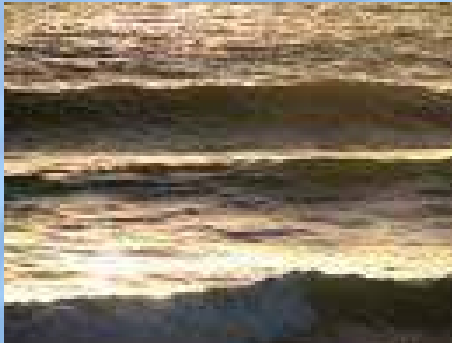
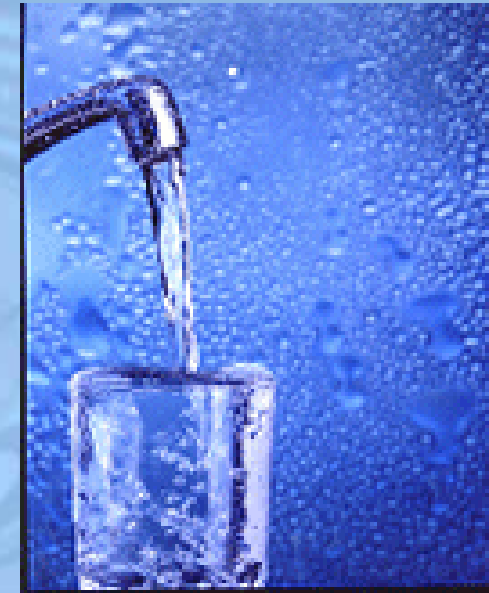


L'eau :



de la mer au verre



1. Généralités
2. Ressources naturelles et demande en eau :
les risques de pénurie
3. Composition naturelle de l'eau et pollution :
les risques pour la santé
4. Des solutions techniques :
 - Le dessalement : *pour accroître l'offre*
 - La potabilisation : *vers une meilleure qualité*
5. Les métiers

Patrice BACCHIN

Enseignant Chercheur

Procédés de Séparation et Membranes



Université Paul Sabatier

Laboratoire de génie Chimique

31 062 TOULOUSE Cedex 9

Tel : 05 61 55 81 63 Fax : 05 61 55 61 39

Email : bacchin@chimie.ups-tlse.fr

Web : <http://lgc.inp-toulouse.fr>



Généralités

- **Les organismes vivants sont composés d'eau :**
 - 60 à 70 % pour les êtres humains
 - 80 à 90 % pour les végétaux
- **Sans eau, l'homme ne peut survivre au delà de quelques jours. Beaucoup de maladies sont dues à une mauvaise qualité d'eau.**
- **Il en est de même pour les animaux et les plantes qui, en fonction de leur résistance particulière, réagissent différemment au manque d'eau.**

L'eau c'est la vie ...

...mais ça peut aussi être la mort.

Généralités

 Le Monde / dimanche 23 lundi 24 mars 1997

L'eau pourrait constituer le « choc pétrolier » du XXIème siècle

 Le Monde / vendredi 17 mars 2000

La planète est menacée par de graves pénuries d'eau au XXIème siècle

... Si les gouvernements n'améliorent pas l'exploitation des ressources actuelles pour alimenter une population mondiale qui va augmenter de 2 milliards en 25 ans, des catastrophes sont inévitables. Tel est le constat dressé par les experts du Forum qui s'ouvre vendredi 17 mars 2000 à La Haye ...

L'eau potable ...

... une source (!) de conflit.

Ressources naturelles et demande en eau : *risque de pénurie*

Bilan hydrique

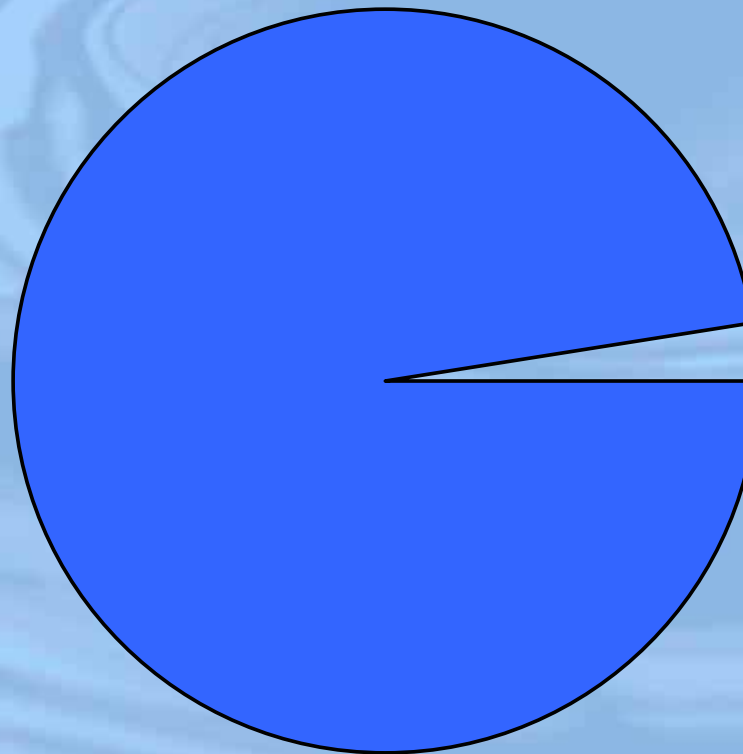
EAUX SALINES

EAUX DOUCES

OCEANS, MERS

$1350 \cdot 10^6 \text{ km}^3$

97,4 %



GLACIERS

$27,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$

2 %

EAUX SOUTERRAINES

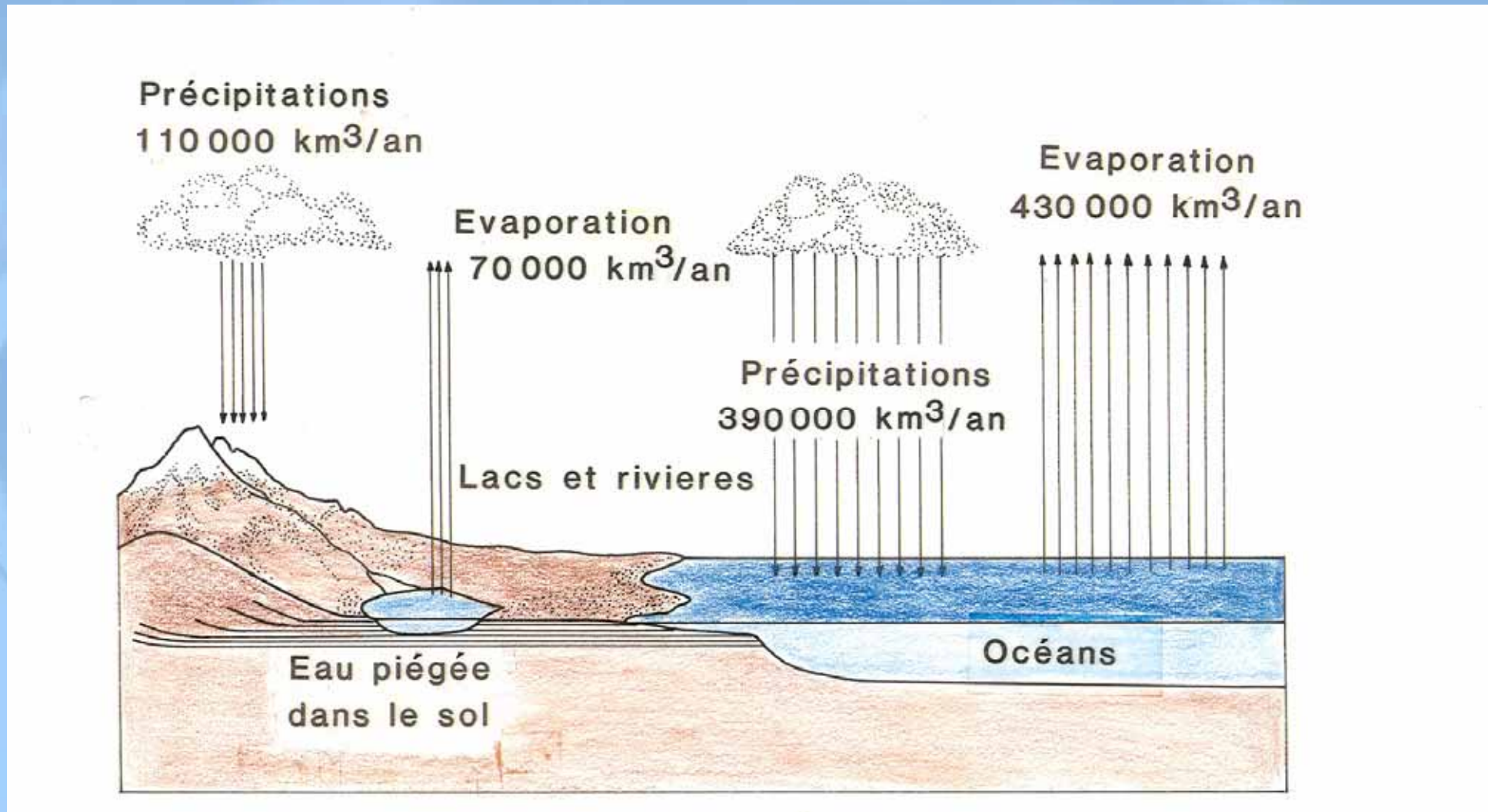
LACS, RIVIERES

$8,3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$

0,6 %

QUANTITE TOTALE DE STOCK D'EAU SUR LA PLANÈTE = $1400 \cdot 10^6 \text{ km}^3$

Bilan hydrique



Eau de ruissellement renouvelable:

$$110.000 - 70.000 = 430.000 - 390.000 = 40.000 \text{ km}^3/\text{an}$$

Disponibilité de l'eau

$$\begin{aligned} \text{Eaux renouvelables} &= Pr - Ev \quad (Pr = \text{précipitations} \quad Ev = \text{évaporation}) \\ &= 110.000 - 70.000 = 40.000 \text{ km}^3/\text{an} \end{aligned}$$

Disponibilité = m³ disponibles et renouvelables / (an. Habitants)

| | Population | m ³ /an/hab. | m ³ /jour/hab. |
|-------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1950 | 2,5.10 ⁹ | 16.000 | 44 |
| <u>2000</u> | <u>6,0</u> | <u>6.700</u> | <u>18</u> |
| 2025 | 8,0 ⁽¹⁾ | 5.000 | 14 |
| 2050 | 9,0 ⁽¹⁾ | 4.500 | 12 |

(1) estimations

Disponibilité de l'eau (2)

60 % des ressources en eau naturelle du monde (40.000 km³/an) dans neuf pays : Brésil, Russie, Chine, Canada, Indonésie, États-Unis, Inde, Colombie, Zaïre.

Des disponibilités hétérogènes (en m³/habitant/an) :

| | Brésil | États-Unis | France | Mexique | Chine | Maroc | Algérie |
|------|--------|------------|--------|---------|-------|-------|---------|
| 2000 | 40.000 | 10.000 | 3.000 | 2.600 | 1.860 | 860 | 420 |
| 2025 | 30.000 | 8.000 | 2.700 | 1.810 | 1.520 | 540 | 270 |

(Des inégalités peuvent exister au niveau d'un pays. En Algérie, par exemple, 75 % de ressources renouvelables sont concentrées sur 6 % du territoire).

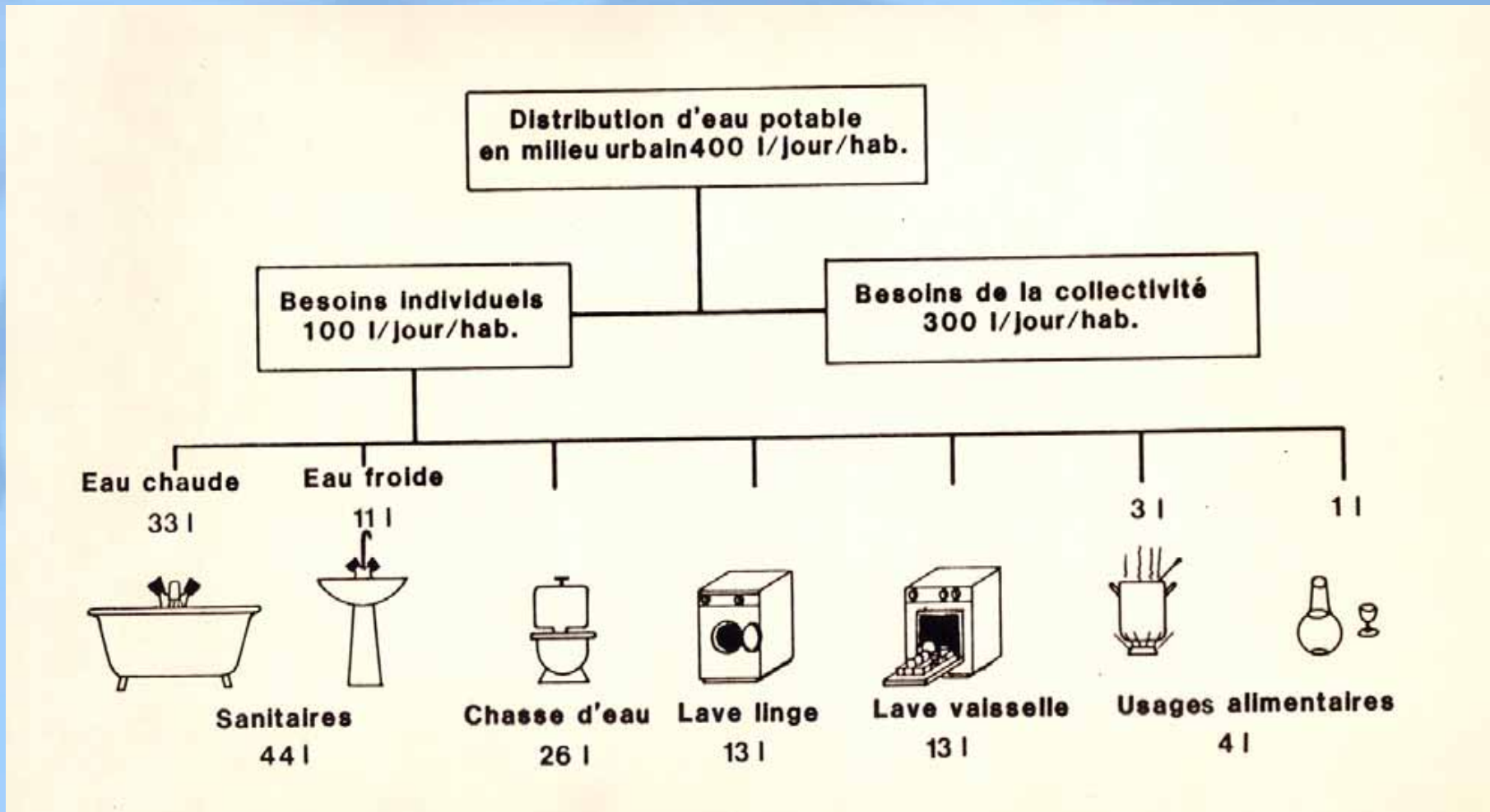
Demande en eau

- ***USAGES DOMESTIQUES***
 - *Besoins individuels*
 - *Besoins de la collectivité*
- ***USAGES INDUSTRIELS***
 - *Eau de refroidissement*
 - *Eau de process*
- ***USAGES AGRICOLES***

Demande en eau (2)

| | Total km ³ /a | % | | |
|---|-----------------------------|------------|-----------|-------------|
| | | Domestique | Industrie | Agriculture |
| MONDE | 3.462 | 8 | 22 | 70 |
| AFRIQUE DU NORD PROCHE ET MOYEN ORIENT | 172 | 7 | 4 | 89 |
| EUROPE | 260 | 17 | 47 | 36 |
| AMERIQUE DU NORD (USA =+ CANADA) | 510 | 12 | 49 | 39 |
| ASIE CENTRALE ET OCCIDENTALE | 310 | 6 | 10 | 84 |
| CHINE | 515 | 7 | 7 | 86 |
| JAPON | 140 | 18 | 29 | 53 |

Demande en eau (3)



Eau virtuelle

L'eau virtuelle associe à des biens de consommation ou intermédiaires la quantité d'eau nécessaire à leur fabrication.

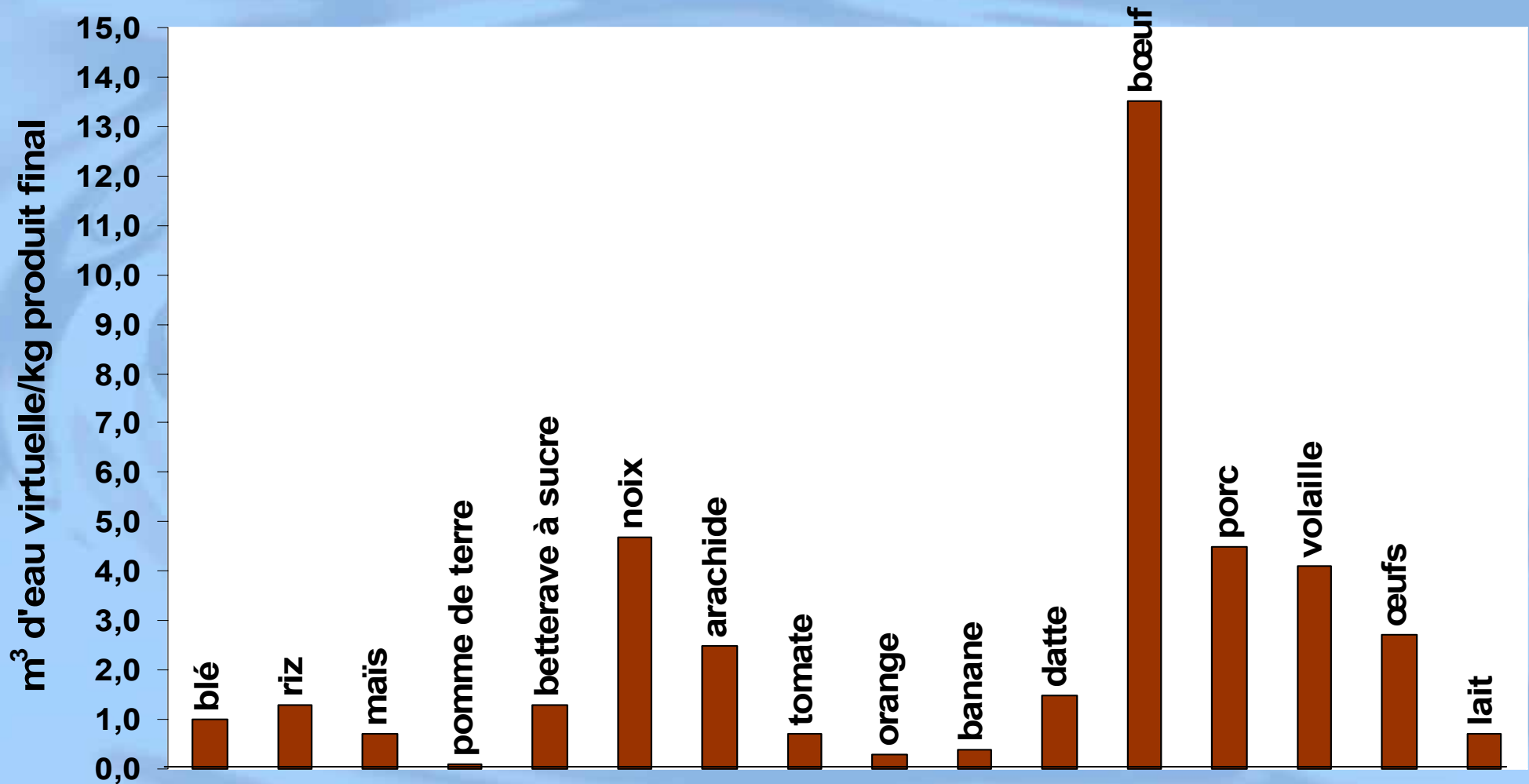
L'intérêt du concept d'eau virtuelle est de montrer l'importance en terme quantitatif de l'eau :

- | | |
|---------------------------------------|---|
| <i>-Besoins physiologiques</i> | <i>4 litres/jour/personne</i> |
| <i>-Besoins domestiques</i> | <i>40 à 400 litres/jour/personne</i> |
| <i>-Besoins alimentaires</i> | <i>2.000 et 4.000 litres/jour/personne</i> |

« Consommer un kilogramme de blé, c'est aussi, dans les faits, consommer le millier de litres d'eau qu'il a fallu pour faire pousser cette céréale. Manger un kilogramme de bœuf, c'est aussi consommer les 13 000 litres d'eau qui ont été nécessaires pour produire cette quantité de viande »

Daniel Zimmer, directeur du Conseil mondial de l'eau, Forum mondial de l'eau de 2003 à Kyōto

Eau virtuelle et agriculture



EAU VIRTUELLE DE QUELQUES PRODUITS ALIMENTAIRES

Eau virtuelle et industrie

Industrie

eau virtuelle en m³

| | |
|---|--------------|
| <i>Raffinage d'1 tonne de pétrole</i> | <i>10</i> |
| <i>Distillation d'1 tonne d'alcool</i> | <i>100</i> |
| <i>Fabrication d'1 tonne pâte à papier</i> | <i>250</i> |
| <i>Fabrication d'1 tonne d'acier</i> | <i>270</i> |
| <i>Fabrication d'1 tonne de fibres synthétiques</i> | <i>5.000</i> |

Risque de pénurie

SEUIL DE PAUVRETÉ OU DE TENSION

**Ressources par habitant $\leq 1000 \text{ m}^3/\text{an}$
(tous usages confondus)
Indice d'exploitation $> 50 \%$ (*)**

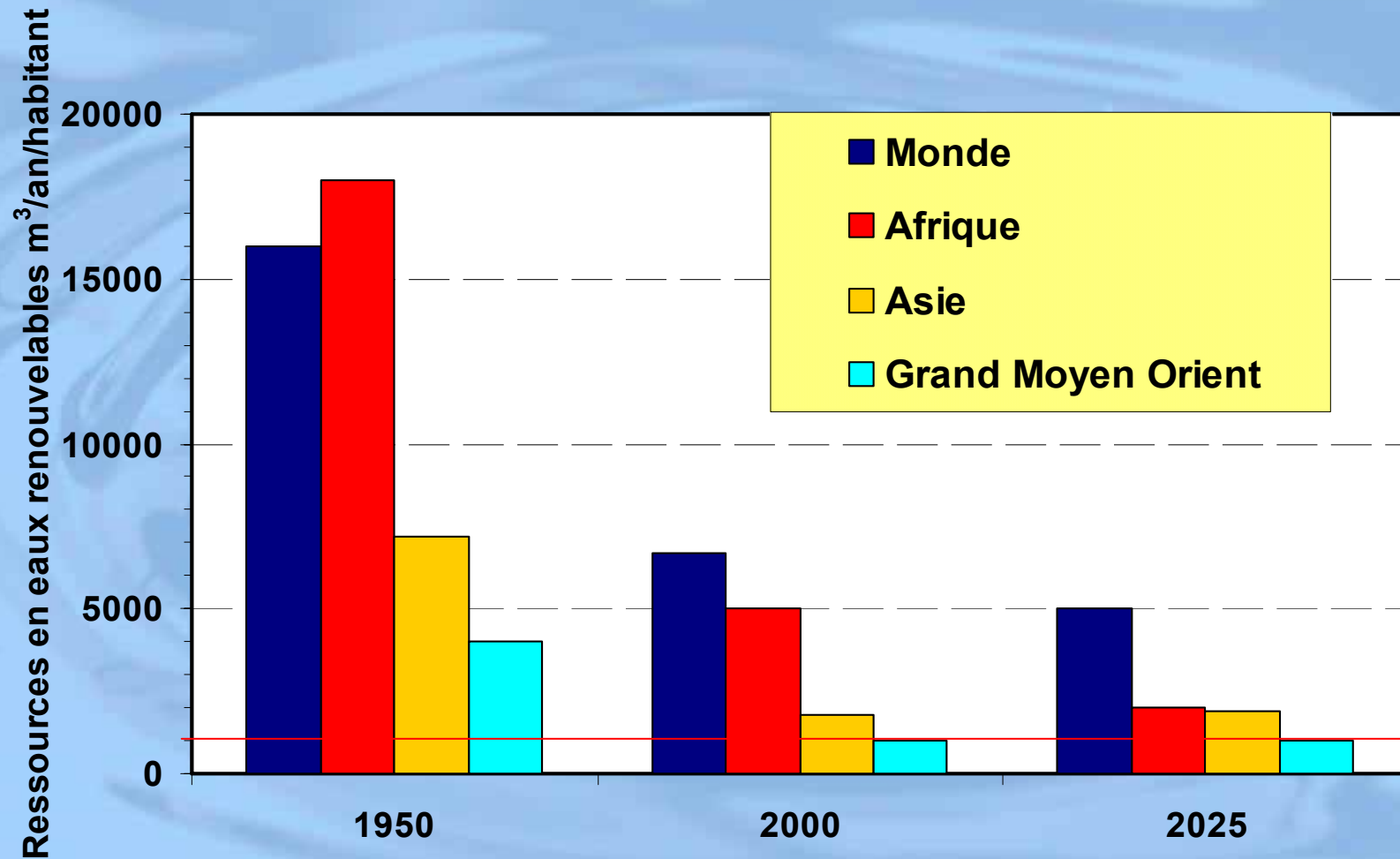
SEUIL DE PÉNURIE

**Ressources par habitant $\leq 500 \text{ m}^3/\text{an}$
Indice d'exploitation $\geq 100 \%$ (*)**

(*) *indice d'exploitation* = $\frac{\text{quantités d'eau prélevées}}{\text{ressources disponibles}}$

| | Brésil | États-Unis | France | Mexique | Chine | Maroc | Algérie |
|------|--------|------------|--------|---------|-------|-------|---------|
| 2000 | 40.000 | 10.000 | 3.000 | 2.600 | 1.860 | 860 | 420 |
| 2025 | 30.000 | 8.000 | 2.700 | 1.810 | 1.520 | 540 | 270 |

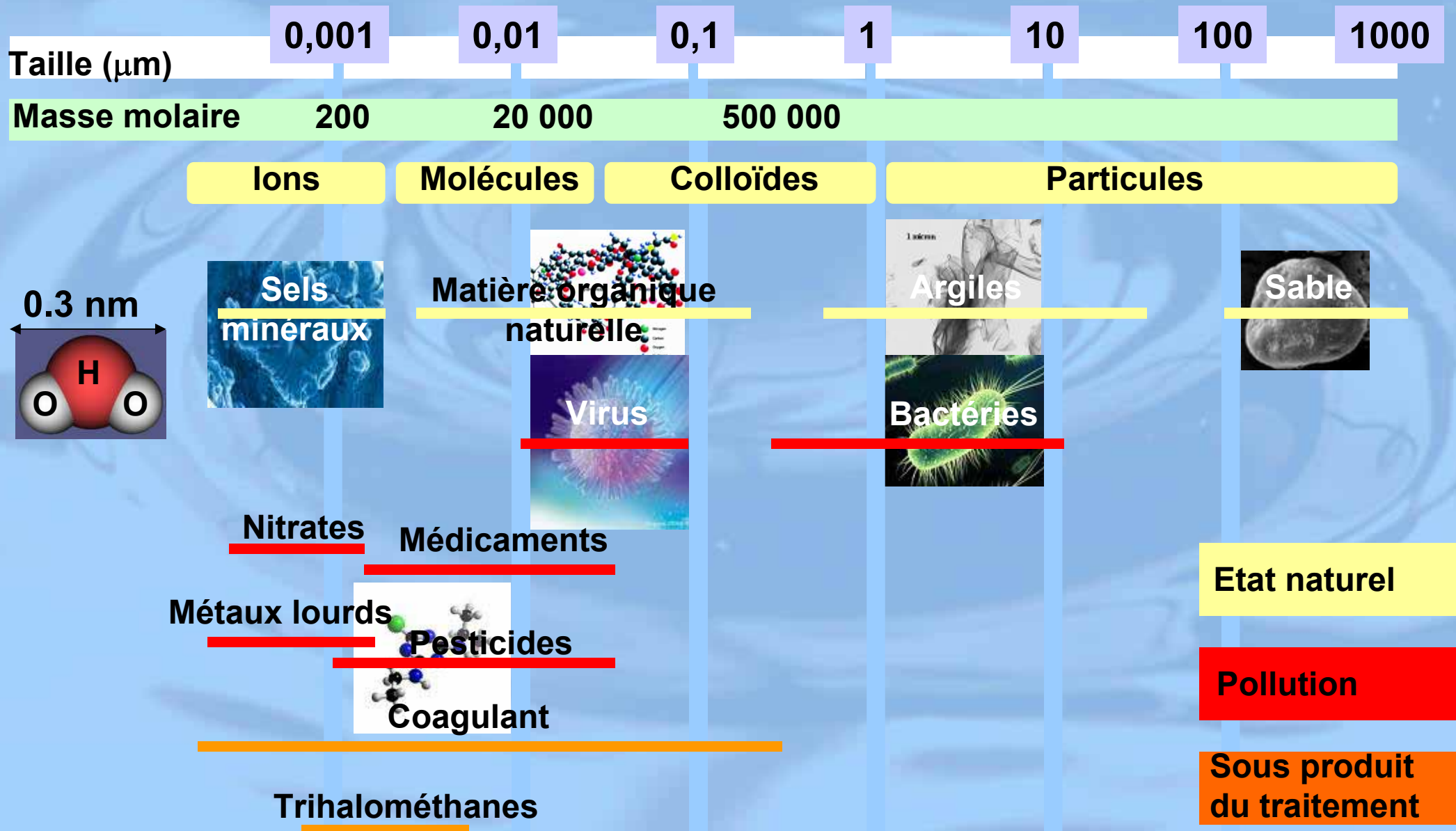
Risque de pénurie (2)



Des régions entières vont atteindre le seuil de tension

Composition naturelle de l'eau et pollution : *risque pour la santé*

Composition de l'eau



Problème de qualité

1 –DU A DES PROBLÈMES DE POLLUTION

- *Rejets d'eaux usées domestiques ou industrielles non traitées :*
 - Microorganismes (bactéries, virus)*
 - Métaux lourds (traitements de surface)*
 - Médicaments (antibiotiques, oestrogènes, ...)*
- *Pollution des sols par l'agriculture ou l'industrie*
 - Nitrates*
 - Métaux lourds*
 - Pesticides (atrazine)*

**Diminution des
ressources
disponibles**

2 –DU A DES PHÉNOMÈNES NATURELS

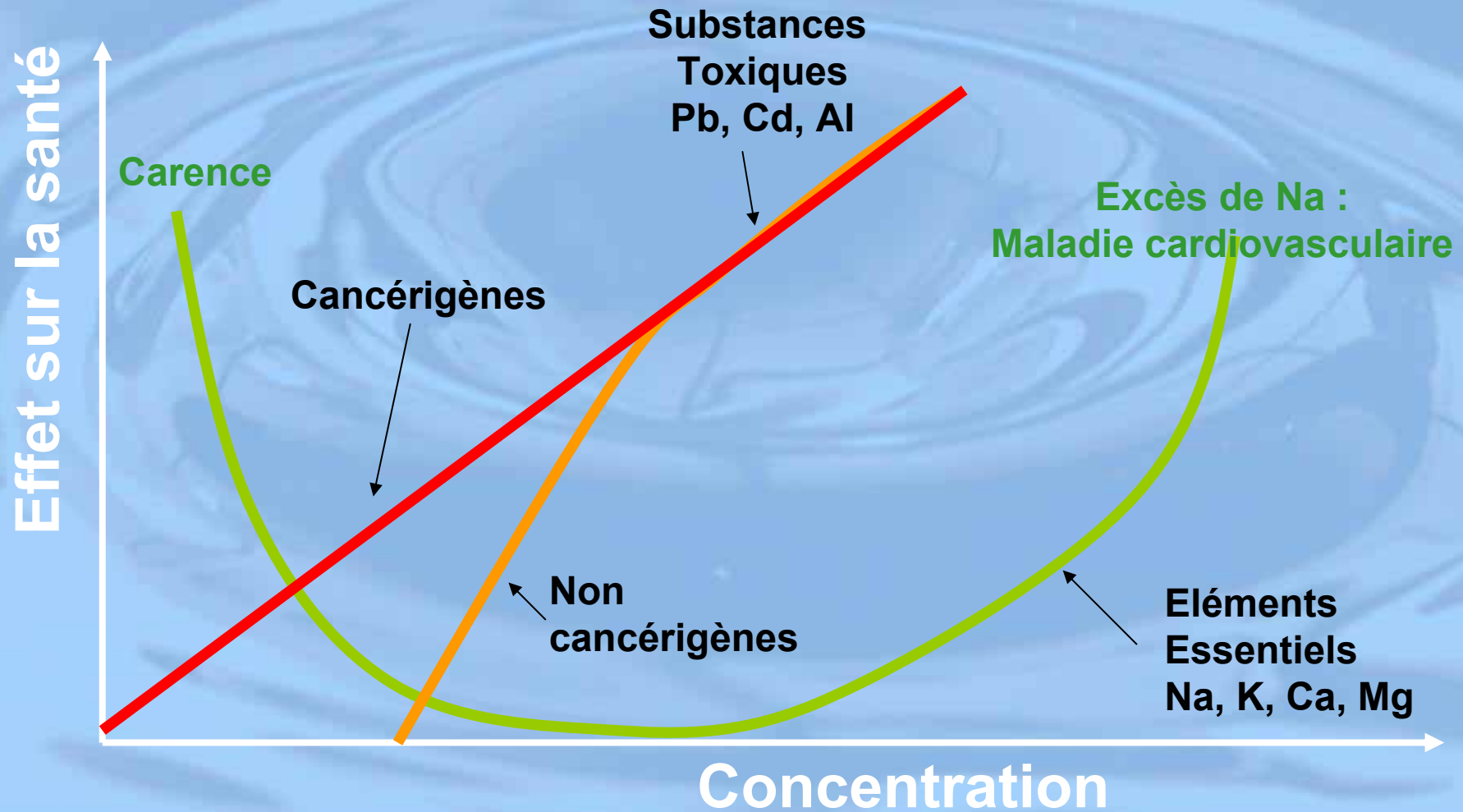
- Nitrates au Maroc*
- Fluor dans le sud algérien*
- Arsenic au Bangladesh*

**Risques pour
La santé**

3- DU A DES SOUS PRODUIT DE TRAITEMENT

- Trihalométhane résultant de l'action du chlore sur la MON*
- Coagulant introduit pour accroître la taille des espèces*

Effet sur la santé



Normes eau de boisson

A/ Paramètres organoleptiques

couleur, turbidité, odeur, saveur

B/ Paramètres physiologiques

température, pH, conductivité, chlorures, résidu sec

C/ Substances indésirables

nitrites, nitrates, .. COT, .. Fer, Mn, Cu

D/ Substances toxiques

arsenic, cadmium, chrome, mercure, plomb

200 µg/l pour le chloroforme

60 µg/l pour le dichlorobromométhane

100 µg/l pour le chlorodibromométhane

100 µg/l pour le bromoforme

E/ Paramètres micro biologiques

coliformes totaux, streptocoques fécaux

F/ Pesticides

total (55), par substance

Stratégies générales

Accroître l'offre

Construire des barrages, des unités de dessalement, développer la réutilisation ...

Maîtriser la demande

Réduire la consommation de l'agriculture (70 % de l'usage) par l'amélioration des techniques d'irrigation

Augmenter la qualité

Limiter la pollution

Mettre au point des techniques de traitement plus fiables

Mettre au point des techniques d'analyses des polluants

The background of the slide is a close-up photograph of water ripples, showing concentric circles and fine lines of light and shadow on the water's surface. The overall color palette is a range of blues, from light to dark.

Une solution à la pénurie
Le dessalement

Pourquoi ?

- *Aujourd'hui, 1,4 milliards d'habitants vivent sans eau potable*
- *Mers et océans recouvrent 70 % de notre planète ;*
- *80 % de la population vit à moins de 100 km d'une côte*
- *Le dessalement de l'eau de mer peut contribuer à l'alimentation en eau de certaines régions en pénurie.*

Stratégie : Accroître l'offre

Les eaux salines

CONCENTRATION EN SELS DE DIFFERENTES EAUX SALINES

| TYPE D'EAU | TENEUR EN SEL |
|--------------------|------------------------------|
| EAU DOUCE | Moins de 500 ppm |
| EAU SAUMATRE | 500 à 35 000 ppm |
| - FAIBLE SALINITE | 500 à 5 000 ppm |
| - SALINITE MOYENNE | 5 000 à 15 000 ppm |
| - SALINITE ELEVEE | 15 000 à 35 000 ppm |
| EAU DE MER | Approximativement 35 000 ppm |
| SAUMURE | Plus de 35 000 ppm |

EAUX SAUMATRES ET EAU DE MER

| MERS OU OCEANS | SALINITES |
|------------------|------------|
| MER BALTIQUE | 7 000 ppm |
| MER CASPIENNE | 13500 ppm |
| MER NOIRE | 20 000 ppm |
| MER ADRIATIQUE | 25 000 ppm |
| OCEAN PACIFIQUE | 33 600 ppm |
| OCEAN INDIEN | 33 800 ppm |
| OCEAN ATLANTIQUE | 36 000 ppm |
| MER MEDITERRANEE | 39 000 ppm |
| GOLFE ARABIQUE | 43 000 ppm |
| MER ROUGE | 43 000 ppm |

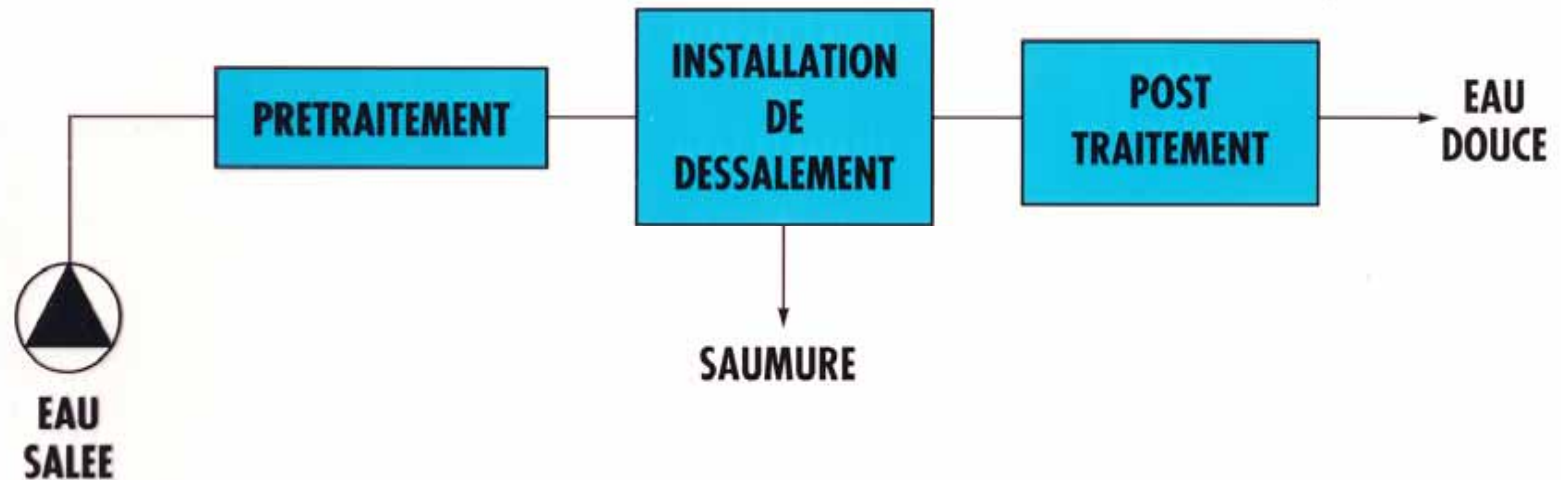
SALINITES DES DIFFERENTES MERS

L'eau de mer

| | | Eau de mer standard (*) | | Méditerranée Toulon | | Golfe Persique Koweït | |
|---|------------------------|-------------------------|-------------|---------------------|-------------|-----------------------|-------------|
| | | ppm | % | ppm | % | ppm | % |
| | Salinité totale | 35 000 | | 39 000 | | 45 000 | |
| cations | Sodium | 10 760 | 30,7 | 11 835 | 30,3 | 13 830 | 30,7 |
| | Magnesium | 1 294 | 3,7 | 1 410 | 3,6 | 1 660 | 3,7 |
| | Calcium | 412 | 1,2 | 450 | 1,2 | 530 | 1,2 |
| | Potassium | 387 | 1,1 | 440 | 1,1 | 497 | 1,1 |
| | Total cations | 12 853 | | 14 135 | | 16 517 | |
| anions | Chlorures | 19 353 | 55,3 | 21 500 | 55,1 | 24 900 | 55,3 |
| | Sulfates | 2 712 | 7,7 | 2 700 | 6,9 | 3 500 | 7,7 |
| | Bicarbonates | 142 | 0,4 | 153 | 0,4 | 182 | 0,4 |
| | Bromures | 67 | 0,2 | 75 | 0,2 | 86 | 0,2 |
| | Total anions | 22 274 | | 24 353 | | 28 668 | |
| (*) Culkin, F., <i>Chemical Oceanography</i> , Academic Press, London, 1965 | | | | | | | |

Le dessalement

SCHEMA GENERAL D'UNE INSTALLATION DE DESSALEMENT



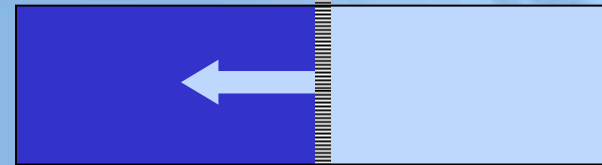
$$\text{TAUX DE CONVERSION} = \frac{\text{EAU DOUCE PRODUITE}}{\text{EAU SALINE POMPEE}}$$

Installation de dessalement :
distillation, osmose inverse, électrodialyse ...

Osmose et osmose inverse

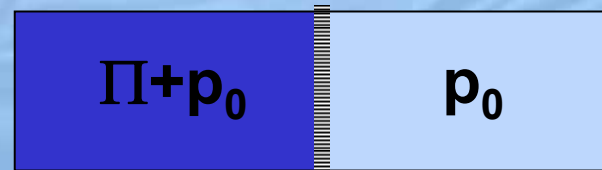
**Membrane semi perméable
perméable au solvant
imperméable au soluté**

Transfert du solvant
des zones **diluées**
vers les zones **concentrées**



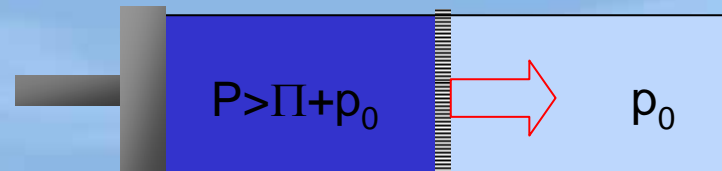
Osmose

équilibre lorsque la différence de pression
compense la pression osmotique du
compartiment concentré



Equilibre

Si une pression $> \Pi + p_0$
est appliquée



**Osmose
inverse**

**Le solvant (l'eau) est extrait
du compartiment concentré**

Pression osmotique

La pression osmotique, Π en Pa

$$\Pi = cRT$$

c nombre de moles dissociées
dans la solution

R constante des gaz parfait

T température en Kelvins

Loi de van 't Hoff 1886 (prix Nobel de chimie en 1901)

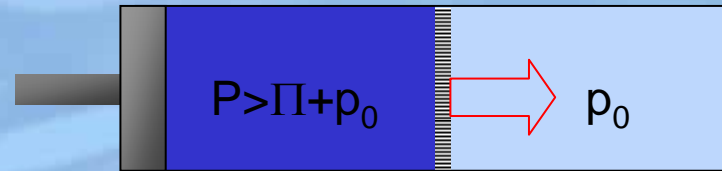
Exemple : solution de NaCl à 30 g/l \approx eau de mer

$$c_{NaCl} = \frac{30}{58.5} = 0,51 \text{ mol/L} = c_{Na^+} = c_{Cl^-}$$

$$\Pi = 2 \cdot 0,51 \cdot 10^3 \cdot 8,32 \cdot 298 = 2543000 \text{ Pa}$$

$$= 25,4 \text{ bar} = 25,1 \text{ Atm}$$

Flux de filtration



Le débit de filtration, Q , qui traverse la membrane en m^3 par secondes s'écrit :

$$Q = S * A * (P - p_0 - \Pi)$$

S : surface de la membrane en m^2

A : constante de perméabilité

$$A = 3 \cdot 10^{-12} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{Pa})$$

Calculer la surface de membrane à installer pour dessaler $3\,000 \text{ m}^3$ d'eau par jours pour une pression appliquée de 50 atm

Données : eau NaCl 30 g/l
 $p_0 = 1 \text{ atm}$

$$S = 4\,780 \text{ m}^2$$

[Tableau Excel](#)

Les plus et les moins

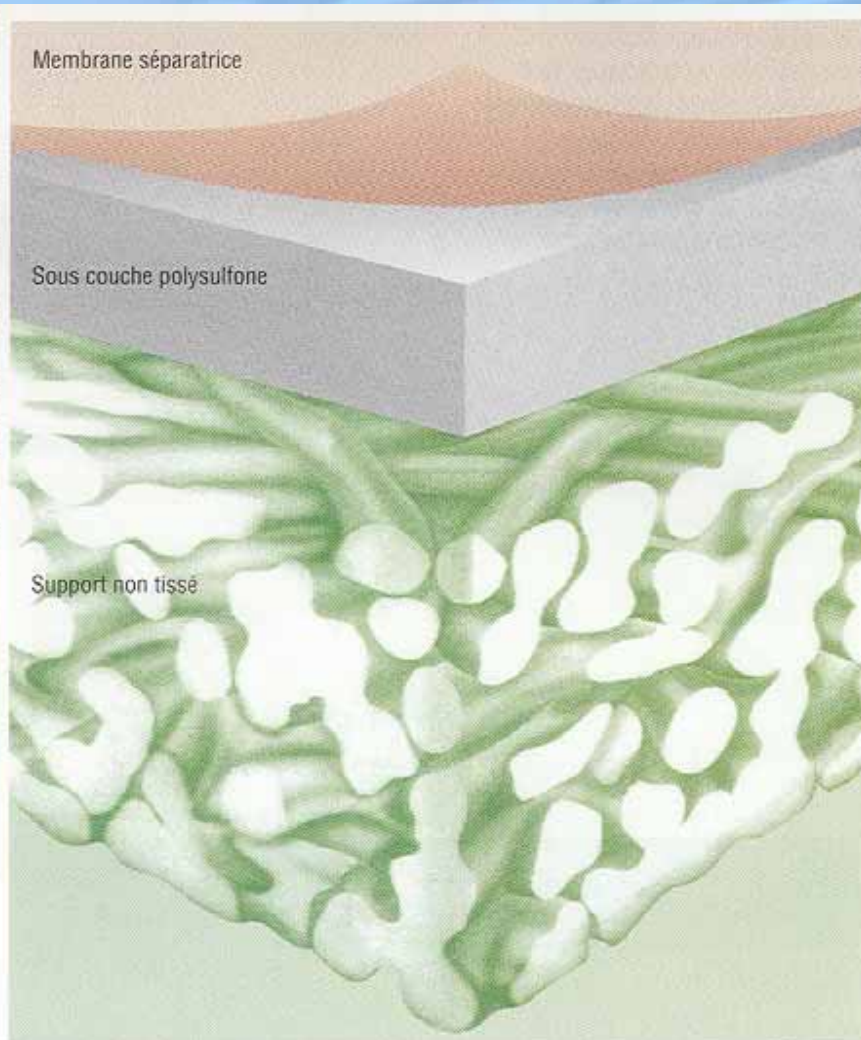


- Permet d'obtenir une eau « pure »
- Procédé facile à utiliser et à contrôler
- Procédé modulaire



- Procédé ayant un coût d'investissement élevé et des coûts de fonctionnement important (énergie de compression)
- Limitation due au colmatage (précipitation, biofouling ...)

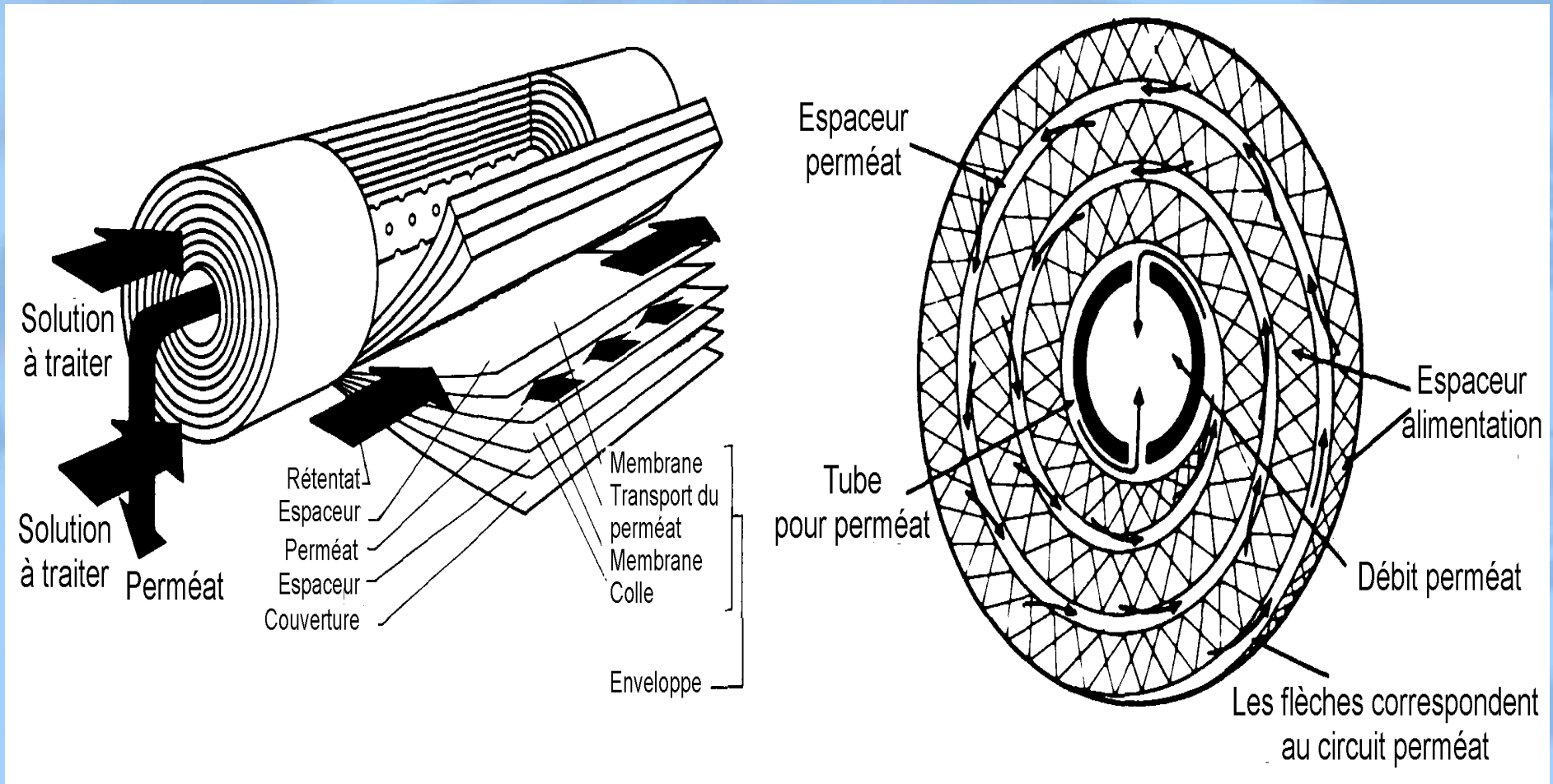
Application industrielle



- ← membrane polyamide 0,2 μm
- ← sous-couche polysulfone 40,0 μm
- ← support non tissé polyester 120,0 μm

**STRUCTURE D'UNE MEMBRANE
ORGANIQUE COMPOSITE TYPE DOW-
FILMTEC**

Application industrielle (2)

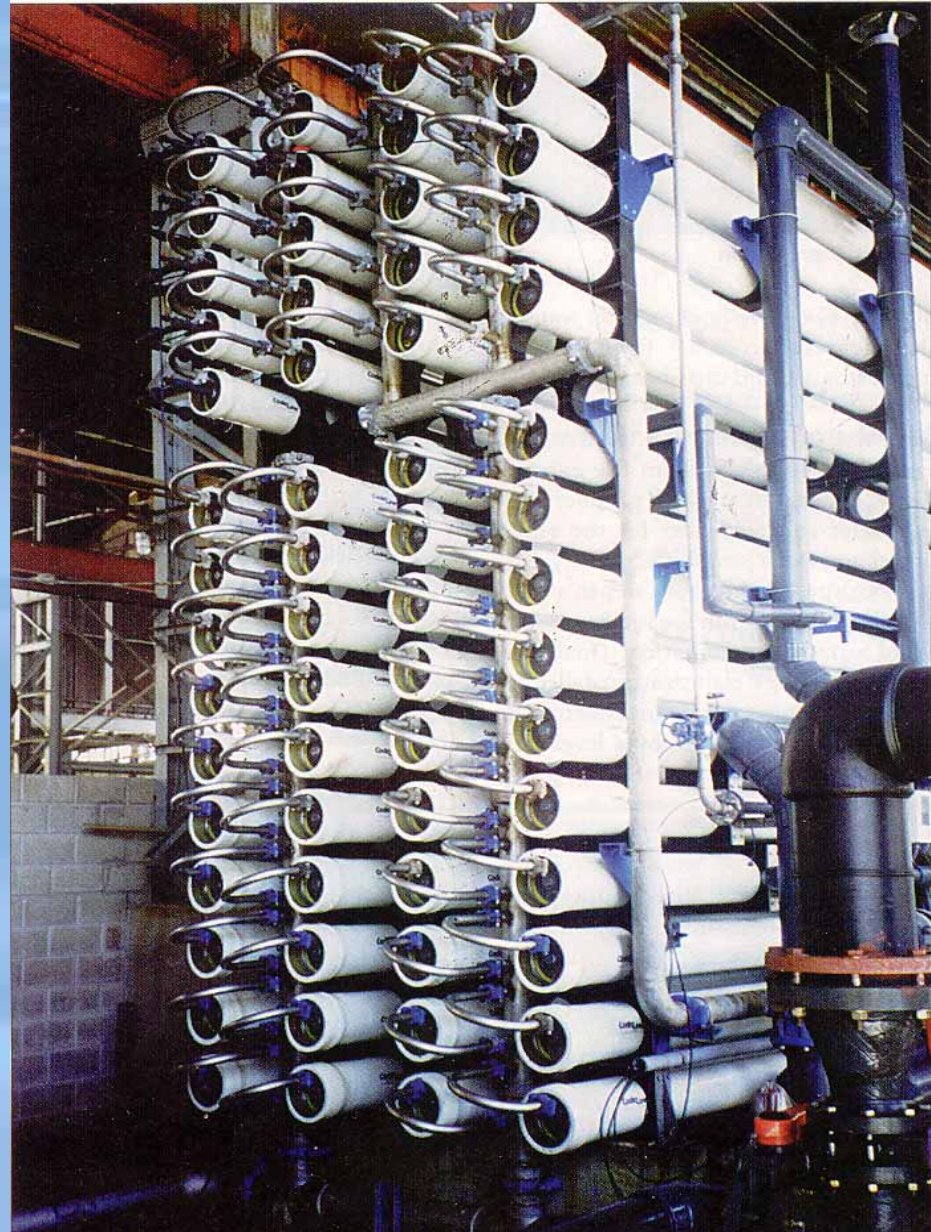


MODULE SPIRALE

Application industrielle (3)

- Capacité : 3.000 m³/jour
- Contrat BOOT : IONICS
- Mise en service : 1997
- Membranes : DOW FILMTEC
- Nombre de « pass » : 2
- Salinité eau produite : 20 mg/l

*MODULES D'OSMOSE INVERSE
DE L'USINE DE DESSALEMENT
DE CURAÇAO
(Antilles Néerlandaises)*

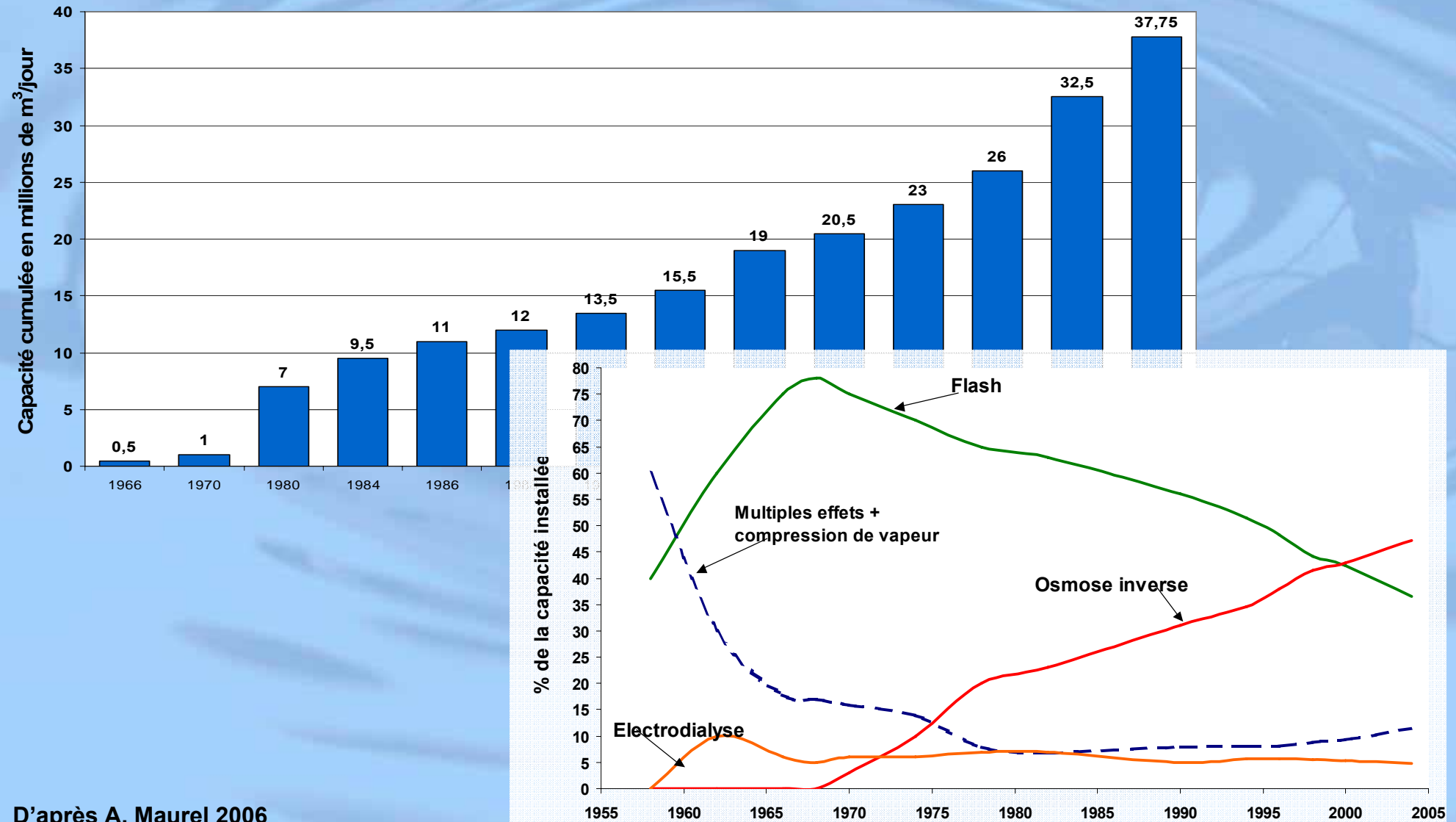


Capacité mondiale

37,75 millions de m³/jour au 1.1.2004

58 % eau de mer – 42 % eau saumâtre

Nombre d'usines (>100 m³/j) de dessalement : 17.348



Une solution pour une
meilleure qualité
*La filtration
membranaire*

Pourquoi ?

Tableau n° 2 : Abattements (log) de différentes étapes de traitement vis-à-vis de *Cryptosporidium* (AFSSA, 2002).

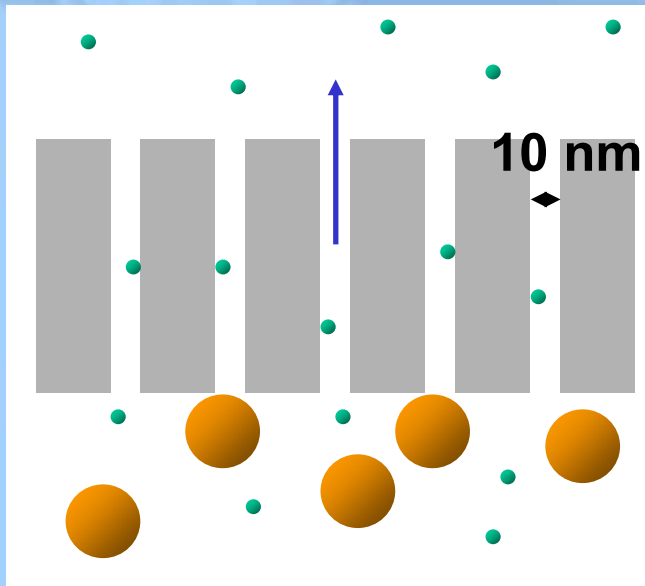
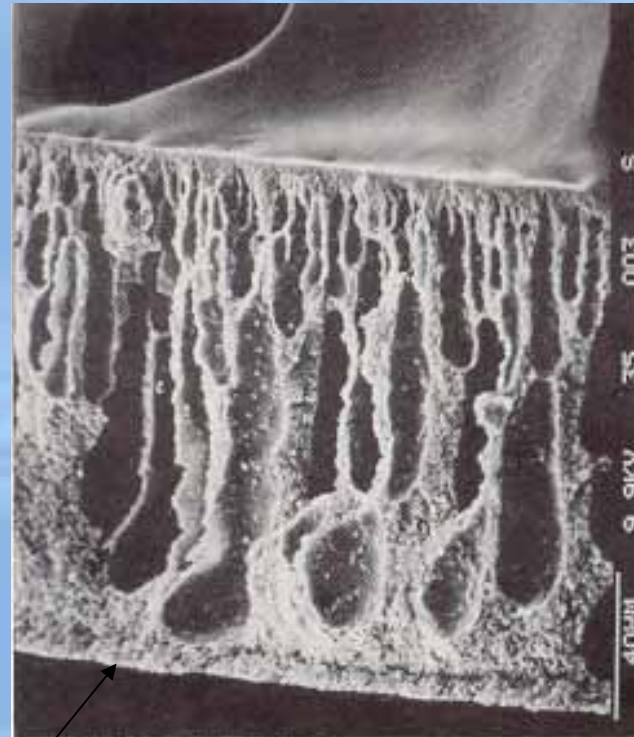
| Etape de traitement | Niveau de turbidité NTU | Elimination (réduction logarithmique décimale) de <i>Cryptosporidium et Giardia</i> |
|--|-------------------------|---|
| Sédimentation simple | < 1 | < 0,5 |
| Filtration simple | < 0,5 | 0,5 à 1 |
| Coagulation/floculation /décantation | < 2 | 0,5 |
| Décantation lamellaire | < 1,5 | 0,5 à 1 |
| Coagulation sur filtre | < 0,5 | 2 |
| Décantation/lit de boue pulsée | < 1 | 1,5 à 2 |
| Décantation/floc lesté | < 1 | 1,5 à 2 |
| Flottation | < 0,5 | 2 à 3 |
| Coagulation/floculation/ séparation/filtration | < 0,1 | 3 à 4 |
| Filtration lente biologique | < 0,1 | 4 |
| Filtration terre de diatomée | < 0,1 | 4 à 5 |
| Floculation/décantation/ filtration lente | < 0,1 | 4 à 5 |
| Microfiltration 0,5µm | < 0,1 | > 5 |
| Ultrafiltration | < 0,1 | > 5 |

Ultrafiltration : principe

Fibre creuse

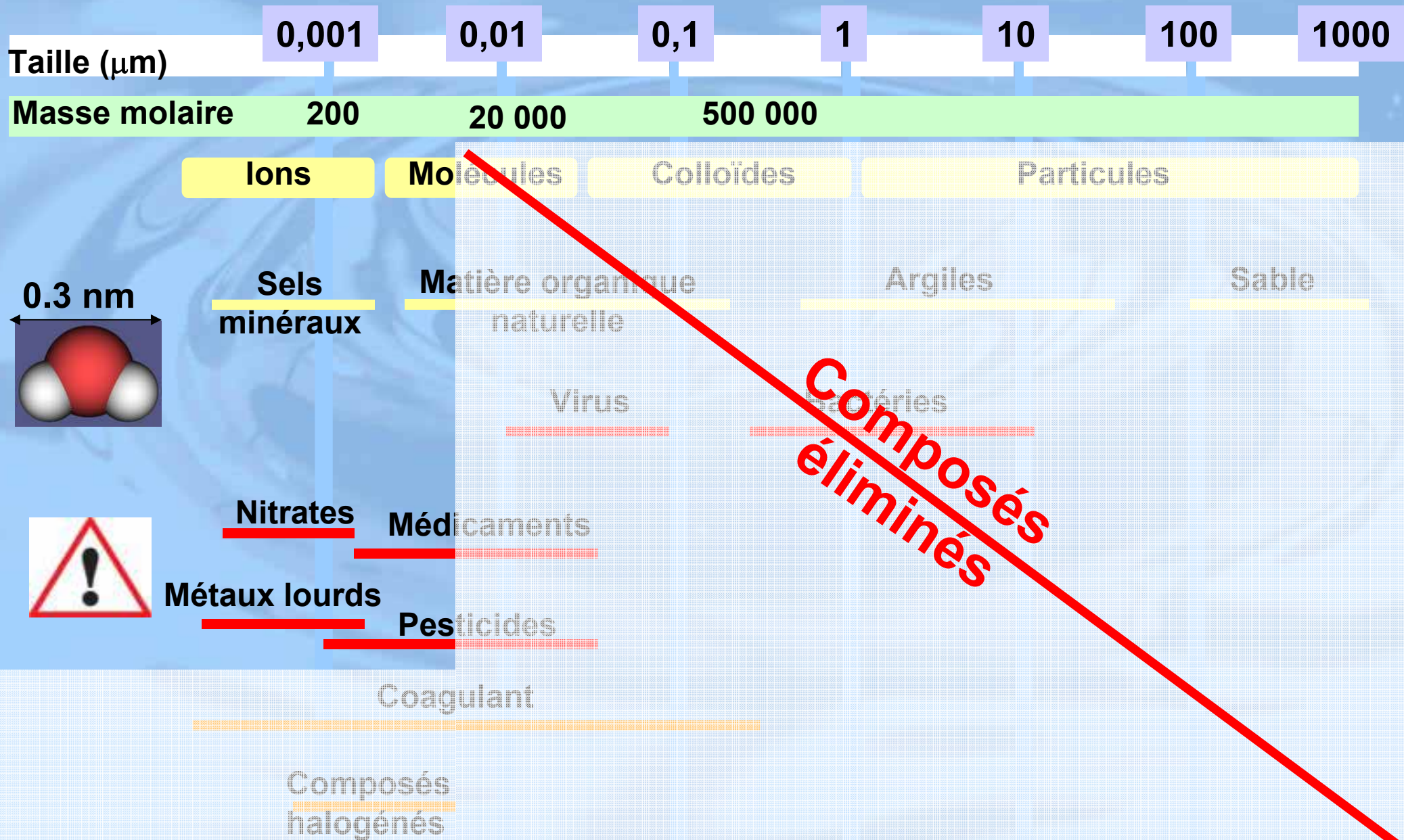


Paroi



Peau sélective

Ultrafiltration : efficacité



Les plus et les moins

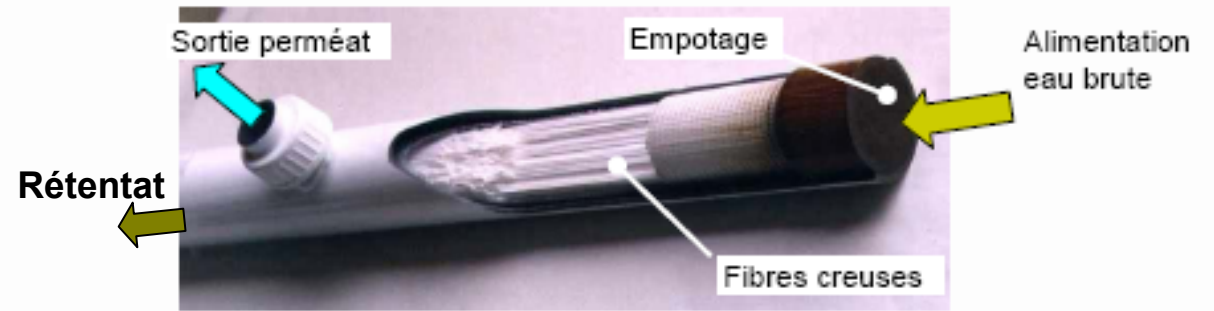


- Laisse passer les sels minéraux nécessaires à l'alimentation humaine
- Enlève les virus et les bactéries
- Évite le recours à des doses importantes de chlore
- Ne nécessite pas de coagulant



- Passage possible de petites molécules (pesticide ...) : couplage nécessaire avec charbon actif
- Procédé avec coût d'investissement élevé

Démo



Application industrielle



*Station d'eau potable (24 000 m³/jour) de ROUEN avec 4*24 modules de 125 m² de surface. Mise en service 2000.
(photo Aquasource www.aquasource-membrane.fr)*

Conclusion

L'eau est un enjeu planétaire.

Il faut trouver des solutions :

- **pour accroître l'offre**
- **pour maîtriser la demande**
- **pour développer la réutilisation**
- **pour traiter les pollutions**

en abordant le problème sous différents angles :



Des métiers

Secteur de l'eau et de l'environnement :

- Analyse **chimique** / développement de nouvelles méthodes d'analyses
- Connaître l'impact de pollution sur la **santé** : étude **toxicologique**
- Développer **procédés physico-chimiques propres** : réduire pollution et consommation d'eau
- Développer **procédés physiques** pour le traitement d'eau à partir de nouveaux **matériaux**
- ...

Besoin d'étudiants scientifiques
pluridisciplinaires

La morale de l'histoire

Rien ne marche parfaitement :
tout est affaire de **compromis**

Rien ne marche facilement :
tout est affaire de **travail**

Rien ne marche simplement :
tout est affaire d'**innovation**

Dans la vraie vie,
il n'y a pas une solution (comme en TD !)
mais il faut trouver la meilleure solution
en excellent pour faire avancer le projet

Références

- Degrémont Suez, Mémento technique de l'eau, Tec & Doc Lavoisier, 9^{ème} éd., 2006
- Deléage J., Dictionnaire de l'Écologie – Encyclopædia Universalis, Albin Michel - 1999
- Maurel A., Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : Et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, Tec & Doc Lavoisier, 2006
- Mayet J., La Pratique de l'Eau, seconde édition, Editions Le Moniteur, 1994
- Vettorazzi, G.; Burin, G. Chemicals in food: the use of safety evaluations, specifications Conference FAO/OMS Rome (Italy), 18-27 March 1991

Documents à télécharger :

Diaporama de la présentation :

<http://www.ppc.ups-tlse.fr/eau.pdf> (1,2 Mo)

Feuille de calcul Excel pour l'osmose inverse :

<http://www.ppc.ups-tlse.fr/oi.xls> (19 ko)