températures élevées (comme dans les tuyaux d'eau chaude). La qualité de fabrication de la tuyauterie et du revêtement galvanisé a aussi une influence sur la résistance à la corrosion.	Le zinc et le fer, le cadmium et le plomb (impuretés associées au procédé de galvanisation).
Amiante-ciment, béton, revêtements de ciment	Ces matériaux offrent une bonne résistance à la corrosion. Les réactions électrolytiques n'ont pas d'effet sur eux. Les eaux agressives (douces) attaquent parfois le ciment et libèrent ainsi du calcium. Les polyphosphates, qui sont des agents séquestrants, peuvent réduire la quantité de calcium et ramollir la tuyauterie de manière importante.	Les fibres d'amiante, une augmentation du pH, l'aluminium et le calcium.
Plastique	Le plastique résiste à la corrosion.	Les plastifiants utilisés dans la fabrication de certains tuyaux contiennent des métaux, notamment du plomb.
Laiton	Il présente une bonne résistance globale à la corrosion. Les différents types de laiton réagissent différemment à la composition chimique de l'eau. Il est sujet à la dézincification en présence d'eaux de pH supérieur à 8,3 caractérisées par un ratio chlorures/dureté carbonatée élevé. Les conditions amenant une défaillance mécanique ne correspondent pas nécessairement à celles favorisant la libération de contaminants.	Le plomb, le cuivre et le zinc.

III.7.2 Modification des caractéristiques chimiques de l'eau

En général, les caractéristiques chimiques de l'eau modifiées pour diminuer les problèmes de corrosion sont le pH et l'alcalinité. Dans ce qui suit, les méthodes pouvant être utilisées ont été séparées en deux groupes :

- celles qui permettent un ajustement du pH et/ou de l'alcalinité
- celles qui permettent la reminéralisation d'une eau (pour des eaux trop douces).

III.7.2.1 Ajustement du pH et de l'alcalinité

L'ajustement du pH et de l'alcalinité est la méthode de contrôle de la corrosion la plus courante puisqu'elle agit à la fois sur les phénomènes électrochimiques de la corrosion et sur la solubilité du carbonate de calcium, qui peut servir de couche de protection. Cette méthode est aussi souvent la plus économique.



Selon un rapport d'études basées sur l'expérience de plusieurs installations, la dissolution du plomb et du cuivre peut être contrôlée en augmentant l'alcalinité et le pH :

- Pour le plomb, une alcalinité élevée diminue la dissolution du plomb (jusqu'à un maximum de 100 mg/L CaCO₃). Lorsque le pH est inférieur à 8,5, la gamme d'alcalinité la meilleure se situe entre 15 et 50 mg/L CaCO₃;
- Pour le cuivre, un pH élevé contribue à diminuer la dissolution du cuivre et une gamme de pH plus élevée est nécessaire lorsque l'alcalinité est faible.

Plusieurs procédés de neutralisation, du point de vue physico-chimique, sont applicables pour ajuster une eau naturelle, dont :

- L'élimination du CO_2 libre par aération;
- La neutralisation par une base (soude caustique, chaux);
- La neutralisation par un carbonate alcalin (Na_2CO_3) ou alcalino-terreux (CaCO_3).

a) Élimination du CO_2 par aération

Lorsqu'on met en contact avec l'atmosphère des eaux riches en gaz carbonique, elles laissent échapper une partie du CO_2 dissous.

Un pH-mètre doté d'un signal d'alarme doit être prévu à la sortie de l'équipement. Le procédé est donc une désorption du gaz carbonique et est régi par la loi de Henry.

La densité du CO_2 est de 1,98 g/L à 0° C et pression atmosphérique.

b) Neutralisation par l'ajout de soude caustique

La réaction de neutralisation du CO₂ libre est :



L'addition de soude caustique (NaOH) permet de neutraliser le CO₂ agressif en formant du carbonate de soude soluble.

Il faut ajouter 0,91 g de NaOH pur par gramme de CO₂ agressif. L'ajout de 1 mg/L de NaOH pur augmente l'alcalinité de l'eau de 1,25 mg CaCO₃/L et de 0,58 mg/L de Na⁺.

La solution est en général diluée à 10% avant son injection. Un bon contrôle du dosage est essentiel puisqu'un léger surdosage peut faire augmenter le pH de façon excessive, surtout dans les eaux douces.

Le bac de préparation et de dosage doit permettre une production pour au moins 24 heures.

Si le produit est dosé à l'état pur, à partir d'un réservoir d'entreposage, il faut prévoir un té de mélange sur la ligne.

La réaction est rapide et la soude doit être ajoutée avant le coagulant lorsqu'elle est utilisée pour ajuster le pH de coagulation. Ce produit étant très basique et dangereux, plusieurs précautions doivent être prises lors de la conception.

c) Neutralisation par l'ajout de chaux

La réaction de neutralisation du CO₂ libre est :

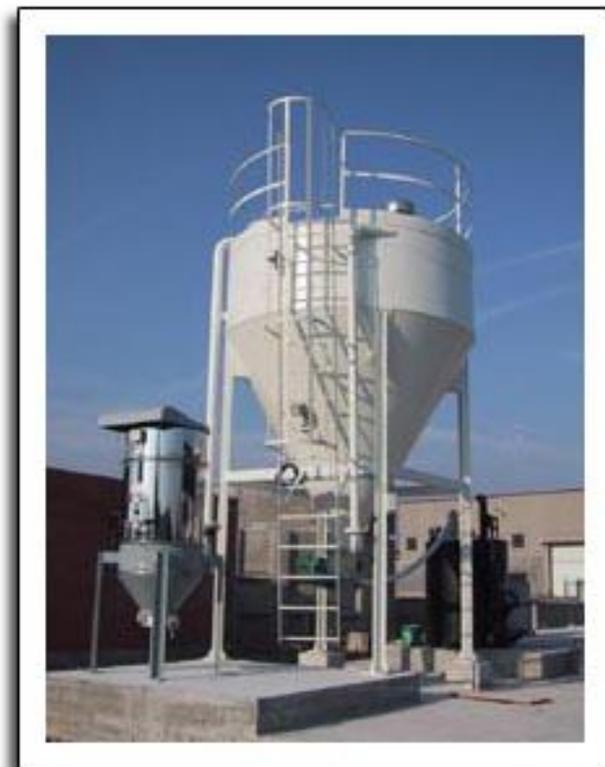


La chaux [Ca(OH)₂] est le produit le plus utilisé soit pour neutraliser le CO₂ libre ou rehausser l'alcalinité afin d'ajuster l'eau au pH de floculation approprié.

Il faut ajouter 0,84 g de Ca(OH)₂ pur par gramme de CO₂ agressif. L'ajout de 1 mg/L de Ca(OH)₂ à 93% de pureté augmente la dureté et l'alcalinité de 1,26 mg/L exprimée en CaCO₃.

La chaux peut être dosée soit en lait de chaux à une concentration de 5 à 10% ou en eau de chaux (solution saturée à environ 1,6 g/L). Le lait de chaux est préparé à partir du produit en poudre (chaux éteinte) au moyen d'un doseur volumétrique qui alimente un bac parfaitement agité.

La distribution de la suspension est réalisée soit par pompes volumétriques (pompes doseuses à tête spécialement conçue pour la chaux ou pompes à cavités progressives) ou par pompes centrifuges qui alimentent une boucle fermée de distribution munie de vannes automatiques d'injection.



e) Neutralisation par l'ajout de carbonate de sodium

La réaction de neutralisation du CO₂ libre est :



Contrairement aux deux produits précédents, le carbonate de sodium (Na₂CO₃) est un sel neutre. Son utilisation est donc très aisée.

Il faut utiliser 2,4 g de Na₂CO₃ pour neutraliser 1 gramme de CO₂.

1 mg/L de Na₂CO₃ augmente l'alcalinité de l'eau de 0,94 mg/L exprimée en CaCO₃ et de 0,43 mg/L de Na⁺.

Le produit est dosé en solution à 10% en général.

La préparation de la solution se fait dans un bac agité et le dosage est réalisé par pompes doseuses.

f) Neutralisation par une filtration sur produits alcalino-terreux

Il s'agit de produits à base de carbonate de calcium (CaCO_3) éventuellement mélangés à du carbonate de magnésium (MgCO_3) ou à de la magnésie [$\text{Mg}(\text{OH})_2$]. Au cours de la réaction avec le CO_2 agressif, il se formera des bicarbonates de calcium [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] et éventuellement de magnésium [$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$].



La mise en œuvre de ces réactifs granulés se fait le plus souvent dans des filtres fermés, sous pression. On utilise parfois des filtres du type ouvert, dans le cas où l'on disposerait d'une charge suffisante.

1 m³ de produit alcalino-terreux permet de traiter, suivant la teneur en CO₂, de 3 à 10 m³ d'eau par heure. Ce produit est utilisé en couche filtrante, d'une épaisseur de 0,8 m à 1,5 m. La perte de charge produit propre varie, selon la vitesse de filtration et l'épaisseur de produit, de 0,2 à 0,5 m. Cependant, il faut tenir compte de l'encrassement et se réserver une chute de 1 m de hauteur d'eau à travers les filtres.

La consommation varie selon le cas de 1,6 à 2,2 g par gramme d'acide carbonique neutralisé et il suffit d'effectuer occasionnellement une recharge partielle du filtre pour compenser la quantité qui pourrait disparaître par dissolution dans l'eau.

La filtration sur produits alcalino-terreux est très souvent appliquée aux eaux profondes qui ne demandent pas d'autres traitements, alors que l'addition de produits en suspension ou en solution est en général intégrée à une chaîne de traitement complet (déferrisation /démanganisation des eaux profondes, clarification des eaux de surface, etc.).

g) Augmentation de l'alcalinité et du pH par l'ajout de bicarbonate de sodium

L'ajout de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) est utile pour augmenter l'alcalinité d'une eau qui ne le serait pas suffisamment et/ou pour relever le pH (s'il doit être ajusté au pH de floculation lors d'une coagulation/floculation).

Le bicarbonate de soude est peu soluble dans l'eau (69 g/L à 0°C et 96 g/L à 20°C). La solution à injecter sera donc de 5% dans un réservoir parfaitement agité. Le dosage de la solution se fera par pompes doseuses.

Ce produit n'est applicable que pour de petites installations ou lorsque le dosage de chaux est problématique.

1 mg/L de bicarbonate de sodium augmente l'alcalinité de 0,6 mg/L exprimée en CO_3Ca .

h) Diminution du pH par l'ajout d'acide sulfurique

L'acide sulfurique est utilisé pour abaisser le pH de l'eau, tout en corrigeant l'équilibre calcocarbonique, dans le cas d'eaux entartrantes (possibilité de dépôt de carbonate de calcium dans les équipements et tuyauteries).

L'acide sulfurique est un acide fort et dangereux. S'il est concentré à plus 90%, il doit être entreposé dans des réservoirs en acier nu, tandis que dilué (10%), il doit être entreposé dans des réservoirs en acier ébonité (résine polyester armée de fibre de verre ou de certains plastiques).

1 mg/L d'acide sulfurique à 98% réduit l'alcalinité de 1 mg/L exprimée en CaCO_3 .



Lors de la dilution, il ne faut jamais verser l'eau dans l'acide, mais l'acide dans l'eau, sinon il y a risque de projections qui peuvent causer des brûlures sévères.

Les espaces d'entreposage doivent être bien ventilés et à l'abri de toute source de chaleur ou de lumière directe.

L'acide sulfurique concentré dégage des vapeurs nocives et peut réagir violemment avec de nombreuses matières organiques.

L'injection se fait au moyen de pompes doseuses munies de têtes de dosage en matériau résistant.

Le réservoir d'entreposage doit être placé dans une enceinte en béton protégé pouvant recueillir tout le contenu du réservoir en cas de fuites.

Le concepteur devra suivre attentivement les recommandations du fournisseur du produit, lors de la conception de l'installation d'entreposage et de dosage de l'acide sulfurique.

III.7.2.2 Reminéralisation

La reminéralisation d'une eau s'applique aux eaux trop douces de façon à augmenter l'alcalinité et/ou la dureté. La reminéralisation s'effectue généralement en début de filière de traitement pour améliorer les traitements subséquents (p. ex. la coagulation).

Plusieurs méthodes peuvent être appliquées pour la reminéralisation :

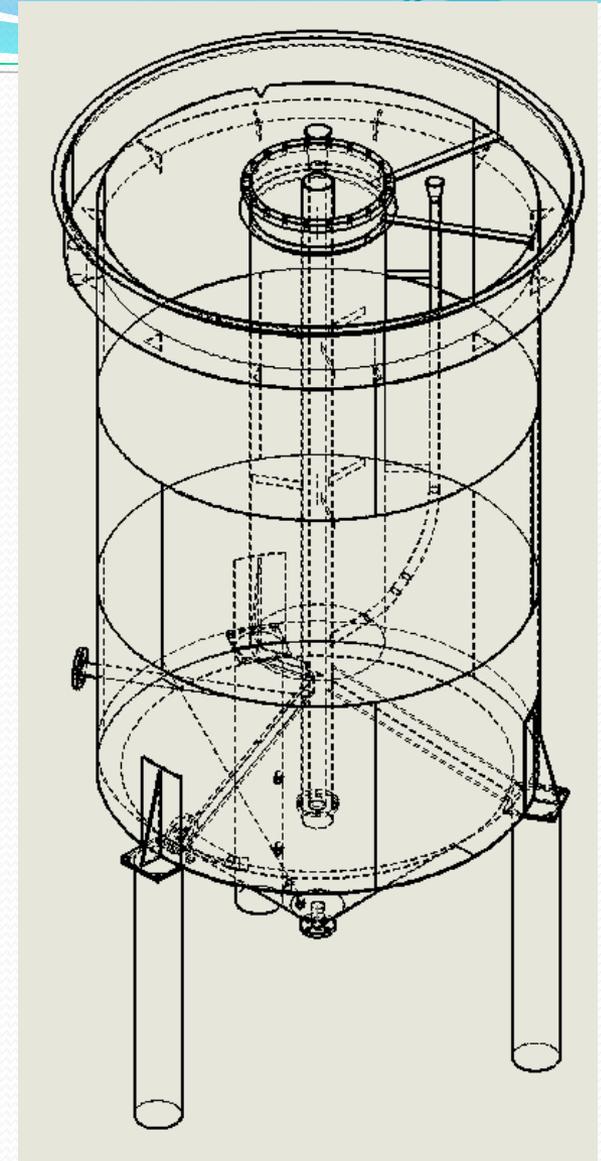
a) *Méthode de gaz carbonique et chaux*



Le plus souvent, on utilise du gaz carbonique et de la chaux préparée dans un saturateur à chaux (eau de chaux) lorsque la minéralisation se pratique dans une eau claire.

Par gramme d'alcalinité, il faut ajouter par m₃ d'eau :

0,88 g de CO₂ + 0,56 g exprimé en CaO (chaux vive) ou 0,74 g exprimé en Ca(OH)₂ (chaux éteinte)

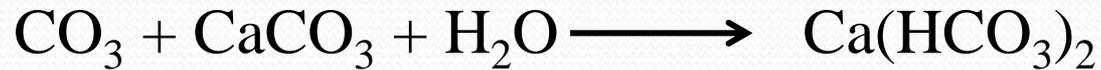


Le gaz carbonique est introduit dans l'eau au moyen d'une tour de contact à travers des diffuseurs appropriés (poreux, fines bulles, etc.) sous une charge de plusieurs mètres de hauteur d'eau. Le temps de résidence de l'eau dans la tour sera de 1 à 2 min suivant la température de l'eau.

Seules les préparations commerciales de CO_2 liquide permettent d'assurer une meilleure pureté du produit.

Le concepteur devra suivre les recommandations des fournisseurs de produits chimiques.

b) Méthode de gaz carbonique et carbonate de calcium



Une injection de CO_2 suivie d'une filtration sur produit alcalino-terreux granulaire (CaCO_3) permet de réduire considérablement la consommation de CO_2 (environ 0,5 mg par g/L de reminéralisation).

Par contre, ce procédé ne permet pas de dépasser le pH d'équilibre, contrairement au procédé à la chaux et CO_2 .

c) Méthode de bicarbonate de sodium et sel de calcium

On introduit simultanément dans l'eau des ions bicarbonates HCO_3^- (sous forme de bicarbonate de sodium) et des ions calcium Ca^{2+} (généralement sous forme de chlorure de calcium, parfois de sulfate de calcium).

Pour reminéraliser 1 m³ d'eau de 1 g exprimé en CaCO_3 , il faut employer 1,7 g de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) et 1,2 g de chlorure de calcium (CaCl_2) ou 1,4 g de sulfate de calcium (CaSO_4).

Le chlorure de calcium présente l'avantage d'être plus facile à mettre en œuvre grâce à sa grande solubilité. Par contre, il introduit dans l'eau des ions chlorures qui, s'ils s'ajoutent à une teneur déjà notable, peuvent contrarier les effets du traitement de reminéralisation par leur influence sur les phénomènes de corrosion.

d) Méthode de bicarbonate de sodium et chaux

Dans certains cas, il peut aussi être nécessaire d'ajouter de la chaux pour adapter le pH à la valeur d'équilibre qui correspond à la nouvelle minéralisation de l'eau.

Dans le cas où l'alcalinité devrait être augmentée (et non le pH), on ajoutera dans l'eau du bicarbonate de sodium et de la chaux pour maintenir le pH.

e) Méthode de carbonate de sodium et gaz carbonique

Suivant la disponibilité des produits locaux, on peut aussi augmenter l'alcalinité en utilisant une combinaison $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2$. Dans ce cas, le débit de CO_2 peut être asservi au pH voulu et si la dureté est adéquate, aucun autre réactif ne devra être ajouté (dans le cas contraire, on ajoute un sel de calcium).

f) Méthode d'acide sulfurique et carbonate de calcium

On ajoute dans l'eau du décanteur ou d'une cuve de contact de la craie broyée en ajoutant une quantité d'acide sulfurique équivalente à la quantité de bicarbonate. On peut aussi filtrer l'eau sur une couche de marbre, de calcaire ou de produit alcalino-terreux après lui avoir ajouté cette même quantité d'acide sulfurique.

Pour enrichir 1 m³ d'eau à traiter de 1 g exprimé en CaCO₃, il faut 1 g de H₂SO₄ et un minimum de 2 g de CaCO₃. Il est indispensable de rajouter ensuite de la chaux, car le calcaire (CaCO₃) ne suffit pas à amener l'eau à la valeur du pH d'équilibre.

III.7.2.3 Ajout d'inhibiteurs chimiques

Dans certains cas, l'ajustement du pH, ou du pH et de l'alcalinité, ne suffit pas à éliminer les problèmes de corrosion; il faut alors recourir à l'ajout d'inhibiteurs de corrosion en plus, la plupart du temps, d'un ajustement préalable du pH.

Les inhibiteurs de corrosion sont ajoutés à la fin de la filière de traitement. Ils sont généralement dosés directement à l'usine. Dans certains cas, des phosphates pourraient être appliqués dans le réseau à partir des installations intermédiaires.



Il faut toutefois tenir compte du nombre de secteurs problématiques avant de choisir un site d'application ainsi que de tous les coûts associés à la mise sur pied de plusieurs installations d'injection d'inhibiteurs.

Dans le cas des inhibiteurs à base de silicates, il faut savoir qu'ils augmentent le pH des eaux faiblement tamponnées. Ils ne peuvent donc pas être dosés dans le réseau si une correction du pH est effectuée à l'installation (le pH pourrait être trop élevé après l'injection de silicates).

Les inhibiteurs de corrosion permettent de diminuer la dissolution des métaux. Toutefois, ils ne permettent pas nécessairement d'éliminer la corrosion par piqûre ou la corrosion localisée induite par l'hétérogénéité des matériaux ou par une mauvaise installation. De plus, les taux de corrosion des principaux métaux dont sont constitués les réseaux de distribution (acier, fonte grise, fonte ductile) ne seront probablement pas suffisamment réduits pour permettre de prolonger la durée de vie des conduites au-delà de 75 à 100 ans.

L'ajout d'inhibiteurs de corrosion peut avoir des effets bénéfiques sur la qualité de l'eau. Le choix du meilleur inhibiteur et de la concentration optimale dépend principalement de la qualité de l'eau distribuée, du réseau de distribution, de ses conditions d'opération, du type de dépôt accumulé et des problèmes de qualité qui doivent être résolus.

a) Produits à base de phosphates

Les trois principales formes de phosphates utilisées comme inhibiteurs de corrosion sont :

- Les orthophosphates,
- les polyphosphates moléculaires déshydratés et
- les phosphates bimétalliques à base de zinc.

Il faut noter que le phosphate est un nutriment. Cependant, peu d'études ont mis en évidence des problèmes de recroissance dans le réseau de distribution causés par l'utilisation de phosphates.

b) Produits à base de silicates

Il existe plusieurs formes de silicate de sodium utilisées comme inhibiteurs de corrosion et comme agents séquestrants. Ils se présentent en produits secs ou en solutions de silicate liquide. Sous forme sèche, on retrouve le Na_2SiO_3 , le Na_6SiO_7 et le $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ avec différents taux d'hydratation. Ils sont produits en fusionnant du carbonate de sodium avec du sable de silice. Ils sont généralement peu solubles en eau froide.

Les silicates liquides varient en fonction de leur proportion d'oxyde de sodium (Na_2O) et de silicate (SiO_2).



Les silicates peuvent être efficaces pour différentes qualités d'eau. Cependant, ils sont communément appliqués aux eaux douces à faible pH dont le taux d'oxygène est élevé.

Les concentrations varient entre 4 et 30 mg/L. Les concentrations les plus élevées sont en général requises pour des eaux ayant une concentration de chlorure, de solides dissous et une dureté élevées ainsi que pour des températures élevées. Comme pour les phosphates, si la concentration de silicates est insuffisante, ceux-ci peuvent favoriser la corrosion par piqûre. Pour des eaux de faible pH, les concentrations de silicate requises peuvent être élevées. Dans ce cas, il est souvent plus économique d'augmenter le pH entre 7,5 et 8 par l'ajout de soude caustique, de chaux ou de carbonate de sodium avant l'ajout de l'inhibiteur.



La protection contre la corrosion qu'offrent les silicates est principalement due à l'augmentation du pH et à la formation d'une couche protectrice (pour qu'une couche protectrice puisse se former, il doit y avoir des réactions de corrosion). Par ailleurs, les silicates sont de bons agents séquestrants : ils peuvent donc diminuer les problèmes d'eau rouge. Un dosage trop faible peut toutefois induire de la corrosion par piquêre.

c) Mélange de produits

Des mélanges de produits à base de phosphates (ortho- et poly-) et de silicates, avec différents ratios phosphate/silicate, peuvent aussi être utilisés. De cette façon, il est possible d'augmenter l'effet positif de l'ajout de silicates avec une plus petite quantité de phosphates.

Chapitre IV

Instrumentation et contrôles

IV.1- Introduction

L'instrumentation et les contrôles doivent refléter la taille de l'usine de production d'eau potable, sa complexité, le nombre d'employés et leur compétence. Pour ce faire, le concepteur doit prévoir des équipements qui permettront aux opérateurs de bien suivre et contrôler l'usine, les équipements de traitement, la production d'eau potable et la gestion des résidus de traitement.

Les informations qui suivent donnent un aperçu minimal des équipements nécessaires au suivi du traitement.



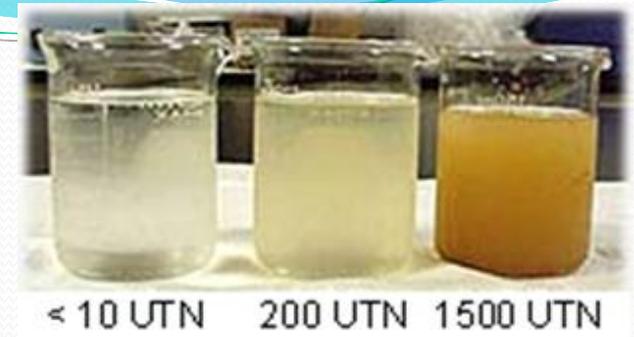
IV.2- Instrumentation

IV.2.1 Paramètres réglementés

IV.2.1.1-Turbidité

Les mesures de turbidité découlent aussi bien de la réglementation que des besoins de base pour le contrôle des procédés.

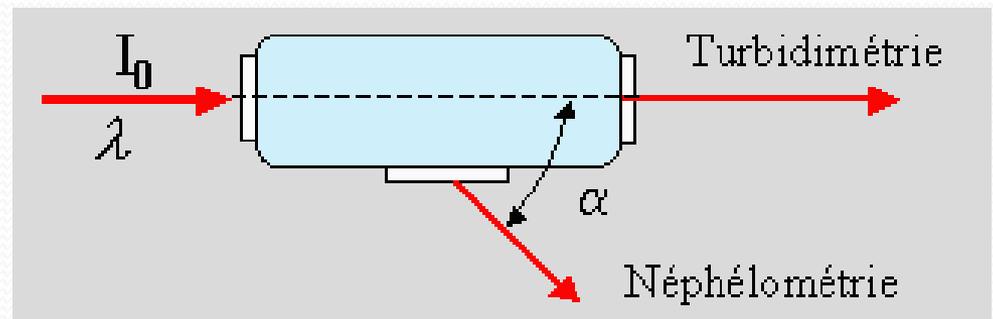
En termes physiques, la turbidité est due à des particules de différentes tailles diffusant ou absorbant la lumière, donnant ainsi au milieu en question une apparence trouble.



a) Principes

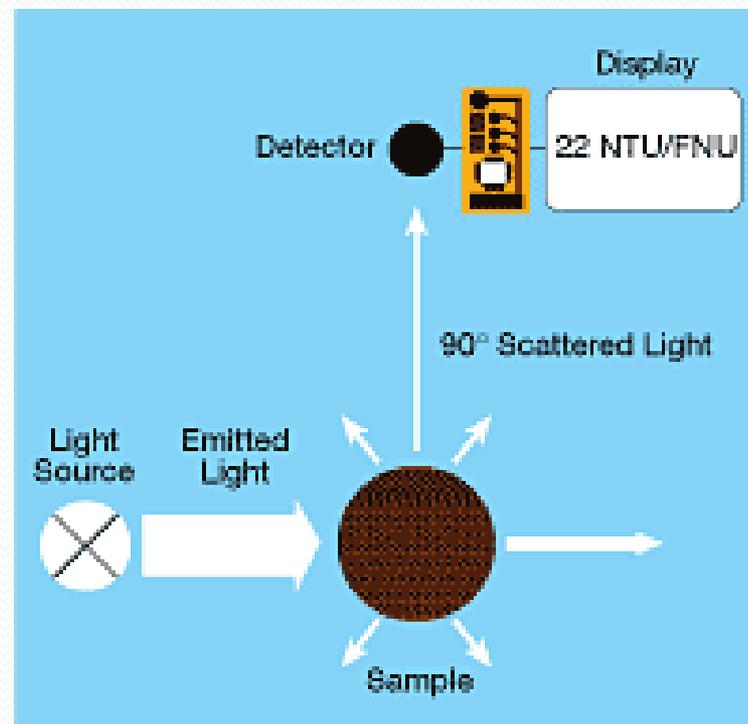
La turbidité est un indicateur du degré d'opacité d'une eau. Les turbidimètres utilisent tous le principe de néphélémétrie. Ce principe utilise la lumière diffusée, et non la lumière transmise comme dans le cas de l'opacimétrie.

La turbidité est mesurée à l'aide d'un faisceau lumineux qui est diffusé et détecté à 90° . Cette valeur sera donc exprimée en unités de turbidité néphélémétrique (UTN).



Il existe deux normes principales de mesure de turbidité : la norme USEPA 180.1, qui nécessite un détecteur à 90° et une source lumineuse blanche de type ampoule tungstène, et la norme ISO 7027, qui requiert un détecteur à 90° doté d'une source lumineuse d'une longueur d'ondes de 860 nm. Le spectre de lumière doit être à 860 nm \pm 30 avec une diode (LED) ou une combinaison de filaments et filtres.

Certains turbidimètres à très haute résolution utilisant un laser à 660 nm ou une source de lumière à diode électroluminescente (LED) possèdent une résolution minimale de 0,001 UTN.



b) Installation

Lors de l'installation des turbidimètres en continu, il faut vérifier les points suivants :

- Une trappe à bulles devrait être installée à même le turbidimètre ou en amont de celui-ci pour éviter l'interférence des bulles d'air. Cette trappe consiste généralement en des chicanes qui favorisent l'évacuation de l'air avant d'entrer dans la chambre de mesure;
- Prévoir une vanne de contrôle et une mesure du débit d'alimentation du turbidimètre;
- L'ajout d'une vanne de réduction de pression peut faciliter l'ajustement;
- Réduire le plus possible la longueur de la conduite d'alimentation du turbidimètre;
- S'il s'agit d'eau brute, prévenir toute sédimentation dans la conduite d'alimentation et prévoir un rinçage manuel;

- Éviter l'utilisation de tuyaux transparents favorisant la croissance d'algues;
- L'eau rejetée du turbidimètre doit être retournée au procédé ou évacuée vers l'égout;
- Le capteur peut être installé à une certaine distance de son contrôleur. Ce dernier peut ainsi servir d'afficheur à un ou plusieurs capteurs;
- Dans le cas de mesures effectuées à la sortie d'un filtre, il faut s'assurer de tenir compte seulement des mesures relatives à l'eau envoyée vers le bassin d'eau traitée et non à une eau envoyée à l'égout. Pour ce faire, il faut soit interrompre l'alimentation du turbidimètre pendant toute la séquence de lavage d'un filtre ou éliminer les données obtenues durant cette période.

- L'entretien normal d'un turbidimètre inclut la vérification de l'étalonnage et le nettoyage de la fenêtre de la photocellule, du piège à bulles et du corps. La fréquence d'entretien est déterminée de manière empirique et dépend de l'installation, de l'eau à contrôler et de la saison.



IV.2.1.2 pH

Le pH peut être mesuré selon deux méthodes. La première est la méthode colorimétrique mais elle n'est pas acceptée pour la mesure réglementaire du pH. La seconde, la méthode potentiométrique, est plus efficace car elle est adaptée à la mesure en continu. L'instrument basé sur cette méthode comprend une électrode de mesure, une électrode de référence et une unité d'amplification.



Les points suivants sont à vérifier lors de l'installation des pH-mètres :

- L'élément de mesure étant fragile, il est préférable de le retirer pendant le rinçage du tube amenant l'eau à mesurer;
- Il est préférable de réduire le plus possible la distance séparant l'élément de mesure de l'unité d'amplification. Si nécessaire, prolonger le tube amenant l'eau à mesurer;
- L'étalonnage doit être fait avec deux solutions étalons. Faire l'étalonnage selon les recommandations du fabricant ou au moins une fois par mois;
- L'entretien de l'électrode est critique pour assurer la qualité de la mesure. Il peut être nécessaire de recourir à des produits chimiques.

Habituellement, le pH-mètre permet également de mesurer la température.

IV.2.1.3 Chlore résiduel

La teneur en chlore peut être mesurée selon deux méthodes : la méthode ampérométrique et la méthode colorimétrique. Il est important de noter que les analyseurs doivent comporter des éléments de compensation pour le pH et la température. La température pourra être compensée par sa mesure et un calcul proportionnel. Le pH pourra être compensé par l'ajout d'un tampon de pH (ou d'une sonde de pH) et un calcul proportionnel.



Les points suivants sont à vérifier lors de l'installation des analyseurs de chlore :

- Prévoir une vanne de contrôle et une mesure du débit d'alimentation en eau. Il peut être nécessaire d'ajouter une vanne de réduction de pression pour faciliter cet ajustement;
- La distance entre les électrodes et le contrôleur doit être réduite au minimum;
- Si l'eau est contaminée par la solution tampon, elle doit être évacuée vers l'égout;

- Le contrôleur doit comprendre des relais pour les alarmes :
 - i. de bas et haut niveaux de chlore;
 - ii. d'absence de débit d'eau aux électrodes;
 - iii. de bas niveau de solution tampon (si requis);
 - iv. de sorties analogiques ou digitales commutables pour le transfert des données vers un enregistreur, un ordinateur ou un système de télémétrie.

- L'étalonnage et l'entretien de ces analyseurs de chlore sont critiques pour assurer la qualité de la mesure.

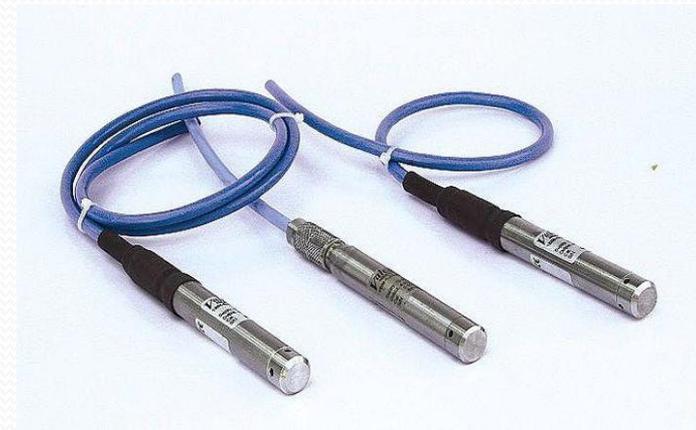
IV.2.2 Indications et mesures requises pour suivre le fonctionnement des équipements

Il s'agit dans ce cas d'obtenir des informations sur le statut, l'état ou le fonctionnement d'éléments hydrauliques, mécaniques et électriques.

Ces informations servent, par exemple, à :

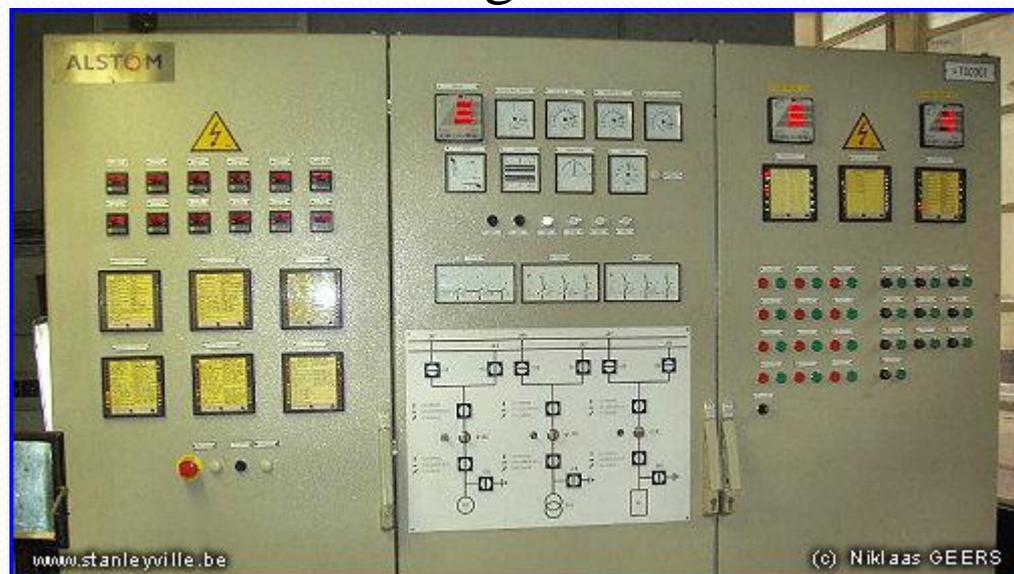
- Indiquer à distance le fonctionnement d'un élément (indicateur de fonctionnement d'une pompe doseuse par exemple);
- Totaliser le temps de fonctionnement d'une unité et en établir la fréquence d'entretien;

- Fournir une alarme avant que la situation n'entraîne des conséquences sur le procédé (alarme de bas niveau dans le puits de pompage d'eau brute par exemple);
- Suivre une variable permettant de valider des mesures reliées au procédé (niveau d'un réservoir de produit chimique pour valider le débit de dosage par exemple et, dans ce cas-ci, la connaissance du niveau permet également de gérer la réserve du produit).



IV.2.3- Centralisation des données et des contrôles

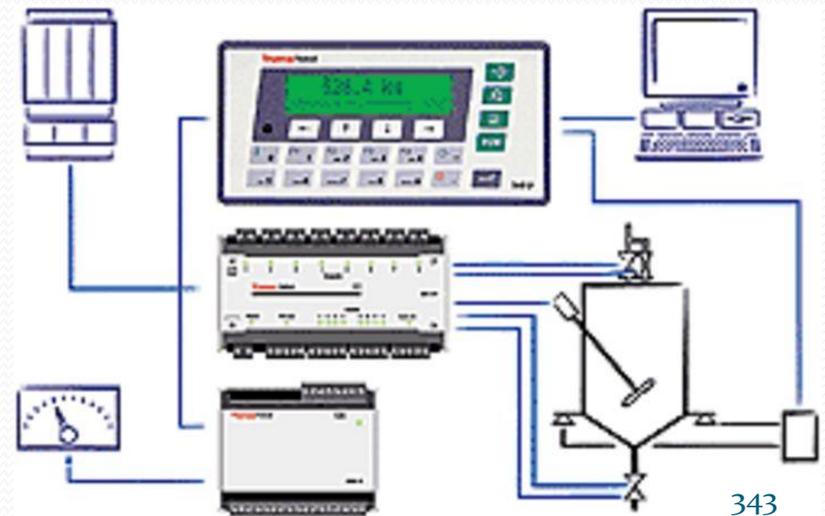
Un tableau de contrôle central, regroupant au minimum les mesures, alarmes et contrôles essentiels à l'opérateur et incluant les variables transmises par téléométrie, doit être prévu dans les installations de traitement. Ce tableau doit être situé de manière à être facilement consulté par les opérateurs tout en leur permettant d'avoir une vue sur les unités de traitement. Le tableau de contrôle doit également posséder suffisamment de signaux visuels et auditifs pour détecter rapidement tout équipement défectueux ou toute condition dangereuse.



IV.2.4- Automatisation des opérations

Lors de la conception de l'automatisation, les points suivants sont à considérer :

- Le système de contrôle doit être conçu en fonction des difficultés et situations particulières;
- Le choix des appareils doit tenir compte de leur durée de vie et de la disponibilité des pièces de rechange;
- Le système devrait permettre une opération intégrée des tâches de routine et une réponse rapide aux changements de condition;



- Le passage du mode automatique vers le mode manuel doit pouvoir se faire facilement;
- Dans les petites installations, le concepteur devra analyser la situation en tenant compte :
 - Des fonctions qu'un système automatisé peut assurer et des alternatives manuelles;
 - De la capacité de l'opérateur d'effectuer l'entretien du système;
 - Localement ou régionalement, de la disponibilité, de la qualité et des coûts de services spécialisés d'entretien.

Au moment de la conception, la solution retenue et les coûts des services devront apparaître dans le budget d'exploitation proposé.

IV.2.5- Laboratoires et instruments

De façon générale, l'équipement de laboratoire sera choisi en fonction de la source d'eau brute, de l'utilisation projetée de l'installation de traitement et de la complexité du procédé de traitement. Il faut également tenir compte de la compétence des opérateurs, des buts visés et des procédures d'utilisation.



De façon particulière, le laboratoire de l'installation doit comprendre au minimum :

- Pour toutes les installations de traitement d'eaux de surface : un turbidimètre de laboratoire respectant les normes définies par la législation en vigueur;
- Pour toutes les installations dotées de procédés de floculation et de décantation incluant le dosage de chaux : un pH-mètre, le matériel nécessaire pour effectuer des *jar tests* ainsi que les équipements de titrage de la dureté et de l'alcalinité;
- Pour les installations procédant à un adoucissement par échange d'ions ou par dosage de chaux : un pH-mètre ainsi que les équipements de titrage de la dureté et de l'alcalinité;

- Pour les installations d'enlèvement du fer et/ou du manganèse : l'équipement de mesure des concentrations de fer (jusqu'à 0,1 mg/L) et/ou de manganèse (jusqu'à 0,01 mg/L);
- Pour les installations dosant le chlore : l'équipement de mesure du chlore libre et du chlore résiduel total;
- Pour les installations dosant les polyphosphates ou orthophosphates : l'équipement de mesure des phosphates (entre 0,1 et 20 mg/L).

L'aménagement physique des lieux devrait inclure une superficie de comptoir suffisante, une ventilation et un éclairage adéquats, un lieu d'entreposage, un évier de laboratoire et autres utilités requises.

IV.2.6- Stations contrôlées à distance

L'avancée des technologies en instrumentation et contrôle a rendu possible le suivi et l'opération à distance des usines de production d'eau potable. Parallèlement, les préoccupations quant à la contamination microbiologique des sources d'eau forcent l'optimisation des procédés de traitement et provoquent le resserrement des normes de qualité de l'eau distribuée.

Dans ce cadre, l'automatisation vient faciliter le travail des opérateurs en éliminant les tâches monotones et répétitives. Ce faisant, plusieurs petites sources d'erreurs sont éliminées et les opérateurs sont davantage appelés à surveiller les procédés et à réagir en cas de mauvais fonctionnement.

Mais il reste encore plusieurs éléments à considérer avant de permettre la surveillance et l'opération complète des usines de production d'eau potable par télémétrie. Tous les éléments de traitement doivent être étudiés à fond afin de déterminer quel suivi en continu doit être réalisé, quelles sont les alarmes à mettre en place et quels sont les besoins en personnel. De plus, les conséquences des bris d'équipement, des pannes de communications ou de courant et des conditions critiques de traitement doivent être prises en considération pour assurer la sécurité de l'usine et assurer la qualité de l'eau distribuée.

