

# CHIMIE DE L'EAU



*« A l'échelle cosmique, l'eau est plus rare que l'or. »*  
**Hubert Reeves**

## **LP GASTE** **Département Chimie-Sète**



# SOMMAIRE

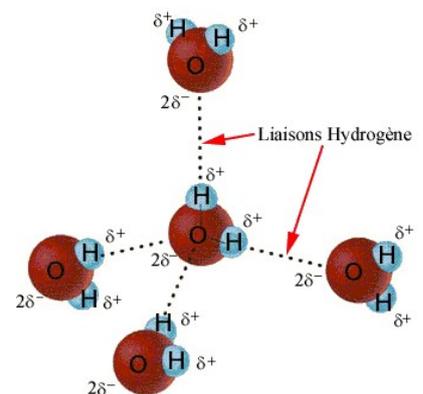
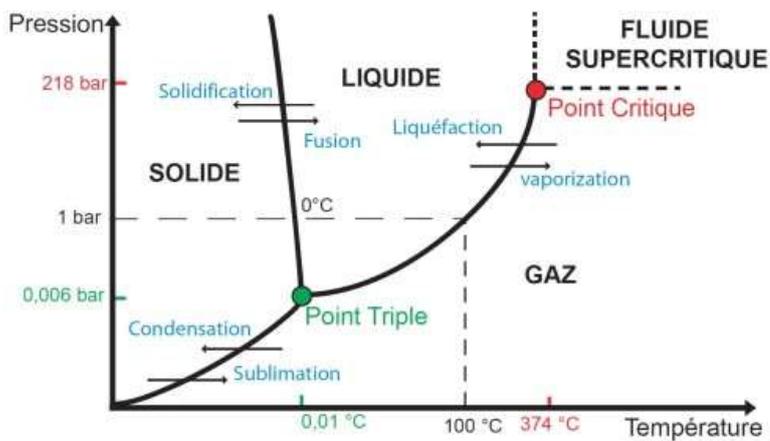
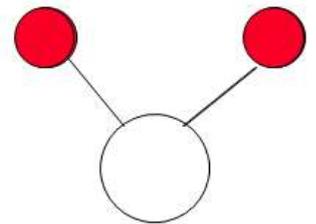
<b>1 Généralités</b>	<b>7</b>
1.1 H <sub>2</sub> O	8
1.2 cycle de l'eau	10
1.3 eaux naturelles	17
1.3.1 eaux océaniques	18
1.3.2 eaux continentales	19
1.3.2.1 eaux souterraines	20
1.3.2.2 eaux superficielles	21
1.4 les paramètres physico-chimiques de l'eau	23
1.4.1 éléments fondamentaux	24
1.4.1.1 unités utilisées	25
1.4.1.2 pH	27
1.4.1.3 alcalinité TA, TAC	28
1.4.1.4 Titre hydrotimétrique TH	31
1.4.2 éléments caractéristiques	37
1.4.3 éléments métalliques	41
1.4.4 éléments non métalliques et autres substances spécifiques	42
1.4.5 balance ionique	44

<b>2 Eau potable</b>	<b>46</b>
<b>2.1 Normes</b>	<b>47</b>
<b>2.2 Stress hydrique</b>	<b>51</b>
<b>2.3 Filières de traitement</b>	<b>55</b>
<b>2.3.1 filière classique</b>	<b>58</b>
2.3.1.1 séparation mécanique	58
2.3.1.2 oxydation – pré-oxydation	59
2.3.1.3 clarification	65
2.3.1.4 désinfection	66
2.3.1.5 affinage	69
<b>2.3.2 traitements spécifiques</b>	<b>71</b>
2.3.2.1 déferrisation, démanganisation	71
2.3.2.2 turbidité	75
2.3.2.3 ammoniacque	75
2.3.2.4 nitrates	77
2.3.2.5 neutralisation (équilibre calco-carbonique)	78
2.3.2.6 adoucissement, décarbonatation	92
<b>2.3.3 dessalement de l'eau de mer</b>	<b>96</b>
2.3.3.1 distillation	97
2.3.3.2 osmose inverse	99
2.3.3.3 électrodialyse	102
2.3.3.4 impacts environnementaux	105
<b>Echange d'ions</b>	<b>107</b>

# GENERALITES

## H<sub>2</sub>O

- Eau Molécule H<sub>2</sub>O
- à pression atmosphérique,  $T_{\text{fusion}} = 0^{\circ}\text{C}$      $T_{\text{ébullition}} = 100^{\circ}\text{C}$
- État gazeux, H<sub>2</sub>O
- État solide, structure tétraédrique
- État liquide, structure tétraédrique instable
- Diagramme d'état de l'eau



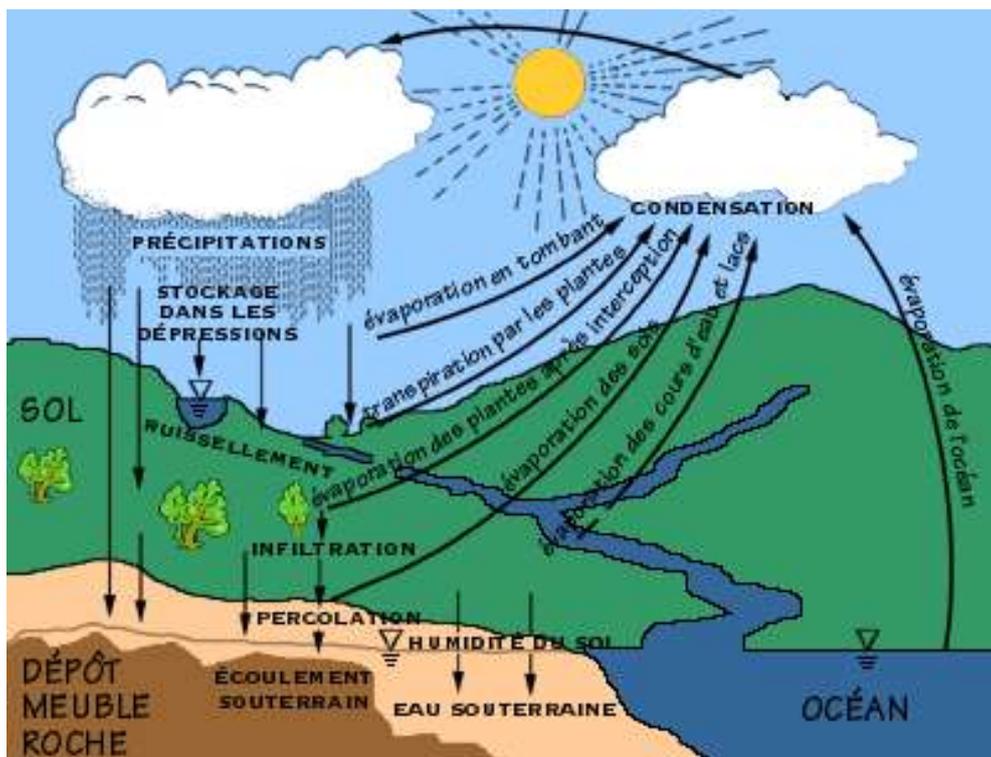
# H<sub>2</sub>O

Les propriétés physiques de l'eau :

	Particularité	Signification environnementale
Masse volumique	Maximum à 4°C Expansion lors des gelées	Stratification saisonnière des masses d'eau (mer et lac) Difficultés lors des gelées
Point de fusion et d'ébullition	Exceptionnellement élevés	Possibilité d'eau sous forme liquide sur Terre
Capacité calorifique	La plus élevée de tous les fluides	Eau fluide caloporteur Rôle de volant thermique des océans (inertie thermique)
Chaleur d'évaporation	Extrêmement forte	Tampon face aux températures extrêmes
Tension superficielle	Elevée	Formation de gouttes dans les nuages Grande capillarité
Absorption lumineuse	Elevée dans les domaines orange/rouge et IR	Photosynthèse aquatique Régulation de l'activité biologique et de la température atmosphérique
Propriété en tant que solvant	Dissout les sels et les molécules polaires	Transport de substances dissoutes dans les organismes vivants et dans le cycle biogéochimique

9

## CYCLE DE L'EAU



10

# CYCLE DE L'EAU

- Entre les quatre grands réservoirs d'eau de l'hydrosphère que sont les mers et océans, les eaux continentales (superficielles et souterraines), l'atmosphère, et la biosphère, l'échange d'eau est permanent et forme ce que l'on appelle le cycle externe de l'eau.
- Le moteur de ce cycle en est le soleil : grâce à l'énergie thermique qu'il rayonne, il active et maintient constamment les masses d'eau en mouvement.
- Ce cycle se divise en deux parties intimement liées :
  - une partie atmosphérique qui concerne la circulation de l'eau dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau essentiellement
  - une partie terrestre qui concerne l'écoulement de l'eau sur les continents, qu'il soit superficiel ou souterrain.

11

# CYCLE DE L'EAU

## **La dynamique du cycle de l'eau**

- En moyenne sur l'année et sur l'ensemble du globe terrestre, 65% des précipitations qui arrivent à terre s'évaporent, 24% ruissellent et 11% s'infiltrent.
- Des échanges d'eau se produisent également entre l'hydrosphère et le manteau terrestre. Par ailleurs, dans la haute atmosphère, des molécules d'eau sont constamment décomposées par les rayons ultraviolets solaires et l'hydrogène ainsi créé, trop léger pour être retenu par la gravité, s'échappe dans l'univers.
- Cependant, il semblerait que ces phénomènes restent suffisamment négligeables pour que globalement la quantité totale d'eau dans l'hydrosphère reste constante : l'analyse des sédiments marins a en particulier révélé que le volume des eaux océaniques avait très peu varié depuis un milliard d'années. On peut donc considérer que le cycle de l'eau est stationnaire c'est à dire que toute perte d'eau par l'une ou l'autre de ses parties, atmosphérique ou terrestre, est compensée par un gain d'eau par l'autre partie.

12

# CYCLE DE L'EAU

## Des stocks restreints

- Il n'est pas facile de chiffrer le volume total des eaux terrestres. Les seules quantités d'eau qu'il est aujourd'hui possible d'estimer sont celles contenues dans les quatre grands réservoirs de l'hydrosphère. Les volumes les plus difficiles à évaluer sont ceux des eaux souterraines de la croûte terrestre, dont les estimations varient suivant les auteurs en fonction de l'épaisseur de croûte qu'ils considèrent.
- Aucune estimation fiable n'est en revanche disponible pour l'eau contenue dans le manteau terrestre.
- Les stocks sont les volumes d'eau présents à un instant donné dans un réservoir donné. Ils donnent en quelque sorte une image instantanée des volumes d'eau disponibles.

13

# CYCLE DE L'EAU

Les stocks des différents réservoirs terrestres sont donnés dans le tableau ci-contre (d'après L'eau, Ghislain de Marsily, Dominos Flammarion, 1995). Les volumes sont exprimés en kilomètres cubes. Un kilomètre cube est le volume d'un cube de 1 kilomètre de côté, c'est-à-dire qu'il équivaut à mille milliards de litres.

Les réservoirs	Les stocks
<b>Océans</b>	<b>1 350 000 000</b>
<b>Eaux continentales (total)</b>	<b>35 976 700</b>
<i>Glaciers</i>	<i>27 500 000</i>
<i>Eaux souterraines</i>	<i>8 200 000</i>
<i>Mers intérieures</i>	<i>105 000</i>
<i>Lacs d'eau douce</i>	<i>100 000</i>
<i>Humidité des sols</i>	<i>70 000</i>
<i>Rivières</i>	<i>1 700</i>
<b>Atmosphère (humidité de l'air)</b>	<b>13 000</b>
<b>Biosphère (cellules vivantes)</b>	<b>1 100</b>

14

# CYCLE DE L'EAU

- Au total, il y a donc à l'heure actuelle 1 385 990 800 kilomètres cubes d'eau dans l'hydrosphère. Cependant, la plus grande part de cette énorme quantité d'eau provient des océans qui constituent le réservoir le plus important de la planète mais dont les eaux sont salées.
- Les eaux douces de la planète, c'est à dire celles dont la salinité est inférieure à 3 grammes par litre, représentent moins de 3% en volume de toute l'eau de l'hydrosphère et encore toute cette eau n'est-elle pas disponible, la majeure partie étant gelée aux pôles. Le volume des eaux douces directement utilisables est finalement d'environ 9 millions de kilomètres cubes, dont la plus grande part consiste en eaux souterraines.

15

# CYCLE DE L'EAU

Réserves d'eau sur terre :

- 97,4 % d'océans
- 2,6 % d'eaux continentales:
  - 2 % dans les glaces polaires
  - 0,6% d'eaux douces de surface et souterraines  
dont près de la moitié non disponible pour l'usage humain (techniquement ou financièrement)

16

# EAUX NATURELLES

## Eaux océaniques

(eaux des mers et océans)

## Eaux continentales

### Eaux superficielles

(fleuves, rivières, lacs)

### Eaux souterraines

(nappes, sources, eaux minérales)

17

# EAUX NATURELLES

## Eaux océaniques

- Elles sont très minéralisées et contiennent un très grand nombre de sels en solution (dissous), dont une forte proportion de sel sodique (surtout du Chlorure de Sodium NaCl).
- La *salinité totale moyenne* est variable selon les mers et océans.
- A titre indicatif, voici la composition moyenne d'un litre d'eau de mer à 35 g/l de salinité totale ( de masse volumique : 1028 kg/m<sup>3</sup>) :

Composants	Teneur (g/L)	Autres composants	Teneur (mg/L)
Chlorure de sodium	27,2	Fluor	1,40
Chlorure de magnésium	3,8	Silice	1,0
Sulfate de magnésium	1,65	Azote	1,0
Sulfate de calcium	1,26	Phosphore	0,060
Sulfate de potassium	0,86	Baryum	0,055
Carbonate de calcium	0,12	Fer	0,050
Bromure de magnésium	0,076	iode	0,050

18

# EAUX NATURELLES

## Eaux continentales

En principe les eaux de pluie ne contiennent que des **gaz atmosphériques**, à la limite de leur solubilité, soit :

- **oxygène** , 7 à 8 ml / litre
- **azote**, 15 ml / litre
- **gaz carbonique**, qui varie selon le lieu, la saison et la durée de chute des gouttes de pluie, soit entre 1 et 50 mg / litre. Cette présence de CO<sub>2</sub> explique l'acidité de cette eau par formation d'acide carbonique : pH voisin de 6.5 (cas général)
- **des microparticules minérales ou organiques diverses rencontrées dans l'atmosphère** (dont certaines bactéries)

*à noter que des microparticules de poussières sont à l'origine de la formation de gouttes de pluies : ces particules engendrent des microgouttelettes de glace qui grossissent jusqu'à former des gouttes (processus appelé germination ou nucléation).*

19

# EAUX NATURELLES

## Eaux continentales souterraines

L'eau de pluie arrivée au sol agit à la fois comme solvant et comme agent mécanique en entraînant des particules plus ou moins fines, voire colloïdales (  $d < 1\mu\text{m}$  ).

Cependant, la plupart des sels solubles ne sont, fort heureusement, pas entraînés en profondeur car ils sont, soit absorbés par l'humus, soit transformés à l'état de sels insolubles, par double décomposition au contact des roches calcaires.

Une épuration biologique et une transformation chimique se feront donc progressivement à mesure que l'on s'éloignera de la surface. Cette épuration sera complétée par une filtration à travers les terres, qui permettra même, dans certains cas, une **floculation** (processus d'agglomération et de précipitation des particules) des colloïdes.

Par ailleurs, la circulation des eaux pouvant s'effectuer jusqu'à plusieurs centaines de mètres, des modifications importantes de la composition des eaux se produiront au contact des roches du sous-sol.

20

# EAUX NATURELLES

## Eaux continentales souterraines

Si l'eau de pluie, riche en oxygène et en gaz carbonique, rencontre des calcaires, elle deviendra dure.

Si elle rencontre des pyrites, elle les oxydera et deviendra ferrugineuse.

Si cette même eau ne rencontre que des roches silicatés (feldspaths), elle entraînera de la silice et des bicarbonates alcalins et alcalino-terreux.

On comprend ainsi que le traitement en vue d'obtention d'eau potable dépendra de la nature du terrain.

### L'INFILTRATION DES EAUX:

Le volume des eaux qui s'infiltrent dans le sol dépend, évidemment de l'abondance des précipitations, mais, tout aussi évidemment de la texture du sous-sol.

Généralement, les roches ne sont pas absolument compactes mais présentent des pores ou des fissures. Les roches présentent donc une faculté plus ou moins grande à se laisser pénétrer par l'eau.

La **perméabilité** est la propriété que possède le sol de laisser passer l'eau à travers ses fissures ou ses pores.

La **porosité** est le rapport du volume des vides d'une roche à son volume total....

21

# EAUX NATURELLES

## Eaux continentales superficielles

Elles sont constituées par :

Les cours d'eau ( rivières et fleuves)

Les lacs d'eau douce

La composition de ces eaux tient à la nature géologique des terrains du bassin versant et à celle du fond de la retenue.

Elle subit des variations grâce :

au régime des vents qui modifie la concentration en  $\text{CO}_2$  (par agitation de l'eau)

aux pluies qui amènent surtout des matières en suspension

à la température qui règle les cycles de recirculation de la masse d'eau

Les eaux superficielles sont utilisées pour l'alimentation en eau potable lorsqu'il y a insuffisance de la ressource en eaux souterraines (nature du terrain, forte concentration en population).

# PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU

23

## Eléments fondamentaux

### Gaz dissous

- oxygène O<sub>2</sub>
- dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>
- diazote N<sub>2</sub>

exprimés en mg/L

### Matières en Suspension (MES)

- sable, argile
- végétaux
- algues, bactéries

exprimées en mg/L

### Matières organiques dissoutes

- acides humiques
- acides gras, chlorophylle, carbohydrates...

exprimées en mg O<sub>2</sub>/L

### Composés minéraux cationiques dissous

- calcium, magnesium
- sodium, potassium
- métaux lourds : fer, zinc, cuivre

exprimées en mg/L, °F ou meq/L

### Composés minéraux anioniques dissous

- chlorures
- carbonates
- sulfates
- nitrates
- nitrites
- phosphates

exprimées en mg/L, °F ou meq/L

24

# Eléments fondamentaux Unités utilisées

## Unité utilisée dans le domaine de l'eau pour la concentration des ions: meq / L (milli-équivalent par litre)

- unité plus pratique que le mg/L : traduit la capacité des ions à se lier entre eux.
- permet par exemple de comparer la quantité de cations à la quantité d'anions.
- Exemple:



1 mole de  $\text{Ca(OH)}_2$  libère 1 mole de  $\text{Ca}^{2+}$  et 2 moles de  $\text{OH}^-$

1 équivalent de  $\text{Ca(OH)}_2$  libère 1 équivalent de  $\text{Ca}^{2+}$  et 1 équivalent de  $\text{OH}^-$

- la Normalité ou  $1 \text{ équivalent} / \text{L} = \frac{\text{Masse molaire}}{\text{Valence}} (\text{g/L})$

ex : valence du calcium  $\text{Ca}^{2+} = 2$  (libère 2 électrons)

masse molaire = 40 g/mol

$\Rightarrow 1 \text{ meq/L de Ca} = 40/2 = 20 \text{ mg/L}$

25

# Eléments fondamentaux Unités utilisées

- meq/L : unité trop grande pour le domaine de l'eau
- $\Rightarrow$  unité spécifique : °F (degré français)
- à l'origine :  $1^\circ\text{F} = 10 \text{ mg/L de CaCO}_3$  (problème du calcaire)
- A retenir:

$$\begin{aligned} C(^\circ\text{F}) &= 5.C(\text{még.L}^{-1}) \\ C(\text{még.L}^{-1}) &= \text{Valence}.C(\text{mmol.L}^{-1}) \end{aligned}$$

Il existe aussi le degré : anglais, allemand, américain:

unité A = X unité B		unités B					ppm ou mg/L de $\text{CaCO}_3$
		meq/L	degré français	degré anglais	degré américain	degré allemand	
unités A	meq/L	1	5	3,496	2,911	2,8	50
	degré français	0,2	1	0,699	0,582	0,56	10
	degré anglais	0,286	1,43	1	0,832	0,8	14,298
	degré américain	0,343	1,717	1,201	1	0,961	17,173
	degré allemand	0,357	1,785	1,248	1,039	1	17,857
	ppm ou mg/L de $\text{CaCO}_3$	0,02	0,1	0,069	0,058	0,056	1

26

# Eléments fondamentaux pH

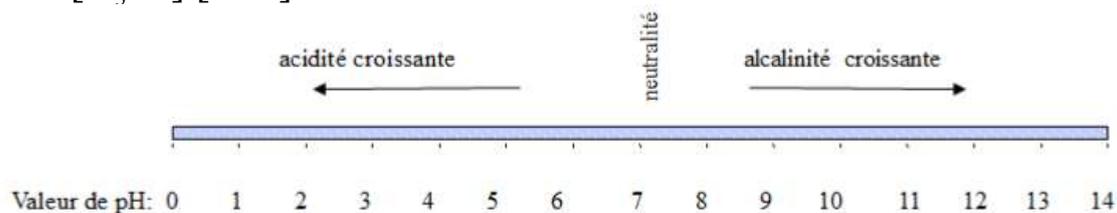
Dissociation de l'eau



$$\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$$

Produit ionique de l'eau  $K_e = 10^{-14}$

$$K_e = [\text{H}_3\text{O}^+].[\text{OH}^-]$$



Pour les eaux naturelles:  $6 < \text{pH} < 8$

27

# Eléments fondamentaux Alcalinité

**TAC** : titre alcalimétrique complet =  $[\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$

- correspond à la concentration de l'eau en ions  $\text{OH}^-$ , en ions carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  et bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$
- se mesure par la quantité d'acide à verser dans l'eau pour ramener son pH à 4,3 ( $\Leftrightarrow$ ) virage du méthylorange (**hélianthine**) du jaune au rouge orangé)

**TAC(°F)**: Volume d'acide 0,02 mol/L en  $\text{H}_3\text{O}^+$  nécessaire pour doser 100 mL d'eau

**TA** : Titre Alcalimétrique =  $[\text{OH}^-] + 1/2 [\text{CO}_3^{2-}]$

- correspond à la concentration de l'eau en ions  $\text{OH}^-$  (alcalinité libre) et 1/2 de la concentration en ions carbonates
- se mesure par la quantité d'acide à verser dans l'eau pour ramener son pH à 8,2 ( $\Leftrightarrow$ ) virage de **phénolphaléine** du rouge à l'incolore)

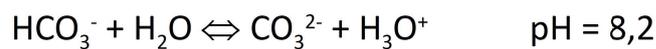
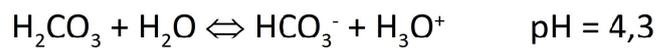
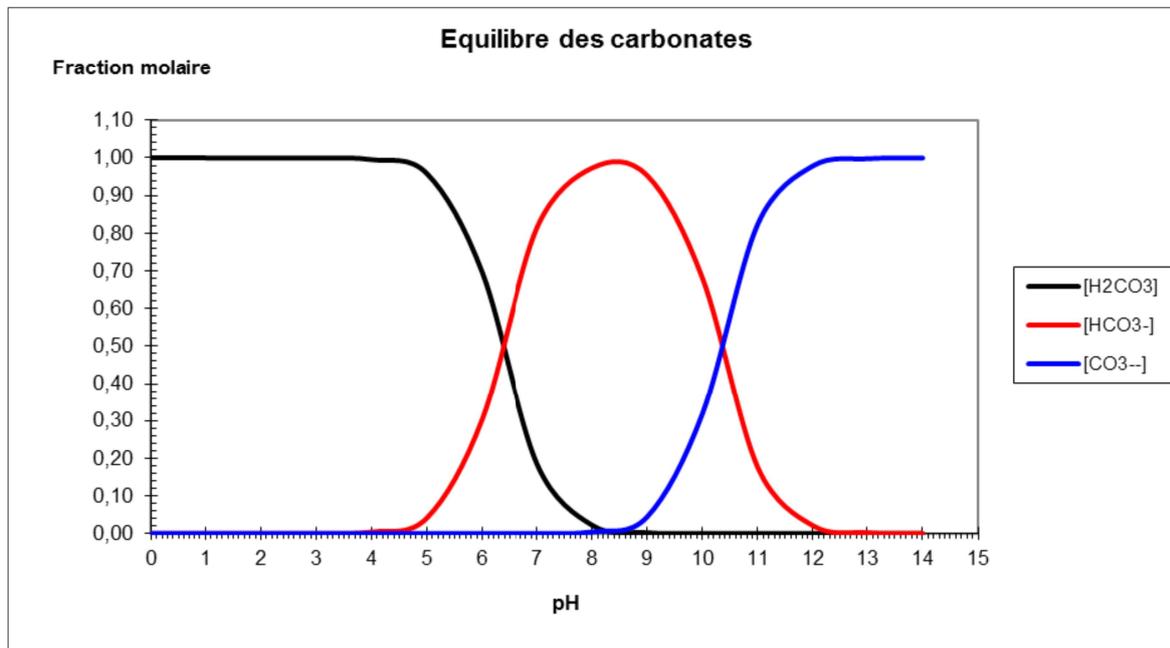
**TA(°F)**: Volume d'acide 0,02 mol/L en  $\text{H}_3\text{O}^+$  nécessaire pour doser 100 mL d'eau

- si pH d'une eau  $< 8,2$ , alors  $\text{TA} = 0$  et  $\text{TAC} = [\text{HCO}_3^-]$

**TAC est toujours  $>$  TA**

28

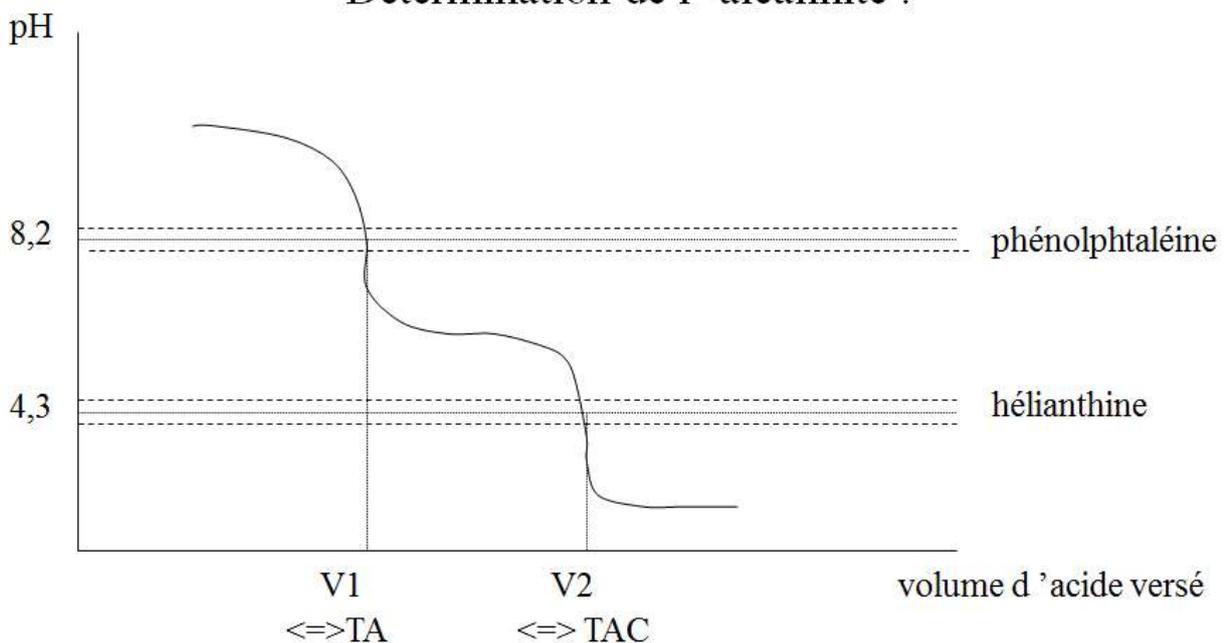
# Eléments fondamentaux Alcalinité



29

# Eléments fondamentaux Alcalinité

Détermination de l'alcalinité :



30

# Eléments fondamentaux

## Titre hydrotimétrique

**TH** : Titre Hydrotimétrique ou Dureté (°F)

Concentration d'une eau en cations (ions positifs) sauf les monovalents ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ...)

correspond donc essentiellement aux concentrations en calcium et magnésium

Mesure :

- soit par dosage à l'EDTA en présence de noir d'ériochrome NET et à pH 10 (tampon ammoniacal)

**TH(°F): Volume EDTA 0,1, mol/L nécessaire pour doser 100 mL d'eau**

- soit par calcul à partir de la teneur en Ca et Mg :

$$\text{TH (°F)} = 5 \times \left( \frac{2 \times [\text{Ca}]\text{mg/L}}{40,08} + \frac{2 \times [\text{Mg}]\text{mg/L}}{24,31} \right)$$

31

# Eléments fondamentaux

## Titre hydrotimétrique

Classification des eaux selon leur dureté :

- De 0° à 5°F = eau très douce (eau distillée, eau osmosée, eau de pluie, Volvic).
- De 6° à 10°F = eau douce (Vosges, Bretagne).
- De 11 à 25°F = eau moyennement dure (eau en région peu calcaire).
- De 26 à 30°F = eau dure (eau en région calcaire, Valvert, Evian).
- Supérieur à 30°F = eau très dure.

32

# Eléments fondamentaux

## Titre hydrotimétrique

### dureté carbonatée , calcique ou magnésienne

La dureté carbonatée comprend :  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$

$\text{HCO}_3^-$  influence le TAC

$\text{Ca}^{2+}$  a une influence sur le TH

$\text{CaCO}_3$  et  $\text{MgCO}_3$  Influencent sur TH , TA et TAC

La dureté calcique : exprimée en cations calcaire  $\text{Ca}^{2+}$

La dureté magnésienne : exprimée en cations magnésium  $\text{Mg}^{2+}$

33

# Eléments fondamentaux

## Titre hydrotimétrique

On distingue trois duretés :

=> Duretés : totale, permanente et temporaire

### **Dureté totale.**

Dureté totale = dureté permanente + dureté temporaire

### **Dureté temporaire.**

Au cours d'une ébullition prolongée, une partie des ions participant à la dureté de l'eau sont éliminés par la précipitation de carbonates de calcium et de magnésium.

Le précipité est un solide qui ne marque plus dans l'analyse de la composition de l'eau.

34

# Eléments fondamentaux

## Titre hydrotimétrique

D'après l'équilibre calco-carbonique, en chauffant le  $\text{CO}_2$  de l'eau s'évapore et l'équation chimique se déplace vers la gauche avec formation de  $\text{CaCO}_3$  peu soluble qui précipite.

Il y a donc diminution de la concentration en  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  qui représente la dureté carbonatée.

La différence entre la dureté totale (au départ, TH mesuré) et la dureté permanente (après ébullition) s'appelle la dureté temporaire.

Cette dureté temporaire est ici essentiellement due à la dureté carbonatée  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

**Equilibre calco-carbonique :**



35

# Eléments fondamentaux

## Titre hydrotimétrique

### Dureté permanente

La dureté résultante de l'eau qui a subi un tel traitement est appelée dureté permanente. La dureté **non carbonatée** correspond à la **dureté permanente**.

On a donc en général : Dureté permanente = TH - TAC

**Relations entre les différentes duretés : tableau exprimé en méq/L:**

	Dureté totale	Dureté temporaire	Dureté permanente
TH > TAC	TH	TAC	TH - TAC
TH = TAC	TH	TH = TAC	0
TH < TAC	TH	TH	0

36

# Eléments caractéristiques

- Ils ne donnent pas lieu à des réactions d'hydrolyse ou de précipitation et leurs concentrations varient de manière indépendante dans l'eau.
- sodium  $\text{Na}^+$
- potassium  $\text{K}^+$
- Magnésium  $\text{Mg}^{2+}$
  
- chlorures  $\text{Cl}^-$
- nitrates  $\text{NO}_3^-$
- sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$

La somme de ces 3 dernières concentrations donne la concentration en sels d'acides forts **SAF**

Ce sont pour l'essentiel des éléments majeurs de la croûte terrestre, dont la concentration dans l'eau dépend essentiellement de leur solubilité.

De plus, sachant que la probabilité de rencontrer des eaux présentant les mêmes valeurs sur ces paramètres est extrêmement faible, ils constituent la carte d'identité d'une eau.

37

# Eléments caractéristiques

## Diagramme de Piper

Représentation du faciès chimique d'un échantillon d'eau (ou ensemble d'échantillons); en quelque sorte la carte d'identité de l'eau.

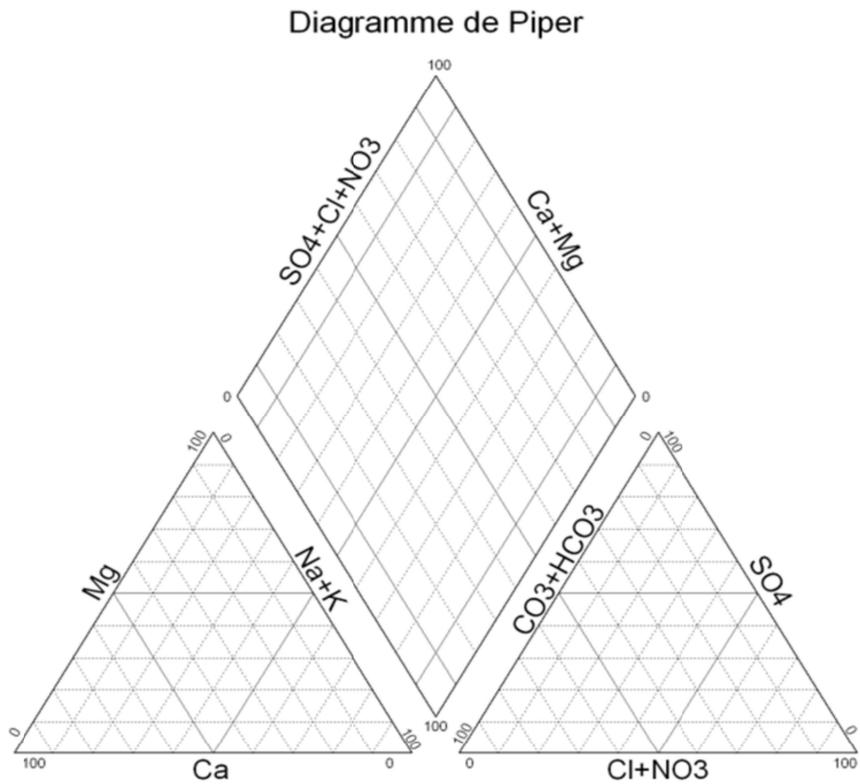
Composé de 2 triangles pour les faciès anioniques et cationiques, et d'un losange pour le faciès global.

Représentation adaptée pour étudier l'évolution des eaux lorsque la minéralité augmente, ou pour distinguer des groupes d'échantillons.

Unités  $\text{meq.L}^{-1}$  ramenées à des %.

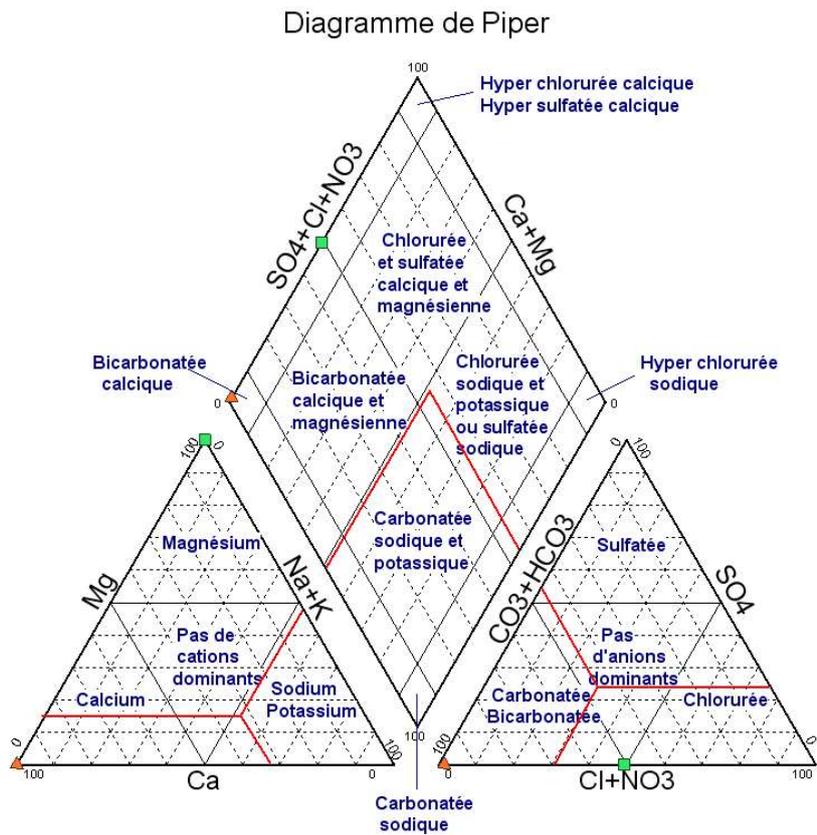
38

# Eléments caractéristiques



39

# Eléments caractéristiques



40

# Eléments métalliques

De nombreux métaux sont mis en évidence dans l'eau, généralement à l'état de traces; Ce sont des éléments de la croûte terrestre; on retrouve du fer, manganèse, aluminium, plomb, cadmium, mercure, cuivre, zinc, nickel, chrome, cobalt etc. Leur concentration dans l'eau dépend de la solubilité.

- **Fer et manganèse:** présence fréquente dans les eaux souterraines (10 à 15 mg/L pour le fer, 1 mg/L pour le manganèse). Présence plus rare dans les rivières. Ces éléments ne présentent aucun danger pour l'homme; par contre, ils influencent la qualité organoleptique de l'eau (aspect, goût, couleur) et peuvent être à l'origine du développement de micro-organismes initiant des phénomènes de corrosion.
- **Aluminium:** très abondant dans la croûte terrestre (8%), peu présent dans les eaux car très peu soluble. C'est un micropolluant toxique; on le soupçonne d'être associé aux lésions cérébrales de la maladie d'Alzheimer.
- **Plomb:** rarement détecté dans les eaux souterraines, sa présence est due à la pollution industrielle; La contamination des eaux de surface est plus fréquente; on observe aussi une contamination dans le réseau (vieilles canalisations en plomb). Le plomb est extrêmement toxique et n'est pas éliminé par l'organisme; il est principalement responsable du saturnisme (troubles neurologiques, retards mentaux chez le jeune enfant).

41

# Eléments non métalliques et autres substances spécifiques

- **Arsenic:** très présent dans les roches sédimentaires, on le retrouve dans les eaux souterraines avec de faibles concentrations; on peut le retrouver avec de plus fortes concentrations dans les eaux superficielles (contamination due à l'activité humaine). Substance cancérigène pour l'homme.
- **TriHaloMéthanes THM:** ou haloformes (composés organo-halogénés); sous-produits résultant de l'action du chlore sur les matières organiques et les ions bromates lors de la désinfection des eaux potables. Considérés comme cancérigènes.
- **Bromates:** ils se forment à partir de bromures (naturellement présents dans l'eau) par réaction avec l'ozone lors de la désinfection; ils peuvent également se former lors de la désinfection par l'hypochlorite de sodium (eau de javel). Considérés comme cancérigènes.
- **Chlorites et chlorates:** présence dans les eaux due à l'utilisation du dioxyde de chlore lors du traitement; toxicité pas clairement démontrée.

42

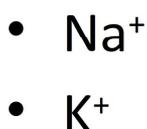
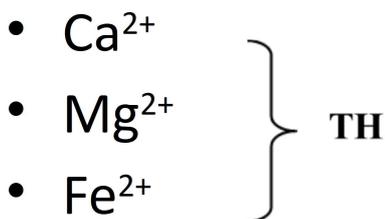
# Eléments non métalliques et autres substances spécifiques

- **Solvants chlorés:** présence dans les eaux superficielles (si pollution industrielle); concentration dans les eaux limitée car solvants volatils; peu biodégradables, ils s'accumulent dans les eaux souterraines.
- **Benzène et Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques:** présents dans les produits pétroliers et produits de combustion; présence dans l'eau naturellement (feux de forêts, activité volcanique), due aux rejets industriels (raffinerie, incinérateurs), ou due à la circulation automobile; composés cancérogènes avérés.
- **Pesticides ou produits phytosanitaires:** produits organiques de synthèse; présence dans les eaux due au ruissellement et au relargage par les sols. L'importance de la contamination dépend de la nature du terrain. L'atrazine (herbicide) est le pesticide le plus fréquemment rencontré dans les ressources en eaux.

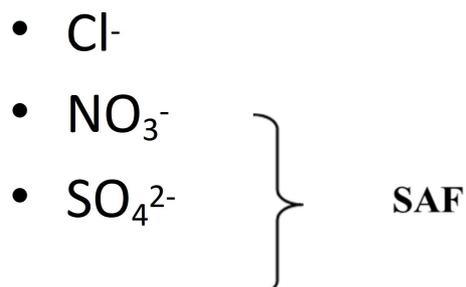
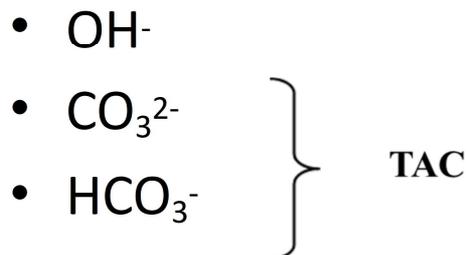
43

## Balance ionique

### • CATIONS



### • ANIONS



$$0,95 < \Sigma(\text{anions})/\Sigma(\text{cations}) < 1,05$$

44

# Balance ionique

Salinité totale d'une eau = cations + anions

Pour mesurer la salinité, on peut la rapprocher de la résistivité, ou conductivité :

- la conductivité de l'eau croît avec la minéralisation et la température
- unités de la conductivité : Siemens/cm ou  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- unité de la résistivité : ohm.cm
- En mesurant la conductivité ou la résistivité, et en utilisant des abaques, on peut déterminer la salinité totale d'une eau.

# EAU POTABLE

# Normes

Il existe 3 niveaux d'exigence de qualité:

Les valeurs guides, à ne pas dépasser, précisées par l'OMS

Les limites de qualité de l'eau du robinet

Les références de qualité, liées à la marche de la station de traitement d'eau

Une **valeur guide** est une estimation de la concentration d'une substance dans l'eau de boisson qui ne présente aucun risque pour la santé d'une personne qui consommerait cette eau toute sa vie. Elle est calculée à partir de la DJT (dose journalière tolérable attribuée à l'eau et à la consommation) pour chaque substance, et à partir du poids corporel.

Les **limites de qualité** portent sur des paramètres qui peuvent porter atteinte à la santé, par des effets immédiats, ou à plus ou moins long terme.

Les **références de qualité** concernent les substances sans incidence directe sur la santé.

Tous les pays du monde ne suivent donc pas les mêmes normes. Certains édictent leurs propres normes, d'autres adoptent celles conseillées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). En Europe, elles sont fixées par la Commission des communautés européennes.

47

# Normes

- Quelques exemples de **limites de qualité** à ne pas dépasser sur les eaux distribuées:

Paramètres	Limites de qualité	Unité
<i>Paramètres microbiologiques</i>		
Escherichia coli	0	/100 mL
<i>Paramètres chimiques</i>		
Fluorures	1,50	mg/L
Nitrates*	50	mg/L
Nitrites*	0,50	mg/L
Pesticides (par substance)**	0,10	µg/L
Pesticides (total)	0,50	µg/L
Plomb	10	µg/L

\* La somme de la concentration en nitrates divisée par 50, et celle des nitrites divisée par 3 doit rester inférieur à 1

\*\* A l'exception de 4 substances pour lesquelles la limite est de 0,03 µg/L

48

# Normes

- Quelques exemples de **références de qualité** à ne pas dépasser sur les eaux distribuées:

Paramètres	Références de qualité	Unité
<i>Paramètres microbiologiques</i>		
Bactéries coliformes	0	/100 mL
<i>Paramètres chimiques et organoleptiques</i>		
Chlore libre total	Absence d'odeur ou de saveur désagréable et pas de changement anormal	
Couleur, odeur, saveur	Acceptable par le consommateur et aucun changement anormal	
Fer total	200	µg/L
Température	25	°C
Equilibre calcocarbonique	A l'équilibre ou légèrement incrustantes	
<i>Paramètres indicateurs de radioactivité</i>		
Tritium	100	Bq/L

49

# Normes

Aujourd'hui, 70 paramètres contrôlent la qualité de l'eau des Européens. En France, à la fin du XIXe siècle, 6 paramètres servaient à définir une eau potable. Les normes ont donc considérablement progressé depuis lors.

Elles continuent d'ailleurs à évoluer dans le sens d'une toujours plus grande exigence : ainsi, outre de renforcer la sécurité sanitaire ce qui se traduit notamment par une diminution draconienne de la concentration du plomb dans l'eau, la dernière directive européenne, exige que les nouvelles normes soient appliquées non plus seulement aux points de captage, lors de la production et sur le réseau public de distribution d'eau, mais également en distribution, aux robinets. L'eau est aujourd'hui la denrée alimentaire la plus fortement réglementée.

La directive 98/83/CE du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine constitue le cadre réglementaire européen en matière d'eau potable. Cette directive s'applique à l'ensemble des eaux destinées à la consommation humaine, à l'exception des eaux minérales naturelles et des eaux médicinales. Elle concerne notamment les eaux fournies par un réseau de distribution public ou privé et les eaux conditionnées.

En France, les normes applicables sont définies dans l'[arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine](#)

50

# STRESS HYDRIQUE

En 2015, dans le monde, encore 663 millions de personnes n'ont pas accès à un point d'eau. Alors que la population mondiale a plus que triplé depuis le début du siècle, l'utilisation des ressources en eau douce a été multipliée par 6.

Dans les 50 années à venir, la population mondiale aura encore augmenté de 40 à 50 %.

Avec la croissance de la population, conjuguée à l'industrialisation et à l'urbanisation, les besoins en eau seront considérables et les répercussions sur l'environnement multiples.

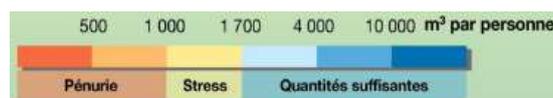
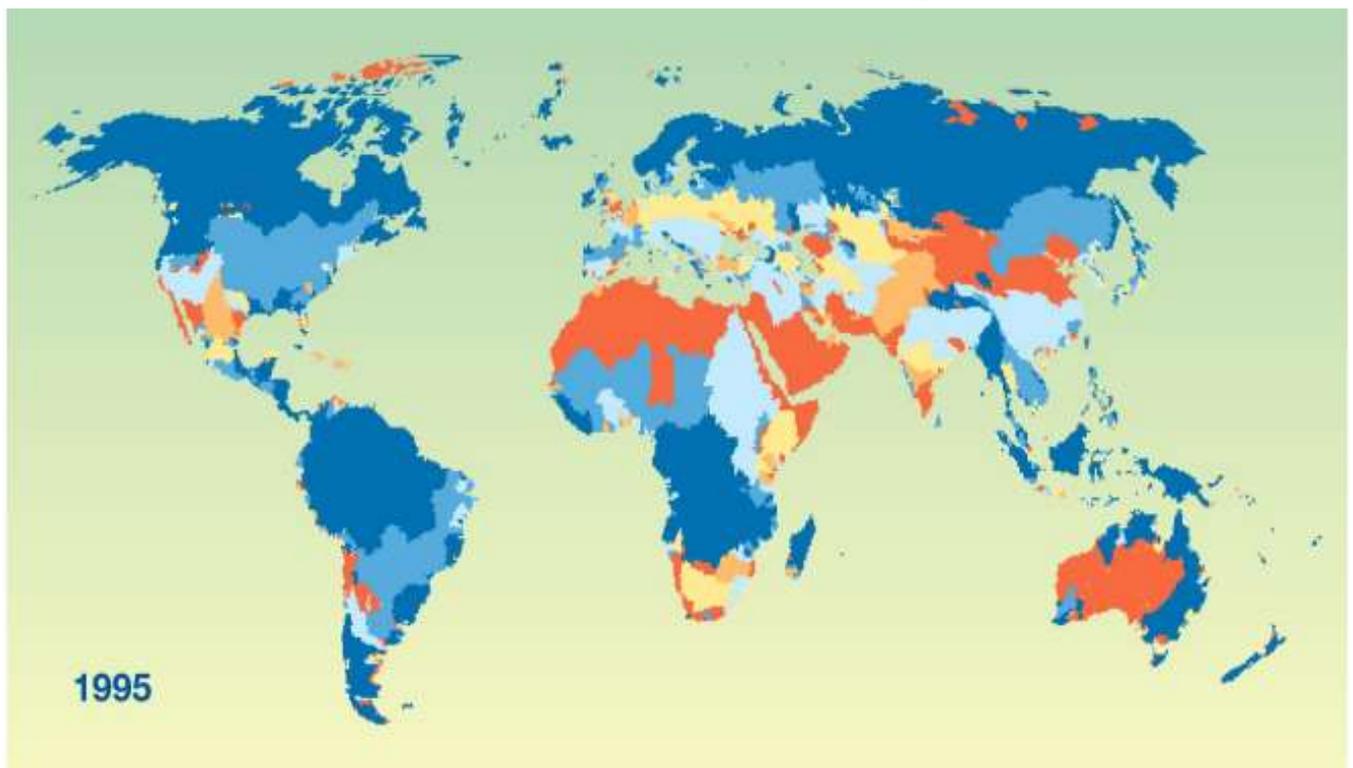
**D'ici 2025, 1,8 milliards d'individus vivront dans des régions soumises à une sévère pénurie d'eau !**

Le stress hydrique correspond à une demande en eau (pour les usages humains, dont l'alimentation en eau potable) supérieure aux ressources disponibles.

L'indicateur de stress hydrique mesure la part de l'eau prélevée par rapport aux ressources totales renouvelables. Il s'agit du ratio de criticité, qui indique que le stress hydrique repose sur la variabilité des ressources en eau. Le stress hydrique entraîne une dégradation des ressources d'eau douce en terme de quantité (surexploitation des eaux souterraines, rivières asséchées) et de la qualité (eutrophisation, pollution par la matière organique).

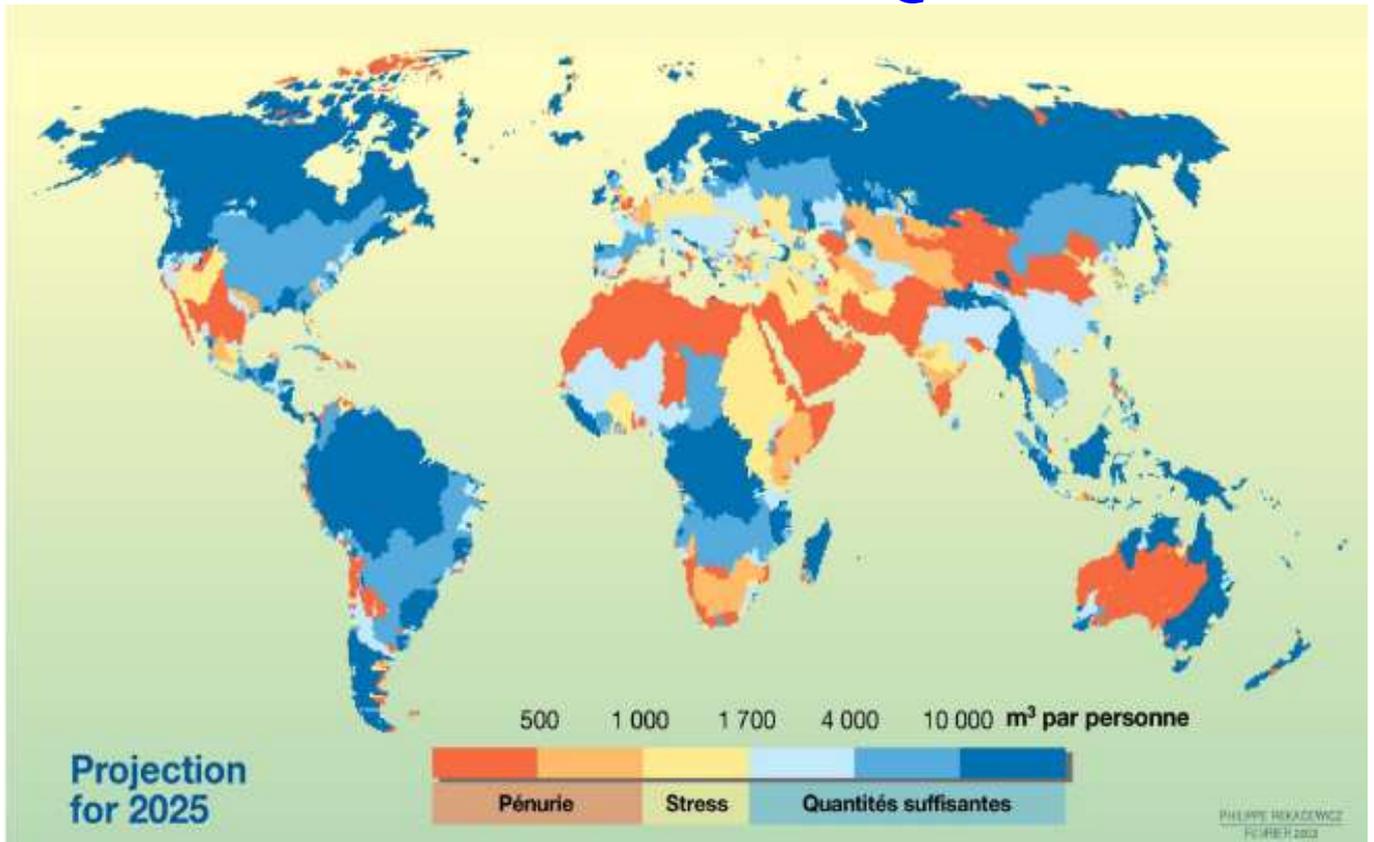
51

# STRESS HYDRIQUE



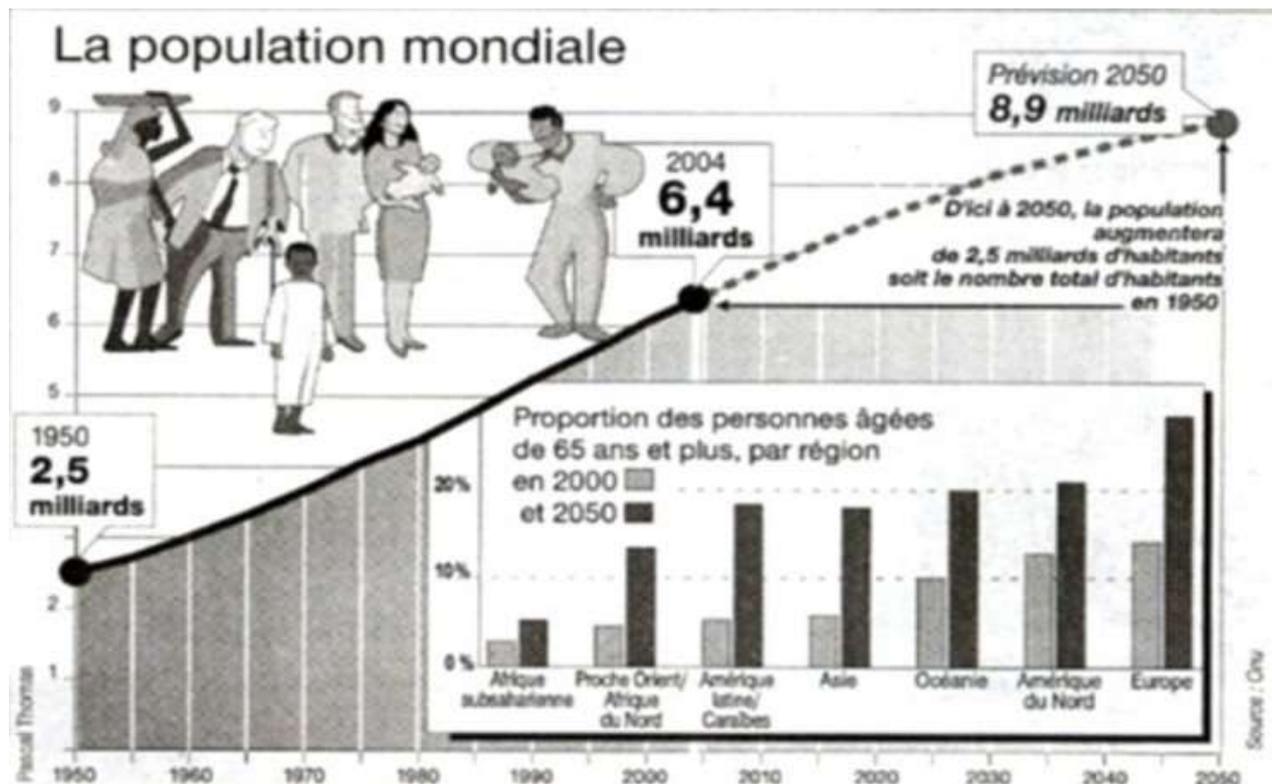
52

# STRESS HYDRIQUE



53

# STRESS HYDRIQUE



54

# FILIERES DE TRAITEMENT

Le traitement à appliquer aux eaux destinées à l'alimentation humaine consiste dans la majorité des cas à les débarrasser de toutes les matières en suspension et colloïdales qu'elles contiennent ainsi que de certaines substances dissoutes.

Pour atteindre ce but, il est généralement nécessaire de combiner plusieurs opérations élémentaires mettant en œuvre des phénomènes physiques, chimiques et biologiques. Par ailleurs, il convient parfois de corriger certaines caractéristiques de l'eau résultant des modifications apportées par les traitements ou préexistantes.

55

## EAUX SUPERFICIELLES

Les eaux superficielles ne sont pas directement utilisables pour l'alimentation en eau potable, car elles sont chargées de nombreuses impuretés (dissoutes ou en suspension).

Article R1321-38 Modifié par [Décret n°2007-49 du 11 janvier 2007 - art. 1 JORF 12 janvier 2007](#)

Les eaux douces superficielles sont classées selon leur qualité dans les groupes A1, A2 et A3 en fonction des critères définis par arrêté du ministre chargé de la santé relatif aux limites de qualité des eaux douces superficielles utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Leur utilisation pour la consommation humaine est subordonnée pour les eaux classées en :

- 1° Groupe A1 : à un traitement physique simple et à une désinfection ;
- 2° Groupe A2 : à un traitement normal physique, chimique et à une désinfection
- 3° Groupe A3 : à un traitement physique et chimique poussé, à des opérations d'affinage et de désinfection.

56

# EAUX SOUTERRAINES

Ces eaux sont présentes en tout point du sol (en plus ou moins grande quantité). C'est notre principale source d'approvisionnement en eau potable; lorsque la qualité naturelle le permet, une simple désinfection sera mise en œuvre avant distribution.

Il se peut toutefois que cette eau ne réponde pas aux exigences réglementaires:

teneurs excessives en certains éléments (fer, manganèse ...)

pollution (nitrates, pesticides ...)

Des traitements spécifiques pourront alors être mis en œuvre ...

57

## FILIERE CLASSIQUE

### Séparation mécanique

L'objectif de ce traitement physique est d'éliminer, par des procédés mécaniques, tous les éléments grossiers qui pourraient détériorer les équipements de la filière ou constituer une gêne pour les traitements ultérieurs.

Le dégrillage retient les corps flottants volumineux qui pourraient endommager les pompes et obstruer les canalisations.

Le dessablage et le débouillage retiennent les particules minérales grossières et une partie des limons pour protéger les équipements et éviter la surcharge du décanteur.

Un tamissage vise ensuite à éliminer les particules les plus fines (25 à 150  $\mu\text{m}$ ).

58

# FILIERE CLASSIQUE

## Oxydation, préoxydation

L'oxydation peut avoir différents objectifs:

Eliminer le goût, les odeurs et la couleur

Eliminer l'ammoniaque

Eliminer le fer et le manganèse (l'oxydation les transforme en hydroxydes insolubles facilement éliminables par décantation et filtration)

Oxyder les matières organiques dissoutes, qui se transforment en composés plus facilement biodégradables

Maintenir la propreté des installations, en luttant contre la prolifération d'algues (organismes non pathogènes, mais nuisant au bon fonctionnement de certains ouvrages, décanteurs et filtres notamment)

Selon la nature et la concentration de l'oxydant utilisé, ces différents objectifs seront plus ou moins bien atteints.

59

# FILIERE CLASSIQUE

## Oxydation, préoxydation

Les composés les plus souvent utilisés sont des agents chlorés:

Chlore gazeux  $\text{Cl}_2$

Hypochlorite de sodium (eau de javel)  $\text{NaClO}$

Dioxyde de chlore  $\text{ClO}_2$

Ozone  $\text{O}_3$

Permanganate de potassium  $\text{KMnO}_4$

60

# FILIERE CLASSIQUE

## Oxydation, préoxydation

### Oxydation par le chlore:

Bonne efficacité sur l'ammoniaque  $\text{NH}_4\text{OH}$ , le fer et le manganèse.

Il est introduit dans l'eau sous forme de gaz:



Ou sous forme d'hypochlorite de sodium:

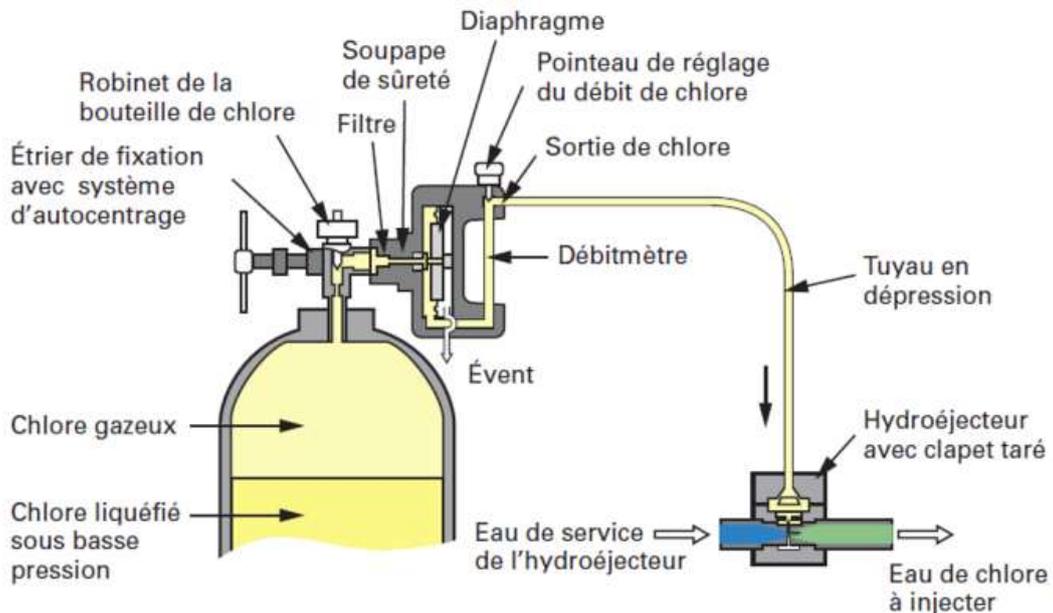


L'acide hypochloreux est plus efficace que l'ion hypochlorite.

L'oxydation par le chlore a néanmoins l'inconvénient de former des trihalométhanes (THM) et de générer de mauvais goûts. 61

# FILIERE CLASSIQUE

## Oxydation, préoxydation



Oxydation par Chlore gazeux

# FILIERE CLASSIQUE

## Oxydation, préoxydation

On peut aussi utiliser le dioxyde de chlore  $\text{ClO}_2$  (oxydant puissant):

Il agit plus rapidement que le chlore sur les matières oxydables et son efficacité de décoloration est supérieure. Il ne permet pas par contre l'élimination de l'ammoniaque.

Ce gaz étant très toxique, on le génère sur place (par réaction de  $\text{HCl}$  sur  $\text{Cl}_2$ ).

Pas de formation de THM; par contre, formation de chlorites  $\text{ClO}_2^-$ , chlorates  $\text{ClO}_3^-$

Le permanganate de potassium est principalement utilisé dans le cas où les eaux à traiter sont riches en fer et en manganèse ( $\text{KMnO}_4$  oxydant plus puissant, mais plus coûteux).

63

# FILIERE CLASSIQUE

## Oxydation, préoxydation

L'ozone est un oxydant puissant présentant de nombreux avantages:

amélioration des qualités organoleptiques de l'eau (goût, odeur, couleur)

Oxydation des matières organiques, pesticides

Elimination des algues

Inconvénients:

Il n'élimine pas l'ammoniaque

Il produit des bromates  $\text{BrO}_3^-$  au contact de bromures  $\text{Br}^-$

L'ozone est produit dans des générateurs d'ozone:

De l'air traverse un puissant champ électrique; l'ozone ainsi créé est mis en contact avec l'eau à traiter (tour d'ozonation).

64

# FILIERE CLASSIQUE

## Clarification

La clarification comportera plusieurs étapes:

La coagulation / floculation

Coagulation par des sels de fer, d'aluminium

Floculation par injection de floculant (souvent polymère organique)

La décantation s'effectue ensuite dans le bassin de décantation (séparation par gravité)

La filtration termine cette étape de clarification

(filtration dans la masse, sur lit de sable)

65

# FILIERE CLASSIQUE

## Désinfection

Cette étape a pour objectif d'éliminer les organismes pathogènes, et de maintenir la qualité de l'eau jusqu'à sa distribution. On retrouve les mêmes réactifs que pour l'étape de préoxydation.

### Avantages et inconvénients des désinfectants habituellement utilisés:

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Chlore gazeux</b>	Simple à mettre en œuvre Fort pouvoir rémanent	Eau mauvais goût Formation de THM
<b>Dioxyde de chlore</b>	Meilleur pouvoir rémanent Pas de formation de THM	Formation de chlorites, chlorates Gaz très toxique, généré sur place
<b>Ozone</b>	Désinfectant puissant (élimination des virus) Eau meilleur goût	Faible pouvoir rémanent
<b>Permanganate de potassium</b>	Très bon oxydant pour les métaux	Onéreux Faible vitesse de réaction

66

# FILIERE CLASSIQUE

## Désinfection

2 autres techniques sont aussi utilisées pour la désinfection:

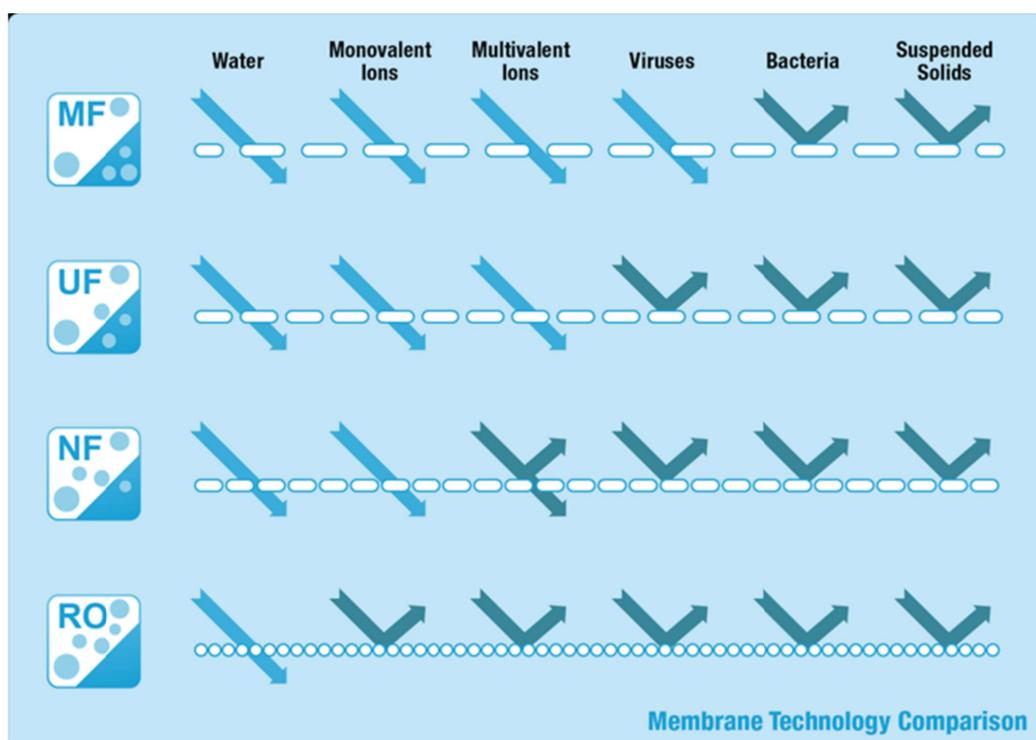
Désinfection par UV et membranes de filtration

	Avantages	Inconvénients
<b>UV</b>	Effet bactéricide à 250 nm Pas de sous produit indésirable	Pas d'effet rémanent
<b>Membrane de filtration</b>	Rétention des microorganismes (dépend de la technique utilisée) Permet d'éliminer plusieurs paramètres simultanément (MES, pesticides ...)	Technique coûteuse

67

# FILIERE CLASSIQUE

## Désinfection



68

# FILIERE CLASSIQUE

## Affinage

Cette opération d'affinage a pour but d'éliminer les matières minérales et organiques dissoutes dans l'eau (micropolluants, ammoniacque), et améliorer les qualités organoleptiques de l'eau.

Dans cette opération, on pourra utiliser du charbon actif, ou des membranes de filtration.

Selon le procédé utilisé, le charbon actif sera en grain (CAG) ou en poudre (CAP).

Le CAG est utilisé comme adsorbant, mais aussi comme lit filtrant. Il possède une structure poreuse très marquée; la surface des pores pour un gramme de charbon actif est d'environ 1000 m<sup>2</sup> !

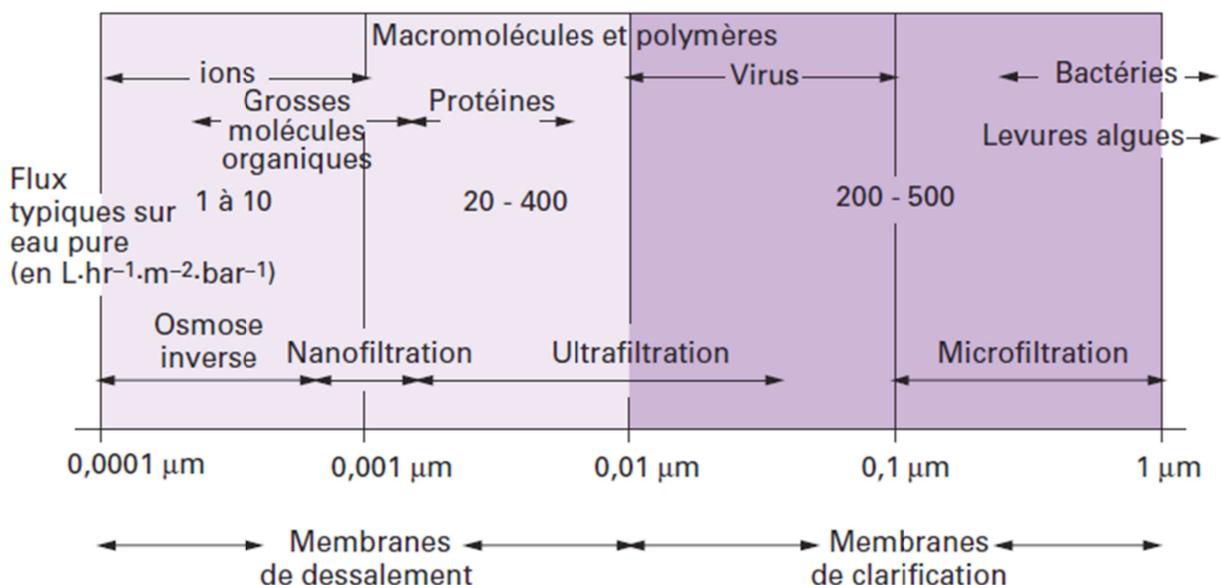
Le CAP est injecté sous forme de suspension, directement dans l'eau (souvent durant l'étape de floculation).

69

# FILIERE CLASSIQUE

## Affinage

Les **membranes de filtration** pourront, selon leur « maille », retenir des particules de très petite taille:



70

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Déferrisation

On peut rencontrer le fer à l'état naturel sous trois formes d'oxydation:

0: fer métal ou fer natif

+2: fer ferreux (II)

+3: fer ferrique (III)

**Diagramme de stabilité du Fer** (Diagramme potentiel pH ou diagramme de Pourbaix)

On retrouve sur ce diagramme les différents domaines d'existence de l'élément Fer: ceux-ci sont fonction du pH et du potentiel d'oxydo-réduction

Le rectangle ABCD correspond au domaine des eaux naturelles

Dans les eaux de  $\text{pH} < 8,3$ , les formes prédominantes sont  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $(\text{Fe}(\text{OH})_3)_s$

Elimination physico-chimique: Précipiter le Fer soluble en  $\text{Fe}(\text{OH})_3$

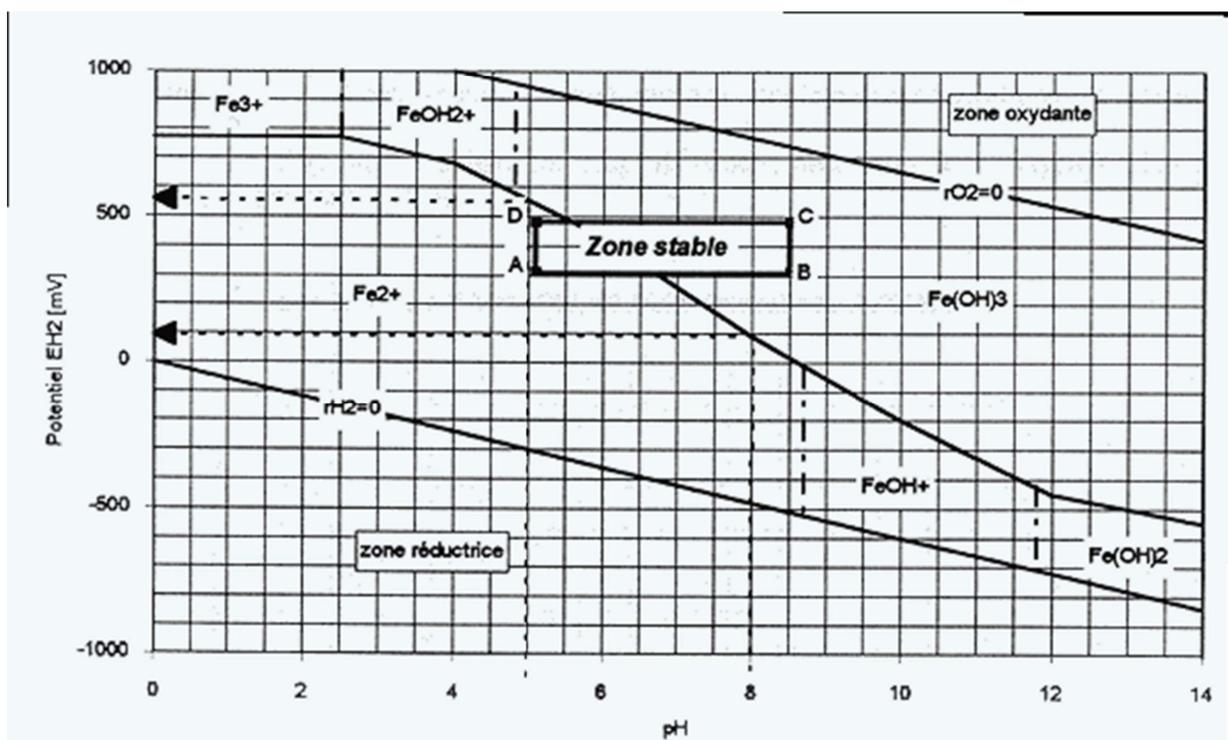
D'après le diagramme de Pourbaix, une augmentation du potentiel redox permettra cette précipitation: Une simple aération (oxydation par dioxygène de l'air) suffit.

Le précipité de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  est ensuite éliminé par décantation ou filtration.

71

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Déferrisation



72

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Démanganisation

On peut rencontrer le manganèse à l'état naturel sous trois formes d'oxydation:

+2: ion manganoux  $Mn^{2+}$  sous forme dissoute

+3: sesquioxyde de manganèse  $Mn_2O_3$  sous forme de précipité

+4: ion manganique  $Mn^{4+}$  sous forme dissoute et de précipité de dioxyde de manganèse  $MnO_2$

Dans les eaux de  $pH < 8,3$ , la forme prédominante est  $Mn^{2+}$  (rectangle ABCD).

Elimination physico-chimique: Précipiter le Manganèse soluble en  $MnO_2$ .

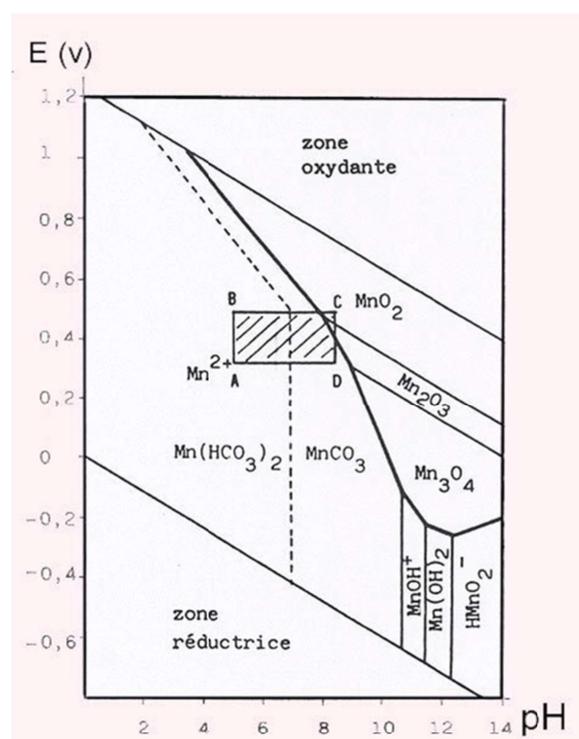
Pour cela, une forte augmentation du potentiel rédox permettra d'oxyder  $Mn^{2+}$  en  $Mn^{4+}$  (traitement par un fort oxydant  $KMnO_4$ ,  $O_3$ ,  $ClO_2$ ), puis  $Mn^{4+}$  précipite en  $MnO_2$

La mise en œuvre de cette oxydation est précédée d'une aération par soucis d'économie.

73

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Démanganisation



74

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Turbidité, ammoniacque

Le **traitement de la turbidité** aura pour objectif d'éliminer les MES et les colloïdes présents dans l'eau.

Ce traitement peut être:

Clarification (coagulation, floculation, décantation, filtration) comme pour les eaux de surface.

Membranes de filtration (micro et ultra filtration).

L'**ammoniacque** est responsable du mauvais goût de l'eau; de plus, il consomme le chlore de la désinfection, entraînant une possible prolifération bactérienne.

Le résultat de cette réaction est la formation de chloramines et de composés organiques chlorés.

Le taux de traitement au chlore doit être tel qu'il doit conduire à:

La destruction des composés du chlore (chloramines  $\text{NH}_2\text{Cl}$ : monochloramine)

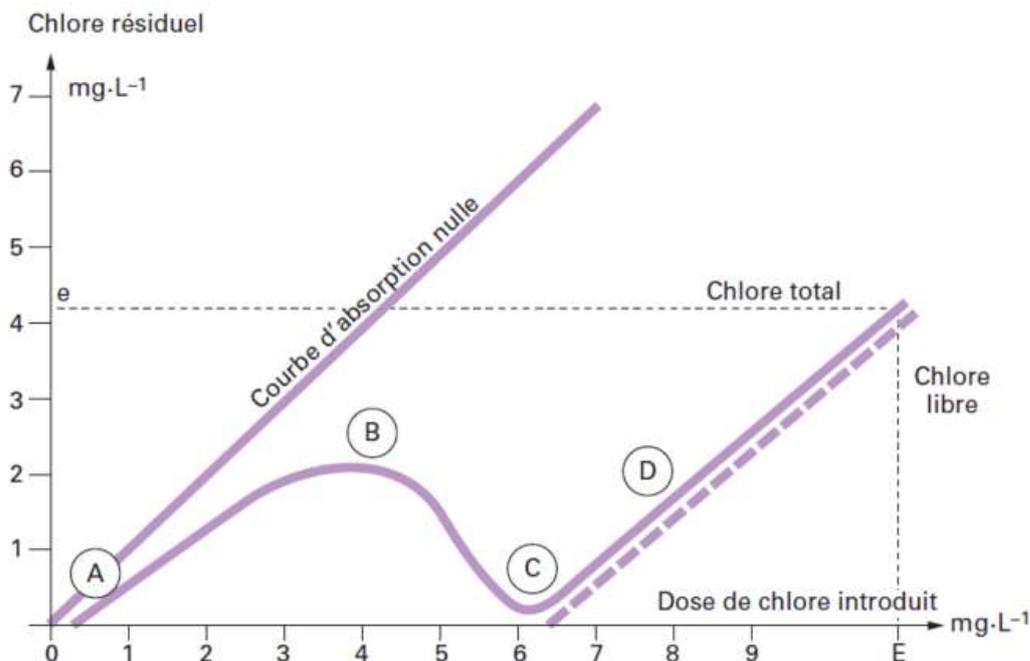
L'apparition de chlore libre.

Ceci sera obtenu si la chloration est effectuée au point critique ou break-point

75

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Turbidité, ammoniacque



De A à B, on observe la formation de chloramines

De B à C, destruction des chloramines

A partir de C (break-point), on retrouve le chlore libre; l'ammoniacque a été éliminé

76

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Nitrates

La dénitrification pourra s'effectuer par un traitement biologique, ou physico-chimique (résines échangeuses d'ions).

### Dénitrification biologique:

En réacteur anoxie, en présence de bactéries dénitrifiantes.

### Résines échangeuses d'ions:

Percolation de l'eau sur résine anionique initialement saturée en chlorures Cl<sup>-</sup>.

La résine ayant plus d'affinité pour les nitrates, elle les « échangera » contre ses chlorures.

77

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique

Plusieurs réactions s'effectuent dans l'eau:

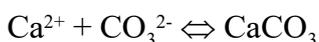
dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'eau :



Équilibres de dissociation de l'acide carbonique :



solubilité du carbonate de calcium :



Réaction de précipitation du carbonate de calcium ou équilibre calco-carbonique:

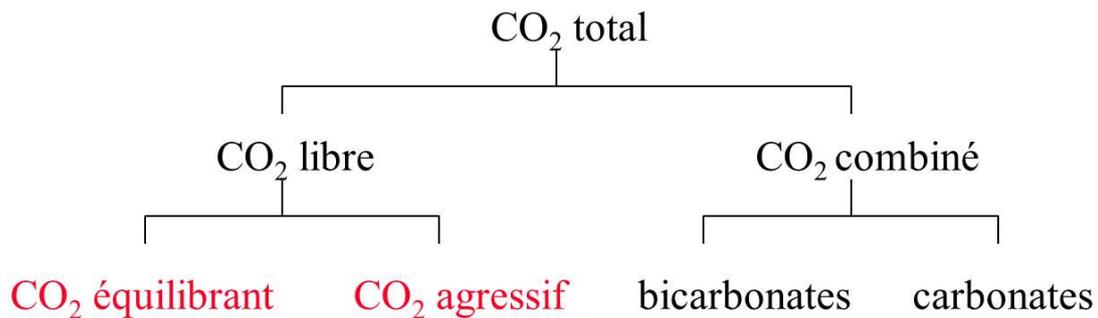


réaction équilibrée, qui dépend des équilibres précédents

78

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique



- Si CO<sub>2</sub> libre > CO<sub>2</sub> équilibrant ⇒ CO<sub>2</sub> agressif : eau agressive ou corrosive
- si CO<sub>2</sub> libre < CO<sub>2</sub> équilibrant ⇒ déficit en CO<sub>2</sub> équilibrant : eau entartrante ou incrustante
- si CO<sub>2</sub> libre = CO<sub>2</sub> équilibrant ⇒ eau à l'équilibre calcocarbonique

79

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique

**But : déterminer à partir de l'analyse d'une eau si celle-ci est à l'équilibre, agressive ou entartrante.**

**Nombreuses méthodes :**

- méthode pratique : test au marbre
- méthodes mathématiques : Hallopeau-Dubin, Legrand-Poirier Leroy (utilisée par les organismes officiels), Tillmans, Langellier, Rysnar

80

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Test au marbre

### Test au marbre (principe) :

Lorsqu'une eau atteint son équilibre, elle peut:

- soit déposer des sels : elle est alors dite “ incrustante ou entartrante ”
- soit en fixer : elle est alors dite “ agressive ou corrosive”

L'essai au marbre a pour but de déterminer cette propriété.

Si elle ne manifeste aucune de ces propriétés, elle est dite “ inactive ”.

### Réactif :

Marbre blanc chimiquement pur et finement pulvérisé.

81

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Test au marbre

### Mode opératoire :

Sur l'eau à analyser, effectuer les mesures de pH et d'alcalinité totale (TAC).

- Dans un Erlenmeyer de 250 ml, mettre un tiers de marbre finement divisé, et remplir d'eau à analyser en l'introduisant au fond du récipient au moyen d'un tube.
- Faire déborder largement en évitant toute introduction d'air.
- Boucher le flacon hermétiquement sans bulles d'air.
- Laisser en contact 48 heures en agitant de temps en temps par renversement.
- Filtrer (filtre rapide) et mesurer sur le filtrat le pH et le TAC : ceux-ci sont alors dits de “ saturation ou d'équilibre au  $\text{CaCO}_3$  ”.

82

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Test au marbre

### Interprétation des résultats :

Soient  $TAC_0$  l'alcalinité initiale et  $pH_0$  le pH initial,  
 $TAC_s$ , l'alcalinité de saturation ou d'équilibre,  
 $pH_s$ , le pH de saturation ou d'équilibre.

*Les propriétés de l'eau peuvent être déduites des relations suivantes:*

- $pH_s > pH_0$  et  $TAC_s > TAC_0$ , eau agressive
- $pH_s = pH_0$  et  $TAC_s = TAC_0$ , eau inerte ou à l'équilibre
- $pH_s < pH_0$  et  $TAC_s < TAC_0$ , eau entartrante

83

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Test au marbre

- Indice de Langelier

$$I_L = pH_0 - pH_s$$

Si  $I_L < 0$ , eau agressive

Si  $I_L > 0$ , eau entartrante

- Indice de Ryznar

$$I_R = 2pH_s - pH_0$$

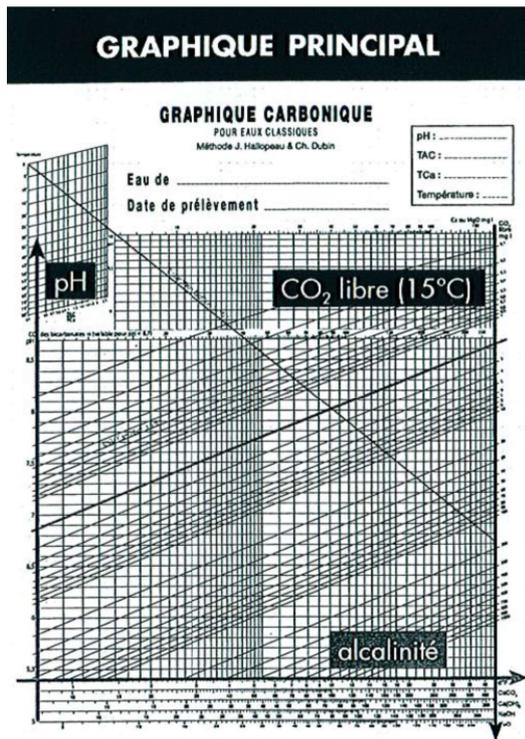
Selon sa valeur :

$I_R$	Tendance
4 à 5	Entartrage important
5 à 6	Entartrage faible
6 à 7	Equilibre
7 à 7,5	Légère corrosivité
7,5 à 8,5	Corrosivité notable
> 8,5	Corrosivité importante

84

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Hallopeau Dubin



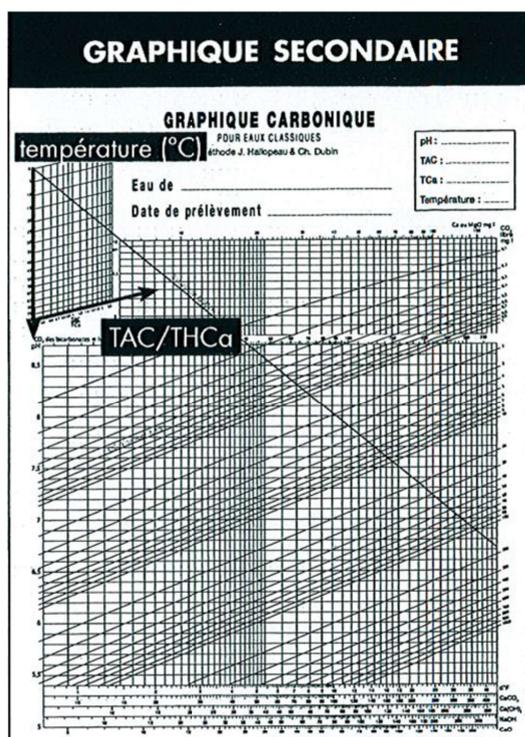
Connaissant:

- le pH
- TAC
- on place le point 1 représentatif de l'eau sur le diagramme principal (papier calque).

85

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Hallopeau Dubin



Connaissant:

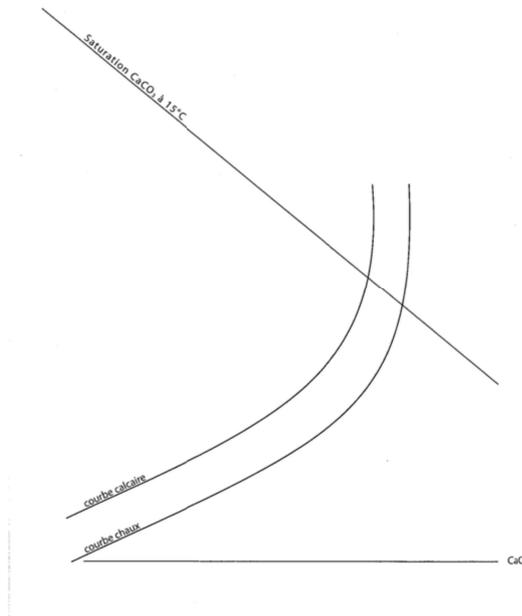
- la température
- le TAC
- le  $TH_{Ca}$

on place le point 2 sur le graphique secondaire (papier calque).

86

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Hallopeau Dubin

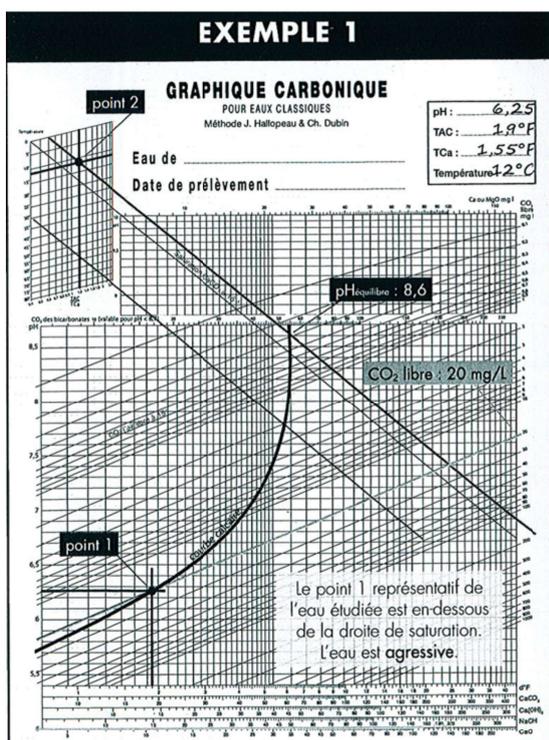


- On peut alors utiliser la feuille cartonnée où sont tracées les 2 courbes de neutralisation et la droite de saturation du  $\text{CaCO}_3$  (correspondant à l'équilibre calco-carbonique).
- On fait tout d'abord coïncider les 2 axes « CaO »
- Par translation horizontale du calque, amener le point 2 sur la droite de saturation du  $\text{CaCO}_3$ .
- On obtient ainsi la droite de saturation de l'eau étudiée:
  - au dessous de cette droite, l'eau est agressive.
  - au dessus de la droite, l'eau est incrustante.

87

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Hallopeau Dubin



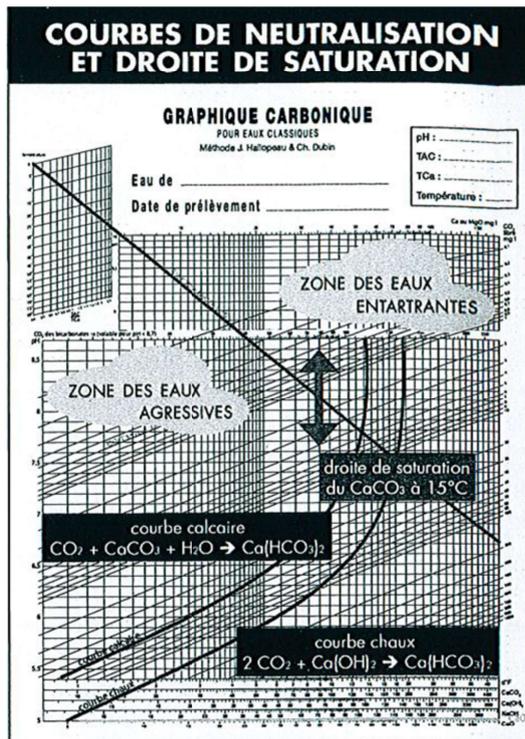
Tracé des courbes de neutralisation:

- De la même manière que précédemment, par translation horizontale, amener le point 1 sur la courbe de neutralisation choisie.
- Le point d'intersection entre la courbe et la droite représente le pH de neutralisation.
- Le traitement à apporter sera lu sur l'axe des abscisses.

88

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Hallopeau Dubin



- En fonction du réactif correcteur de pH utilisé, on choisit l'une ou l'autre des 2 courbes:
- Courbe de neutralisation par la chaux : avec une base forte, un acide fort (NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ...).
- Courbe de neutralisation par le calcaire : avec un sel d'acide faible (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub> ...).

89

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Legrand Poirier Leroy

- C'est la seule méthode rigoureuse ne négligeant aucun des facteurs influant sur les équilibres. Cependant, en dépit d'abaques réalisés par les auteurs pour simplifier les calculs, l'établissement de la courbe d'équilibre, qu'il est nécessaire de tracer par points, est extrêmement laborieuse. L'avènement des micro-ordinateurs a permis le développement de cette méthode. Elle est en effet très précieuse pour la résolution de problèmes délicats tels que ceux posés par plusieurs mélanges d'eau ou d'eaux fortement minéralisées.
- LPLWIN permet de savoir rapidement, à partir de l'analyse, si une eau est à l'équilibre, agressive ou incrustante vis à vis du carbonate de calcium.

### SAISIE D'ANALYSE ET RESULTATS :

La saisie de l'analyse se fait très simplement au clavier en remplissant la grille de saisie ou par importation de fichier (formats: XLS, Calco, LPL, dBase, LPLWIN). On peut alors lancer le calcul.

90

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Equilibre calco-carbonique – Legrand Poirier Leroy

	Valeur	Unité	en me/l	Résultats	Unité	Equilibres	Ca Cst.	Marbre	Unité	Equilibre	Atmosphère	Unité	
Température	5,0	°C		Σ Cations	3,681	me/l	pH	8,05	8,02		pH	8,7	
Conductivité	359	µS/cm	218	Σ Anions	3,745	me/l	Delta pH	0,25	0,22		Delta pH	0,9	
pH	7,8			<b>Balance</b>	<b>1,73</b>	%	<b>ΔCaCO<sub>3</sub></b>		<b>6,332</b>	<b>mg/l</b>	<b>Δ CO<sub>2</sub></b>	<b>-6,034</b>	<b>mg/l</b>
TH	15	°f	3,	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>*</sup>	9,687	mg/l	TAC	15,899	16,532	°f	TAC	15,899	°f
TA		°f		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	193,107	mg/l	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>*</sup>	5,372	6,078	mg/l	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>*</sup>	1,185	mg/l
TAC	15,9	°f	3,18	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,419	mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	192,425	200,214	mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	187,353	mg/l
CO <sub>2</sub> libre	6,875	mg/l	0,156	CO <sub>2</sub> Total	3,329	mM/l	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,751	0,72	mg/l	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	3,226	mg/l
Calcium	48	mg/l	2,4	λ	-0,39		CO <sub>2</sub> Total	3,254	3,392	mM/l	CO <sub>2</sub> Total	3,144	mM/l
Magnésium	10	mg/l	0,823	<b>SatuRatio</b>	<b>0,56</b>		<b>ΔCO<sub>2</sub>t</b>	<b>-0,075</b>	0,063	<b>mM/l</b>	<b>ΔCO<sub>2</sub>t</b>	-0,185	mM/l
Sodium	7	mg/l	0,304	<b>Type</b>	<b>Agressive</b>		Calcium	48,	50,533	mg/l	Saturatio	4,29	
Potassium	6	mg/l	0,154	SatuCO <sub>2</sub>	8,17		SatuCO <sub>2</sub>	4,53	5,13		Type	Calcifiante	
Ammonium	0,	mg/l		<b>Nom:</b> <input type="text"/>			Tracer...		Imprimer	Mode de dosage du T.A.C.			
Fer divalent	0,	mg/l		<input type="button" value="Calculer"/>			Traiter...		Fermer	<input type="button" value="Calcul d'incertitudes"/>			
Manganèse	0,	mg/l		Classe d'eau selon la Réglementation		Eau légèrement agress. (Cl. 2)/Ca Cs				<input type="button" value="Indices et Constantes"/>			
Chlorure	5	mg/l	0,141	Fichier: <input type="text"/>									
Sulfate	8	mg/l	0,167	Unités d'Entrée		Unités de Sortie							
Nitrate	16	mg/l	0,258										
Nitrite	0,	mg/l											
Fluore	0,	mg/l											
Oxygène diss.	0,00	mg/l	0,0										

91

## TRAITEMENTS SPECIFIQUES

### Adoucissement, décarbonatation

Si une eau naturelle est et trop dure, et trop alcaline, un traitement par une base (NaOH ou Ca(OH)<sub>2</sub>) suivi d'un traitement acide permettront de l'amener à des TH, TAC convenables.

#### Ajout de OH<sup>-</sup> pour adoucir l'eau :

Neutralisation des Hydrogencarbonates  $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^- \Leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$

Co-précipitation du Calcium et des Carbonates  $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \Leftrightarrow \text{CaCO}_3$

*Cette réaction n'est pas spécifique du Calcium et peut également avoir lieu avec d'autres cations métalliques contenus dans l'eau comme Mg, Fe ou Mn...*

*En fin de traitement l'eau contient du Carbonate de Calcium dissous. La solubilité de CaCO<sub>3</sub> est très faible (environ 20 mg/l) et il en reste des traces dans l'eau traitée.*

*Une filtration permettra d'éliminer le carbonate ayant précipité.*

92

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

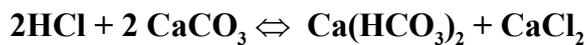
## Adoucissement, décarbonatation

### Neutralisation de la solution traitée par de l'acide

*L'acide neutralise les hydroxydes en excès en solution:*



Mais le  $\text{CaCO}_3$  soluble :



*Ce traitement ne permettra donc pas d'éliminer totalement ni le TH ni le TAC.*

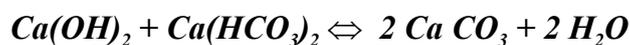
*Son efficacité vis à vis de l'adoucissement sera fonction de la nature du réactif utilisé et du pH final du traitement.*

93

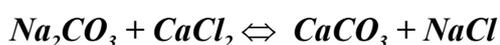
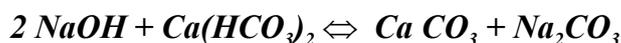
# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Adoucissement, décarbonatation

**La chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$**  permet à la fois la décarbonatation et l'adoucissement dans la mesure de la **dureté temporaire (carbonatée)**. Elle est donc **utilisée pour traiter des eaux dont la dureté permanente est très faible voire nulle**.



**La soude  $\text{NaOH}$**  permet l'adoucissement dans la mesure de la **dureté temporaire et de la dureté permanente** tant qu'elle est inférieure à la dureté temporaire. La décarbonatation est incomplète si la dureté permanente est faible ou nulle. **On l'utilise pour traiter des eaux dont les dureté temporaire et permanente sont équivalentes.**

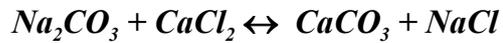


94

# TRAITEMENTS SPECIFIQUES

## Adoucissement, décarbonatation

Le Carbonate de Sodium  $Na_2CO_3$  permet l'adoucissement mais pas la décarbonatation. Il ne permet d'éliminer que la *dureté permanente*.



On peut utiliser également dans certains cas des mélanges chaux et de soude (chaux sodée) ou de soude et de carbonate de Sodium. (Soude Carbonatée).

95

## DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

Après un pré-traitement classique, l'eau de mer pourra être dessalée en vue de la potabiliser:

Ce pré-traitement peut être:

- Dégrillage et tamisage (séparation mécanique afin d'éliminer les plus gros déchets)
- Flocculation et décantation (élimination des MES)
- Filtration sur sable ou sur charbon actif (élimination MES, substances dissoutes)
- Ozonation (pour améliorer la couleur de l'eau, et pour son effet bactéricide/virulicide)
- Chloration (pour son effet rémanent, afin d'éviter le développement de bactéries)

On obtient alors de l'eau salée que l'on va pouvoir dessaler ...

96

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Distillation

La distillation occupe aujourd'hui environ 60% du marché mondial du dessalement. Ce principe de dessalement très simple est la plus vieille et la plus rustique des techniques de dessalement, elle a été utilisée dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux. Il s'agit simplement de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide.

Dans le cadre d'une station de potabilisation, plusieurs évaporateurs seront utilisés par soucis de moindre coût énergétique.

Le principal avantage de cette technique est sa simplicité (maintenance d'équipement et d'installation peu importante).

Les désavantages sont un coût élevé (procédé énergivore 15 kWh/m<sup>3</sup>) et un stockage spécifique de l'eau pour éviter la contamination.

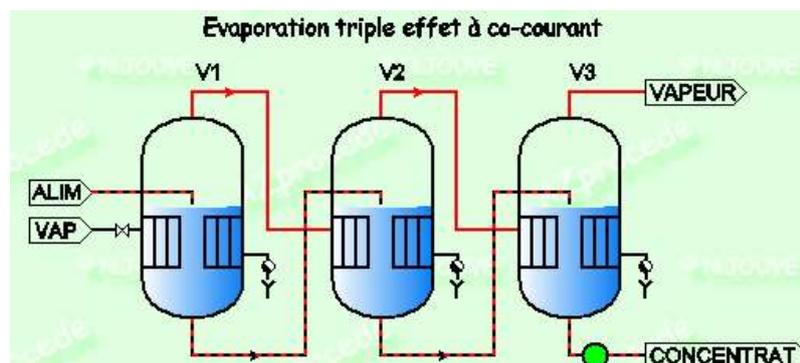
97

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Distillation

Dans l'exemple ci-dessous, on utilise un évaporateur triple effet:

- Le premier évaporateur (à gauche) fonctionne à pression atmosphérique et permet de vaporiser l'eau de mer.
- Cette vapeur d'eau est utilisée comme moyen de chauffage dans un 2<sup>ème</sup> évaporateur fonctionnant sous une pression réduite. Etant assez énergétique grâce à la pression réduite, elle permet aussi de vaporiser l'eau de mer.
- Le même phénomène se retrouve dans le troisième évaporateur ...
- L'eau de mer distillée est récupérée sous forme de condensat en sorties des serpentins de chauffage à partir du 2<sup>ème</sup> évaporateur et sous forme de vapeur V3.



98

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Osmose inverse

L'osmose inverse est très utilisée pour le dessalement de l'eau de mer.  
Ce procédé permet aussi de produire une eau très pure.

Pour comprendre l'osmose inverse, l'**osmose** (A) doit d'abord être expliquée:

Deux solutions salines présentant des concentrations différentes sont séparées par une membrane semi-perméable; cette membrane est uniquement perméable à la molécule d'eau.

Pour compenser les différences de concentration, l'eau s'écoule de gauche à droite à travers la membrane. La surface de l'eau monte à droite jusqu'à ce qu'un équilibre soit établi (équilibre osmotique).

Les deux côtés présentent désormais la même concentration saline.

La différence de pression ainsi obtenue entre les deux côtés de la membrane est appelée pression osmotique.

99

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Osmose inverse

Pour inverser le sens d'écoulement de l'eau (**osmose inverse**), la pression osmotique doit être dépassée.

Pour cela, une pression supérieure à la pression osmotique doit être appliquée sur le côté droit de la membrane (pouvant dépasser les 100 bars !).

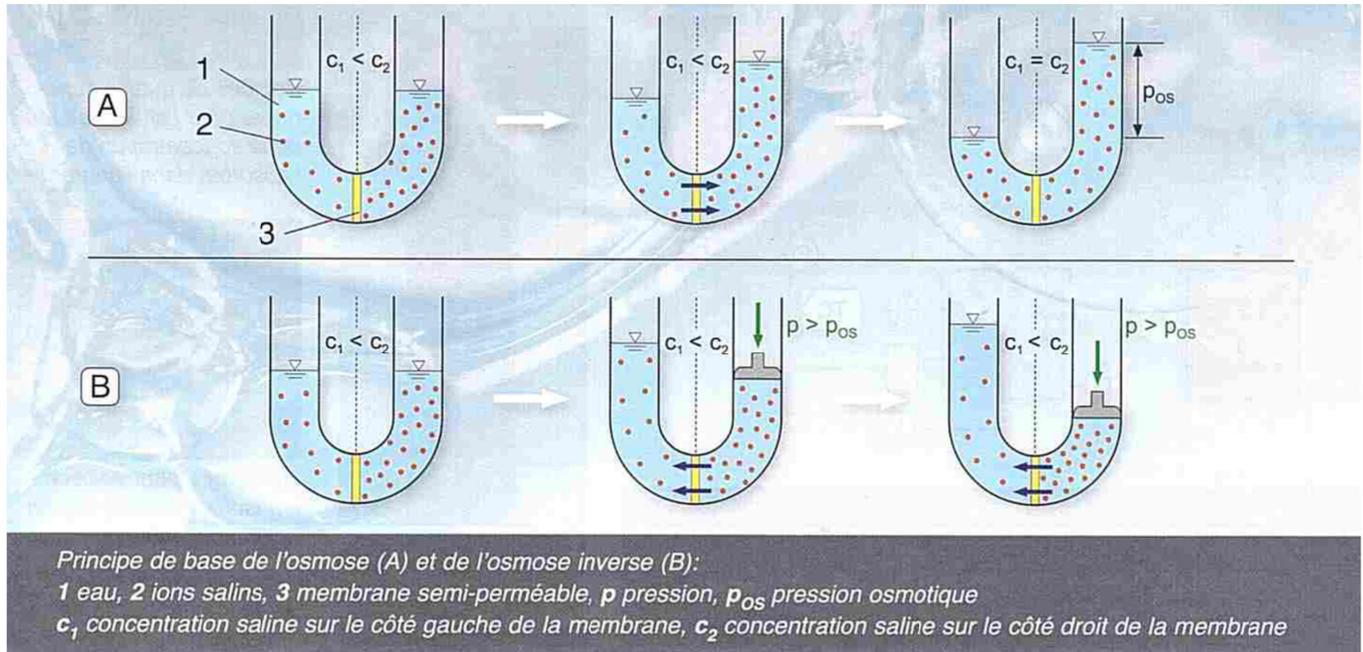
L'eau s'écoule alors de droite à gauche à travers la membrane. Cela génère un rétentat sur le côté droit et un perméat sur le côté gauche.

Le principal avantage de cette technique est que l'eau produite est de qualité (bonne pour la santé).

Les désavantages sont un coût élevé (3,5 kWh/m<sup>3</sup>) et une forte perte en eau.

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Osmose inverse



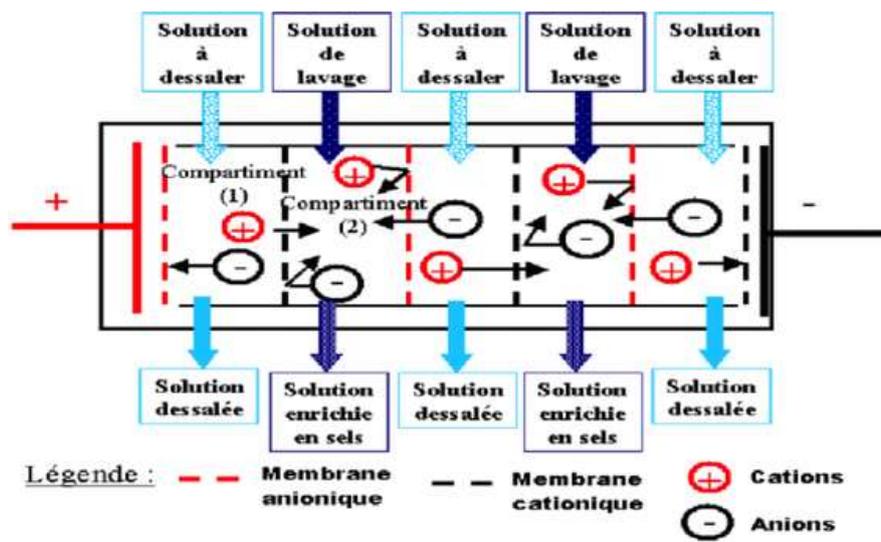
101

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Electrodialyse

L'électrodialyse est un procédé électrochimique qui permet d'extraire les ions d'une solution en les déplaçant. Par exemple, par électrodialyse, on peut extraire les ions  $Na^+$  et  $Cl^-$  de l'eau de mer.

Un électrodialyseur est constitué d'un grand nombre de compartiments alimentés électriquement et hydrauliquement en série qui sont séparés par des membranes résistantes mécaniquement, imperméables à l'eau, chimiquement inattaquables, constituées de résines échangeuses d'ions.



102

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Electrodialyse

D'une part, les membranes anioniques contiennent des résines à groupes cationiques fixes. Ces groupes sont neutralisés par des anions situés dans la résine. Quand cette membrane est mise dans une solution d'électrolyte, les anions en solution peuvent pénétrer dans la membrane et remplacer les anions présents initialement, alors que les cations sont repoussés par les cations fixés sur la résine. D'autre part, les membranes cationiques : le principe est identique; elles contiennent des groupes anioniques fixes qui permettent la pénétration des cations et repoussent les anions.

L'extraction des ions se fait par migration de ces derniers à travers les membranes dites « sélectives » sous l'action d'un champ électrique. Ainsi, seuls les anions, chargés négativement, peuvent traverser les membranes anioniques et seuls les cations, chargés positivement, peuvent traverser les membranes cationiques. En plaçant alternativement une membrane cationique et une membrane anionique, puis en créant une charge positive à une extrémité de l'électrodialyseur et une charge négative de l'autre, on va attirer les cations vers la charge négative et les anions vers la charge positive, piégeant ainsi dans certains compartiments les ions qui sont alors retirés de la solution dans les autres compartiments.

103

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Electrodialyse

Ainsi, le compartiment où il y a l'eau douce à la fin est appelé « compartiment de dilution » et le compartiment où l'on récupère la saumure, solution aqueuse très concentrée en sel, est appelé « compartiment de concentration » .

Le principal avantage de cette technique est que la perte en eau est faible (autour de 10 %).

Les désavantages sont un coût élevé (4 kWh/m<sup>3</sup>) et cette technique ne peut dessaler que des eaux saumâtres (concentration totale en sels dissous 1 et 10g.L<sup>-1</sup>) ...

la teneur moyenne de l'eau de mer est de 35g.L<sup>-1</sup>

104

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Impacts environnementaux

Le dessalement de l'eau a un impact à la fois positif sur l'homme mais de nombreux impacts négatifs sur l'environnement.

Le principal effet positif direct est un accroissement des disponibilités en eau. Cela permet donc à des pays en manque d'eau potable de disposer de ressources suffisantes, de manière à assurer une accessibilité à l'eau pour tous.

### Impacts liés aux rejets:

Les effluents rejetés ont une forte concentration en sel, une température élevée, et des traces potentielles de produits de traitement; cette saumure si elle est rejetée telle quelle va entraîner des modifications du milieu local (zones anoxie à cause de la forte densité de cette eau, brassage des eaux modifié; passage de la lumière difficile affectant la photosynthèse des espèces marines végétales).

### Impacts liés au captage de l'eau:

Aspiration d'organismes marins (poissons, plancton )

105

# DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

## Impacts environnementaux

### Impacts sur la pollution atmosphérique:

Ces techniques de dessalement sont très consommatrices d'énergie et cette énergie est le plus souvent fournie par des combustibles fossiles (génération de CO<sub>2</sub>).

Les usines alimentées à l'énergie nucléaire sont responsables de fortes émissions de gaz à effet de serre (dues à l'extraction de l'uranium, en amont et au démantèlement nucléaire en aval).

A l'heure actuelle, entre les impacts environnementaux, et le coût du dessalement, des usines fonctionnant aux énergies renouvelables voient le jour.

Le Maroc va accueillir prochainement (prévision 2021) près d'Agadir la plus grande usine de dessalement au monde fonctionnant à l'énergie solaire.

106

# L'ÉCHANGE D'IONS

## PRINCIPE DE L'ÉCHANGE D'IONS

C'est un procédé physico-chimique au cours duquel une matière solide échange des ions provenant d'un liquide contre une quantité équivalente d'ions de même charge.

Les résines sur lesquelles sont fixés ces ions sont des polymères organiques disposant au sein de leur structure chimique des ions mobiles fixés sur la structure de base par l'intermédiaire de groupements chimiques dits « groupements fonctionnels ».

Ces résines utilisées dans le traitement de l'eau se présentent presque toujours sous forme de billes semi-plastiques, microporeuses ou macroporeuses. Leur diamètre est compris entre 0,2 et 2 mm,

La structure de base de ces billes est obtenue par synthèse organique (par réaction de polymérisation d'un composé ou de copolymérisation de plusieurs composés organiques). Il s'agit donc de résines de synthèse. C'est pourquoi les échangeurs d'ions sont très couramment appelés « résines échangeuses d'ions ».

Chaque échangeur d'ions a des affinités différentes pour les divers ions de l'eau avec lesquels il est mis en présence.

Chaque fois qu'une résine porteuse d'ions A pour lesquels elle a une affinité faible est mise en présence d'un liquide contenant des ions B pour lesquels elle a une affinité plus grande, on constate que les ions B sont fixés par la résine qui en échange cède des ions A.

Ainsi, le liquide percolant sur l'échangeur d'ions s'appauvrit en ions B et s'enrichit en ions A.

Dans le même temps, la résine s'appauvrit en ions A et s'enrichit en ions B.

Cet échange d'ions s'effectue charge électrique pour charge électrique. Ainsi si les ions A sont monovalents et les ions B sont bivalents, chaque fois qu'un ion B est fixé sur la résine, celle-ci libère en échange deux ions A.

109

## Phases principales observées

### **Phase de fixation:**

- Phase pendant laquelle on observe l'échange.
- On fait percoler l'eau sur la résine, de haut en bas (co-courant).
- Le lit de résine doit être homogène: la résine doit avoir été uniformément remouillée et régénérée (pas de bulles d'air sinon, on a des passages préférentiels).
- La phase de fixation s'effectue tant que la résine n'est pas saturée.

### **Phase de régénération:**

- Elle s'effectue lorsque la résine est saturée (sa capacité d'échange est alors épuisée).
- (Dans le cas du traitement de l'eau en vue d'un adoucissement, la résine cationique sera saturée en cations de l'eau : essentiellement en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ).
- La régénération consiste à faire percoler sur la résine une solution régénérante.
- Comme les ions de cette solution régénérante ont peu d'affinité pour la résine, on utilise un faible débit (temps de passage sur la résine augmenté et une forte concentration).

110

La phase de régénération comporte plusieurs étapes:

- Détassage ou soulèvement de la résine (afin de diminuer les pertes de charge et éviter les passages préférentiels si présence de bulles d'air).
- Percolation de la solution régénérante (mise en contact de la résine avec le régénérant; régénération de la totalité du volume de résine).
- Déplacement ou rinçage lent ( à l'eau déminéralisée, pour éviter le début d'échange).
- Rinçage rapide (évacuation de l'excès de régénérant de l'installation; rinçage à l'eau à traiter).

Il existe 2 possibilités de régénération de la résine :

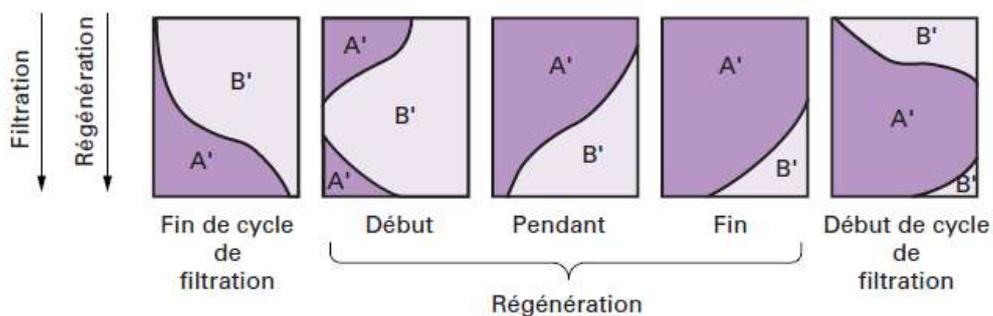
- Régénération à co-courant
- Régénération à contre-courant

111

### Régénération à co-courant:

Le flux de régénérant est dirigé au travers du lit dans le même sens que l'eau en cycle de production, c'est-à-dire de haut en bas.

Ce mode de régénération ne nécessite pas une technologie trop élaborée pour obtenir une bonne répartition du flux d'ions. Toutefois, les taux de régénération sont faibles car au fur et à mesure que le régénérant descend au travers du lit de résine, la solution s'appauvrit en ions régénérants et s'enrichit en ions qui étaient fixés sur la résine.



112

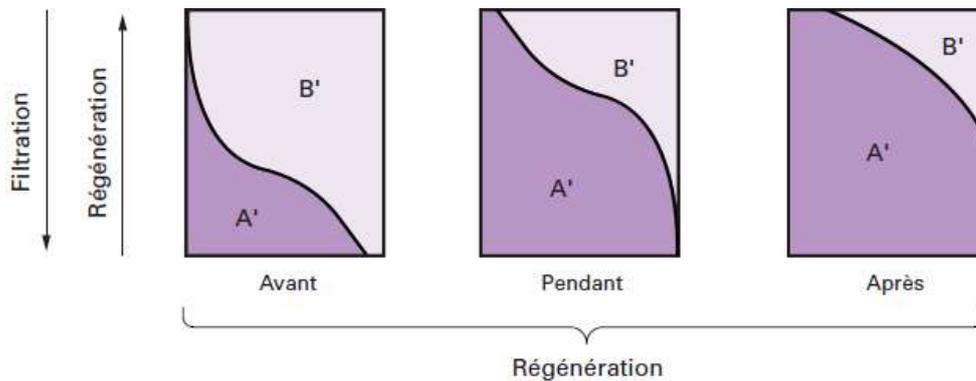
## Régénération à contre-courant:

Le flux de régénérant circule à contre-courant par rapport à l'eau traitée, c'est-à-dire de bas en haut.

Ce mode de régénération présente de nombreux avantages:

- La solution régénérante s'attaque en premier lieu aux couches basses de résine très peu saturées qui sont donc très facilement débarrassées des quelques ions qu'elles contenaient en fin de cycle.
- La solution régénérante ne s'appauvrit que très lentement en ions régénérants et ne s'enrichit que progressivement en ions à éliminer.

La régénération à contre-courant permet donc d'obtenir un meilleur taux de régénération et des couches basses bien régénérées réduisant la fuite ionique.

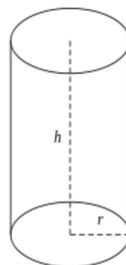


113

## Définitions

- **Volume de résine  $V_{rés}$  :**

$$V_{rés} = h.S$$



$V_{rés}$  exprimé en L

h : hauteur  $S = \pi r^2$   
r : rayon

- **Charge volumique  $C_v$  :**

$$C_v = \frac{Q_v}{V_{Rés}} \quad C_v \text{ exprimé en } L^{-1}$$

C'est le volume d'eau traitée en 1 heure pour 1 litre de résine.

On a intérêt à avoir la charge volumique la plus grande possible.

114

- **Durée de vie des résines :**

La durée de vie peut être diminuée par :

Destruction de la structure de base (polymère)

Empoisonnement de la résine (par 1 cation ou 1 anion qui ne peut pas être arraché lors de la régénération)

Rupture des billes de résine

- **Taux de régénération :  $\eta_r$  (%)**

$$\eta_r = \frac{C_{\text{rég}} * V_{\text{rég}}}{C_s * V_s} * 100$$

$C_{\text{rég}}$  = concentration de la solution de régénération (meq/L)  
 $V_{\text{rég}}$  = volume de la solution de régénération (L)  
 $C_s$  = concentration de l'eau traitée (meq/L)  
 $V_s$  = volume d'eau traitée (L)

Ce taux est supérieur à 100% car le régénérant a moins d'affinité pour la résine. Pour la régénération, on utilise une forte concentration  $C_{\text{rég}}$  (meq/L)

115

- **Capacité utile  $C_{\text{rés}}$  (meq/L) :**

C'est le nombre d'ions que peut échanger 1L (litre) de résine.

$$C_{\text{rés}} = \frac{C_s * V_s}{V_{\text{rés}}}$$

- **Fuite ionique:**

Si le débit de l'eau qui traverse la résine est trop important, il est possible que les échanges n'aient pas le temps de s'effectuer fuite ionique (l'eau traverse la résine sans échanger d'ions).

Remarque 1: la fuite ionique est d'autant plus importante qu'on est proche de la saturation de la résine.

Remarque 2 : pour vérifier la fuite ionique, on peut mesurer la conductivité ou le pH en sortie de résine.

116

- **Perçage et Claquage**

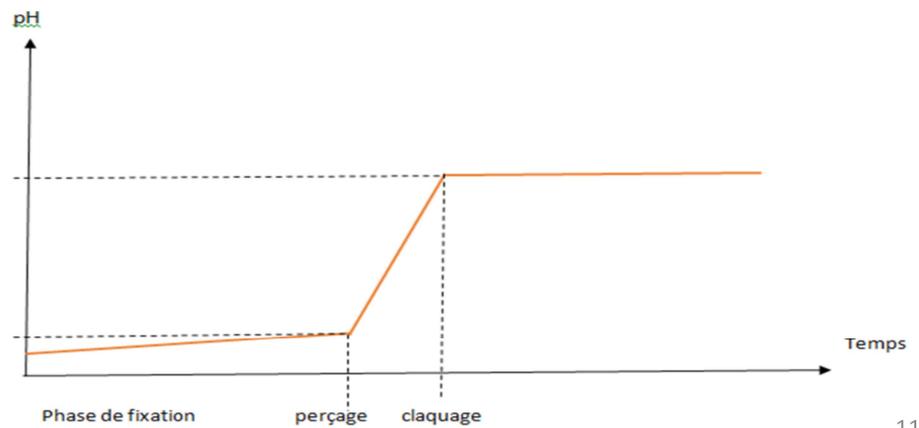
**Perçage** : l'eau traverse la résine en étant partiellement traitée.

**Claquage** : l'eau traverse la résine en n'étant pas traitée (résine saturée).

Exemple (vu en TP) : adoucissement par acide fort ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  remplacés par  $\text{H}^+$ ).



A partir du perçage,  
il faut régénérer la résine



117



118