

Les cahiers d'igepac

*Nanofiltration
&
Osmose inverse*

pour les presque nuls

CI-2010-03

<http://www.igepac.com>

Nanofiltration

&

Osmose inverse

L'eau est nécessaire à la vie	3
1. Les filtrations usuelles (ordre de grandeur).....	4
2. L'infiniment petit, le monde des molécules	5
2.1. La molécule d'eau.....	5
2.2. Quel est le volume occupé par une molécule d'eau ?	5
2.2. Le nanogramme.....	6
2.3. Combien y-a-t-il de molécules d'eau dans un nanogramme d'eau ?.....	6
3. L'osmose.....	7
4. L'osmose inverse.....	8
5. Dans le domaine de purification de l'eau du robinet.....	9
6. Les membranes.....	10
7. La nanofiltration de l'usine de Mery sur Oise	12
8. Toxicité officielle d'une substance.....	14

L'eau est nécessaire à la vie

L'eau est un très bon solvant car l'eau dissout de nombreuses substances et permet ainsi un apport de substances variées indispensables à la vie mais parfois indésirables : bactéries, virus, et depuis une cinquantaine d'années d'innombrables produits chimiques divers. Ces produits de synthèse ingurgités à faibles doses, ont un effet néfaste à long terme ; « tout ça n'est pas grave - nous dit-on en France - c'est pire ailleurs ».

L'eau érode les terrains et se charge en sels minéraux indispensables dans l'eau que l'on boit. Un apport de sels minéraux doit être équilibré, un excès n'est pas toujours bien toléré par notre organisme. L'eau étant un très bon solvant, une eau parfaitement pure dissoudrait et éliminerait des substances vitales via les urines par exemple. C'est pourquoi, dans un traitement de l'eau du robinet, une eau filtrée par osmose inverse doit être mélangée à une eau non traitée par ce procédé sinon un ajout de sels est nécessaire.

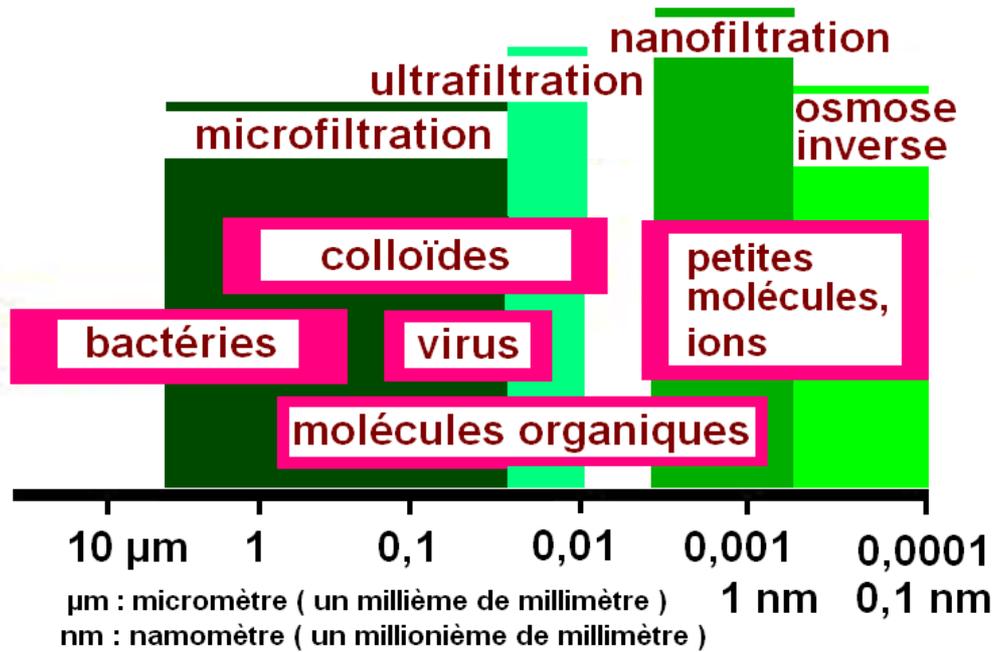
L'eau lessive les sols, captant les substances solubles à son passage : par exemple, les nitrates, les pesticides et des milliers de produits chimiques de synthèse. C'est ainsi que les boues des stations d'épuration épandues sur les terres agricoles sont un véritable vecteur de pollution, de contamination de notre Environnement.

Il devient nécessaire d'extraire ces polluants des eaux servant à notre alimentation, eaux de sources ou de rivières. Nous commençons seulement à prendre conscience que les polluants concentrés dans les eaux usées des grosses stations d'épuration devraient être également éliminés.

Il faut donc filtrer l'eau et lorsque l'on parle de filtration « très fine » les mots de nanofiltration et d'osmose inverse reviennent fréquemment dans une installation de filtration d'eau chez le particulier ou à plus grande échelle dans des usines de traitement de l'eau du robinet ou des eaux usées.

1. Les filtrations usuelles

(ordre de grandeur)

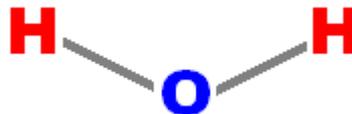


La nanofiltration et l'osmose inverse nous amène à découvrir le monde de l'infiniment petit.

2. L'infiniment petit, le monde des molécules

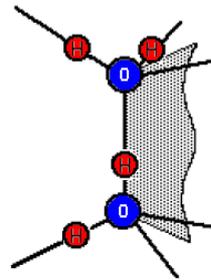
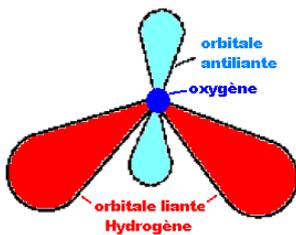
2.1. La molécule d'eau

La molécule d'eau est constituée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène.



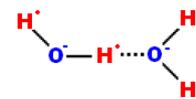
La molécule d'eau

Longueur de la liaison O-H : 0,1 nm
charge de l'électron déplacée de $\approx 0,035$ nm
Angle entre les liaisons O-H : $104,5^\circ$
(tétraèdre : $109,5^\circ$)



L'eau comme tétraèdre et ses liaisons
La distance entre deux O est de 0,280 nm
En gros on a :

- la liaison covalente O-H mesure 0,1 nm
- la liaison H mesure 0,2 nm



Ces propriétés de la liaison H peuvent s'explorer en phase gazeuse où les molécules de vapeur d'eau ont tendance à former des dimères

Dans 18 grammes d'eau, il y a environ 6×10^{23} molécules d'eau, c'est-à-dire « 6 fois 1, suivi de 23 zéros » :

600 000 000 000 000 000 000 000

2.2. Quel est le volume occupé par une molécule d'eau ?

Il y a $6 \times 10^{23} \div 18 \approx 33 \times 10^{21}$ molécules dans 1 gramme soit environ 33×10^{21} molécules dans 1 cm^3 .

Il y a 33 molécules dans 1 nm^3 , une molécule d'eau occupe **un volume de $0,033 \text{ nm}^3$ soit un cube de $0,32 \text{ nm}$**

(nm : nanomètre – dans un mètre il y a 1000 000 000 nm)

2.3. Le nanogramme

Le milligramme (mg - le millième du gramme)

Le microgramme (μg - le millième du mg - le millionième du g)

Le nanogramme (ng - le millième du μg - le millionième du mg - le **milliardième** du gramme)

Dans un kilogramme d'eau (\approx un litre), il y a 1000 milliards de nanogrammes d'eau.

2.4. Combien y-a-t-il de molécules d'eau dans un nanogramme d'eau ?

Il y a $6 \times 10^{23} \div 18 \approx 33 \times 10^{21}$ molécules dans 1 gramme

donc $33 \times 10^{21-9} \approx 33 \times 10^{12}$ dans 1 nanogramme d'eau.

Il y a 33 000 milliards de molécules d'eau dans un nanogramme d'eau.

Une pollution de l'ordre du nanogramme n'existe pas dans les réglementations sanitaires de l'eau, c'est une quantité négligeable qui est constituée de ... quelques milliers de milliards de molécules.

La centaine de nanogrammes commence à être prise en considération par notre législation. Par exemple, la limite de concentration des pesticides dans l'eau du robinet est de 0,1 μg par litre.

Dans la Seine, au Havre avec un débit moyen de 500 m³/s : une concentration insignifiante d'un polluant à 0,1 μg par litre d'eau représente une tonne et demie de ce polluant déversé dans l'océan en une année.

3. L'osmose

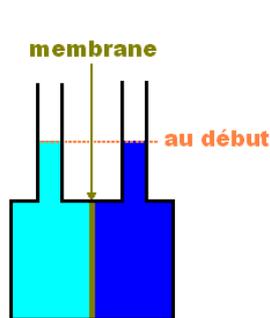
L'osmose fait partie de la vie cellulaire de la matière vivante.

L'osmose est basée sur **un principe d'équilibre** physico-chimique où la **cinétique** (*vitesse*) joue son rôle. Dans un même récipient, si l'on verse deux liquides contenant différentes concentrations de produits dissous, ils se mélangeront jusqu'à uniformisation des concentrations, ... au bout d'un certain temps.

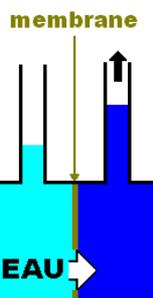
Dans le cas de l'eau : l'osmose est un phénomène de diffusion (de *passage*) de l'eau à travers **une membrane semi-perméable**, sous l'action d'un gradient (d'une différence) de concentration de particules situées de part et d'autre de cette membrane. **L'eau compense cette différence de concentration en diluant la solution la plus concentrée.**

Cette membrane joue le rôle d'un tamis particulier à l'échelle moléculaire, qui est le monde du nanogramme ou du nanomètre, de la nanofiltration et de l'osmose. Si la grosseur de la molécule intervient, il y a d'autres facteurs physico-chimiques complexes qui interviennent. (*Restons simple dans cette approche.*)

OSMOSE

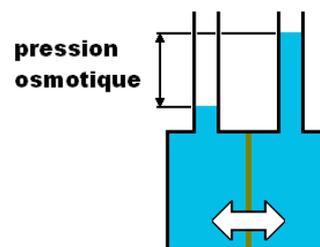


au début
la hauteur des
niveaux des
deux liquides
est identique



l'eau va se déplacer
des **faibles**
concentrations
vers les **fortes**
concentrations

EQUILIBRE

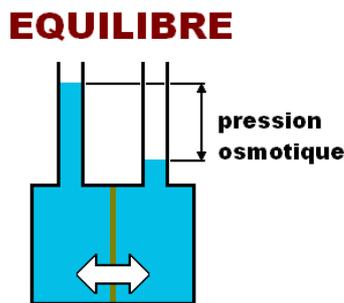


la pression
osmotique est la
pression établie
à l'équilibre lorsque
les concentrations
sont égales

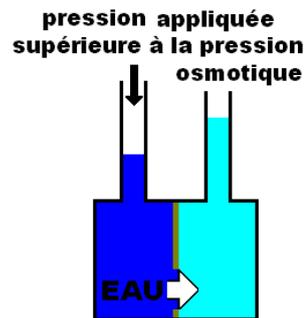
4. L'osmose inverse

En appliquant une pression supérieure à la pression osmotique, l'effet **inverse** de l'osmose produit. D'où le nom d'osmose inverse. L'eau est refoulée à travers la membrane pouvant entraîner avec elle des petites particules ioniques ou polaires.

OSMOSE INVERSE



la pression osmotique est la pression établie à l'équilibre
les concentrations sont égales



l'osmose inverse est obtenue lorsqu'on applique une pression qui permet d'inverser le sens de déplacement de l'eau : des fortes concentrations vers les faibles concentrations

© igepac

Lorsque l'eau quitte le compartiment (bleu foncé) les produits solubles de ce compartiment vont se concentrer. En appliquant une forte pression nous pourrions imaginer que toute l'eau va passer dans l'autre compartiment. Mais **NON**, c'est impossible car la membrane semi-perméable d'osmose inverse fait intervenir d'autres propriétés que celle d'un tamis ou d'une passoire. Il existe d'autres membranes qui jouent ce véritable rôle de tamis.

La pression d'osmose inverse est « proportionnelle » aux concentrations des produits dissous. L'eau de mer est fortement concentrée en sel, la pression de dessalement est d'environ 60 bar. Dans le traitement de l'eau du robinet la pression est nettement plus faible, généralement comprise entre 6 et 8 bar, car les produits dissous sont peu concentrés.

5. Dans le domaine de purification de l'eau du robinet, les membranes classiques de nanofiltration sont particulièrement efficaces pour éliminer la matière organique (filtration bactériologique). Mais cette nanofiltration possède des inconvénients.

L'ozonation crée des bromates qui ne sont pas éliminés par cette filière et ils sont soumis à des normes qui deviennent de plus en plus strictes.

Les métaux lourds, les cations des sels dissous ne sont pas traités par cette filière. On entend par métaux lourds, les substances toxiques présentes dans l'eau en quantités très limitées. L'arsenic, qui n'est pas un métal, est classé dans cette catégorie.

Ce système qui est bien souvent présenté comme la filtration parfaite possède des limites (bien que cette filtration soit la plus efficace actuellement). Les limites sont données par un juste milieu à obtenir entre la vitesse de filtration qui dépend de la porosité de la membrane et le coût financier de l'installation.

A l'issue de cette nanofiltration, des composés comme le calcium et le magnésium ont été éliminés déplaçant les équilibres chimiques. Par exemple le dioxyde de carbone devient en excès et il est nécessaire de prévoir un dégazage.

Ce souvenir qu'une eau brute issue de la filière membranaire – surtout par osmose inverse - est une eau impropre à la consommation. Elle doit être mélangée à de l'eau issue de la filière biologique (traitement standard d'une eau « propre ») sinon un ajout de sels est nécessaire pour qu'au final l'eau soit buvable.



Publicités pour des appareils filtrants

Ne faites jamais confiance à un fabricant, un commerçant, ou à votre vendeur d'eau, vous annonçant que son système de filtration arrête TOUTES les substances indésirables de l'eau de votre robinet.

Il y a simplement une réduction des polluants à condition que le système n'en ajoute pas d'autres, par exemple par la présence de matières plastiques synthétiques tels que récipients, membranes, résines Le but est parfois de piéger plus les consommateurs que les polluants.

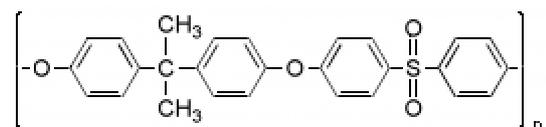
6. Les membranes

Une membrane peut être définie comme une mince paroi permettant une séparation sélective d'espèces chimiques, ioniques, moléculaires ou biologiques : un « nanofiltre ».

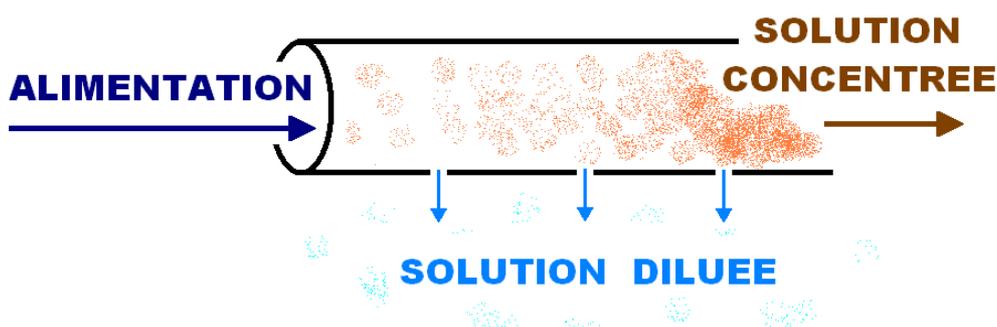
Les pores d'une **membrane** sont de l'ordre de grandeur du nanomètre et varient de 1 à 100 suivant l'emploi que l'on destine à ces membranes.

Les membranes sont le plus souvent fabriquées en acétate de cellulose ou en polymères de synthèse : polyamides, polysulfones* Elles peuvent être planes mais le plus souvent tubulaires d'une épaisseur de l'ordre de 200 µm. Parfois ce sont des fibres creuses obtenues en filant des polymères avec un diamètre intérieur de 25 à 800 µm (pour un diamètre extérieur de 50 à 1000 µm – un millimètre).

* Le POLYSULFONE ou PSU est le produit d'une réaction entre le sel disodique de **bisphénol A** et le sulfone de 4.4 dichlorodiphényle.



MEMBRANE " CYLINDRIQUE "



Ce procédé membranaire est le plus fréquent pour la filtration de l'eau, il utilise le principe de la filtration dite tangentielle. L'eau est séparée en deux parties :

- la **solution diluée** appelée « le perméat » qui passe à travers la membrane et
- la **solution concentrée** appelée « le concentrat », qui ne passe pas à travers la membrane, et qui est évacué avec les impuretés.

On distingue deux types de membranes :

- **les membranes semi-perméables** qui sont perméables à l'eau et à certains solutés mais imperméables à la très grande majorité des produits habituellement dissous dans l'eau, en particulier les molécules de la chimie organique. Ce sont les membranes utilisées en osmose inverse.
- **les membranes microporeuses** qui agissent comme un tamis ou une passoire. Elles retiennent les particules de taille supérieure à celle de leurs pores. Ces nanomembranes sont perforées à l'aide d'un bombardement d'électrons. La taille des trous et les caractéristiques électrostatiques des polymères qui les composent permettent de contrôler la filtration de nombreux polluants.

La frontière entre ces deux filtrations n'est pas toujours bien déterminée, elle dépend des composés de fabrication de ces membranes.

La sélectivité d'une membrane dépend de la facilité de dissolution dans l'eau des espèces à séparer. Les espèces les plus fortement dissoutes auront un taux de rejet plus important ; quelques indications spécifiques :

- les protéines ont une rétention plus faible pour des pH proches du point isoélectrique,
- pour les acides faibles, le taux de rejet est élevé lorsque le pH est supérieur au pK, produit de solubilité,
- pour des ions de valence différente, le taux de rejet augmente avec la valence des ions,
- pour des ions de même valence, le taux de rejet augmente si leur masse molaire diminue.

7. La nanofiltration de l'usine de Méry sur Oise (d'après Veolia et le Sedif)

Historique

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

Pour alimenter la région parisienne en eau d'une bonne qualité, Veolia Water a opté pour une rupture technologique majeure : la nanofiltration.

Ce système membranaire ultra sophistiqué réussit à filtrer les éléments indésirables colloïdaux et en suspension de plus en plus nombreux dans les eaux de surface et ainsi limiter l'usage de produits de traitement (140 000 m³ par jour).

L'usine de Méry-sur-Oise dessert la banlieue de Paris (quatre millions d'habitants) en eau de bonne qualité grâce à un procédé membranaire mis au point par les chercheurs de Veolia Water.

Ce procédé, issu de l'univers médical, a été adapté par les chercheurs de Veolia Water pour permettre son utilisation aux grands volumes et produire massivement à des prix compatibles avec l'exigence du marché. Il a aussi été mis en œuvre en 2002 en Australie à Coliban pour traiter jusqu'à 126 000 m³ par jour.

La filtration sur membrane est utilisée pour produire des eaux ultra-pures de laboratoires, pour dessaléniser l'eau de mer ou encore dans l'industrie alimentaire pour filtrer ou concentrer un produit.

L'application de ce procédé à une eau de rivière, telle que l'Oise, a été une première mondiale. La recherche a résolu les problèmes posés par l'extrême variabilité des caractéristiques physiques et chimiques de l'Oise, tout en parvenant à concilier des objectifs de qualité ambitieux : une eau pratiquement pure

sans virus, ni sulfates, ni pesticides (atrazine) ... conservant toutefois une partie de ses sels minéraux.

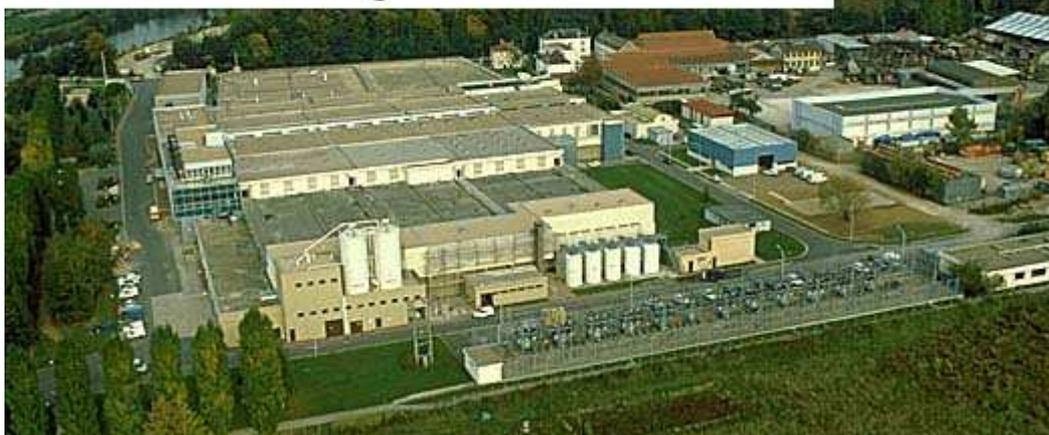
Développée en collaboration avec la Société Dow Chemical, la membrane spécifique à l'usine de Méry-sur-Oise a nécessité une phase délicate de mise au point. Le premier type de membrane réalisée en 1993 **était trop déminéralisant, donc fournissant une eau impropre à la consommation.**

Pour le prototype, en 1997, l'équipe de recherche a conçu une nouvelle membrane **laissant mieux passer les sels minéraux**, tout en conservant une **bonne** rétention des pesticides. Une bonne rétention ne signifie pas une rétention de TOUS les pesticides.

Pour comprendre la complexité de cette mise au point, il faut savoir qu'une membrane **ne** se comporte **pas** comme un véritable tamis. Elle ne retient pas uniquement les molécules en fonction de leurs tailles, **ici supérieures à 1 nanomètre**. La sélectivité de la membrane dépend aussi d'autres paramètres, comme la structure moléculaire, la masse molaire ou les charges électriques en présence

Cette chimie membranaire n'est pas simple. Elle donne la mesure de la performance technique.

Usine de Méry sur Oise - 2000



8. Toxicité officielle d'une substance

Que faut-il filtrer ?

Le taux de pollution acceptable est un compromis entre un constat des effets sur notre organisme, des recherches scientifiques et surtout le coût financier de la non-pollution.

Actuellement nous attendons que les effets nuisant à notre bien-être ne soient plus acceptés par la société civile. Le cas du roundup est significatif. Ce polluant planétaire a été défendu pendant des années par des « savants » universitaires, docteurs, ... et pourtant il vient d'être reconnu nocif.

Un produit devient dangereux pour la santé de l'homme lorsqu'il rentre dans notre alimentation par le biais de l'eau par exemple. Généralement il n'est pas décelable facilement car il est en présence de nombreux autres composés et les procédés d'analyse deviennent rapidement complexes, donc coûteux et par conséquent les détections ne sont pas faites.

.....

Un exemple de la toxicité. L'arsenic a été le poison par excellence des siècles passés, car il est insipide, inodore et incolore. En France, la contamination de l'eau à l'arsenic est d'origine naturelle car présent dans le sol. Il n'est mortel qu'à une dose de l'ordre de 150 mg/l. Une consommation régulière d'arsenic à une concentration mille fois plus faible est responsable d'augmentation de cancers des poumons, du foie, de la vessie, de la prostate, de la peau et des reins, etc. Chaque personne réagira différemment à cet empoisonnement lent et progressif allant de quelques années à plusieurs dizaines d'années.

Sur la base de critères sanitaires, la valeur guide pour l'arsenic dans l'eau de boisson doit être inférieure à 0,01 mg par litre soit 10 µg par litre selon l'OMS. Avec ce seuil, le risque existe toujours, il est de 6 cancers cutanés supplémentaires sur 10.000 personnes (pour une consommation quotidienne de 2 litres d'eau par jour).

Cette valeur a été reprise en droit européen (directive 98/83/CE du conseil du 3 novembre 1998) et en droit français (décret 2001-1220 du 20 décembre 2001) sous la forme d'une « concentration maximale admissible » et d'une « limite de qualité ». Les limites de qualité des eaux brutes destinées à la consommation est à 100 µg/l dans la mesure où le traitement pour éliminer l'arsenic garantira les **10 µg/l. A comparer avec la limite fixée à 0,1 µg/l pour les pesticides, considérés 100 fois plus dangereux que l'arsenic.**

.....

Si nous ne contrôlons pas la qualité de notre alimentation nous pouvons ingurgiter des doses cumulées importantes de produits toxiques. L'intoxication est garantie à long terme mais les conséquences dépendront de l'individu. Le tabac est un bon exemple. Il est mortel. Pourtant nous connaissons tous de gros fumeurs quadragénaires, ... mais également des trentenaires décédés d'un cancer du poumon !

Le légendaire Mac Nolay : une osmose bien réussie

Au milieu du XVII^{ème} siècle, un tavernier écossais, Mac Nolay avait remarqué que pour refroidir son scotch-whisky, lorsqu'il le mettait dans une vessie d'agneau et la plongeait dans un seau rempli d'eau fraîche de son puits, la vessie se gonflait, l'eau passait dans son scotch. Il constatait que l'eau du seau était restée sobre, elle n'avait pas bu son scotch. Une aubaine pour cet écossais qui fit fortune en vendant de l'eau de son puits au prix du scotch. Le Mac Nolay est devenu un whisky léger qui s'apparente plus à un pineau des Charentes.

Sur le Web : Hydrotour – Lenntech – Sedif – Veolia ... etc.
amusant <http://www.didier-pol.net/1MEMBRA1.html>