

**Produire l'eau potable -
Ressources, technologies, coûts**

L'eau potable est nécessaire à la vie. Inégalement répartie sur Terre, elle nécessite d'être produite en milieu urbain ou dans les zones arides. Le choix de sa méthode de production nécessite une analyse détaillée prenant en compte des considérations variées :

- (i) Quelle ressource en eau est-elle localement accessible et dans quelle mesure répond-elle aux besoins d'une population ?
- (ii) Quelles sont les méthodes de purification adaptées à la ressource locale en eau ainsi qu'aux conditions climatiques ?
- (iii) Parmi ces méthodes, quelle est celle qui apparaît comme optimale tant du point de vue économique que du point de vue environnemental ?

À l'aide des documents fournis (format papier et fichiers pdf), vous disposez de deux heures de préparation pour élaborer une présentation Power Point de 15 minutes sur le thème « Produire l'eau potable - Ressources, technologies, coûts ». Elle devra comporter :

- (i) une présentation générale de la problématique (2 à 3 minutes) ;
 - (ii) une présentation des raisonnements que vous avez mis en œuvre pour arriver à vos conclusions, le(s) résultat(s) chiffré(s) obtenu(s) et l'analyse critique que vous en faites (environ 10 minutes) ;
 - (iii) une présentation de vos conclusions pour répondre à la problématique (2 à 3 minutes).
- La présentation orale devra être répartie de la manière la plus équilibrée possible entre les membres du trinôme.

Enfin, la présentation sera suivie d'un entretien avec le jury (15 minutes) qui vous permettra d'argumenter sur vos choix, de développer des arguments, de faire avancer éventuellement une démarche de résolution non aboutie, d'améliorer le modèle retenu pour la résolution, de corriger d'éventuelles erreurs et de répondre à des questions diverses liées à la problématique étudiée.

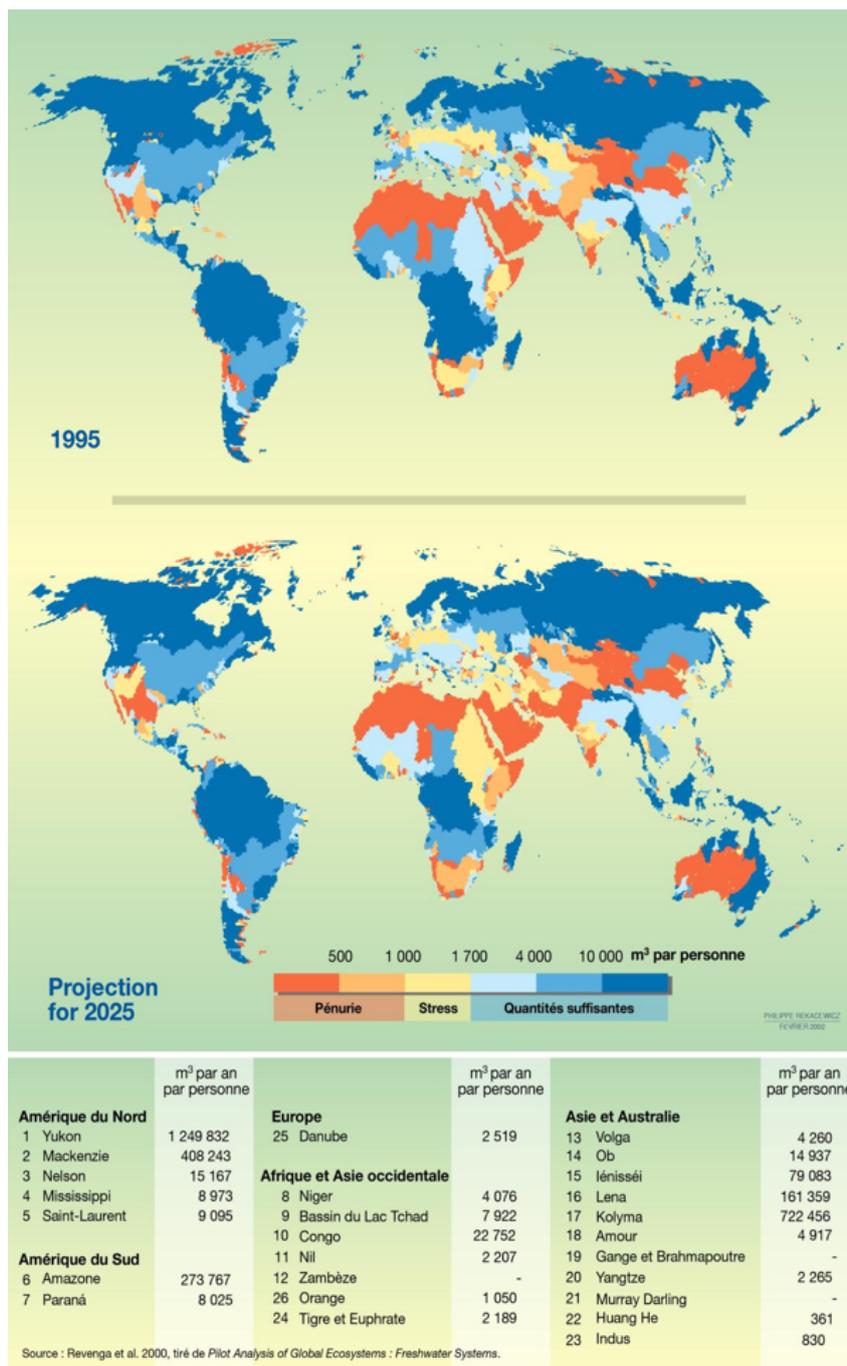


DOCUMENT 1 :

Ressources et consommation d'eau sur Terre

Document 1.a : Ressources en eau sur Terre

Le document suivant présente la ressource en eau sur Terre en 1995 ainsi que dans une projection en 2025. Comme on peut l'observer, de nombreuses régions du globe manquent d'eau. Pour autant, même dans les régions disposant de ressources, il est nécessaire de purifier l'eau pour pouvoir la consommer.



Source : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/ou-en-sont-les-ressources-en-eau-dans-le-monde/>, consulté le 10.01.2019

Document 1.b : L'eau dans le monde : les chiffres clés

Combien consomme-t-on d'eau ?

La consommation personnelle d'eau comprend une consommation d'eau « directe » (boisson, toilette...) et « indirecte » (eau virtuelle), cette dernière étant en fait le gros de la consommation totale.

2 000

Il faut 2000 litres par jour pour faire vivre un homme, c'est à dire l'eau nécessaire à la chaîne agroalimentaire qui le nourrit : soit beaucoup plus que les 2 litres par jour bus par une personne en moyenne. L'organisme humain a besoin d'un minimum de 2 litres d'eau par jour et il ne peut survivre que quelques jours sans eau.

40

Selon le CNRS, la consommation totale directe en eau domestique dans le monde est estimée en moyenne à 40 litres d'eau par jour et par habitant.

Alors qu'en moyenne un agriculteur malgache consomme 10 litres d'eau par jour, un Parisien a besoin de 240 litres d'eau pour son usage personnel, le commerce et l'artisanat urbains, et l'entretien des rues. Quant au citadin américain, il consomme plus de 600 litres.

La consommation d'eau annuelle par habitant

730 000

Il faut 730 000 litres d'eau chaque année pour alimenter et couvrir les besoins d'un habitant de la planète.

Volume d'eau par habitant pour la production des biens et des services

2 483 m³/personne/an aux États-Unis

= 2,4 millions de litres par personne, soit 6 580 litres par jour

2 332 m³/personne/an en Italie

1 682 m³/personne/an en Suisse

1 103 m³/personne/an en Pologne

675 m³/personne/an en Ethiopie

Moyenne mondiale : 1 243 m³/personne/an

Document 1.c : La notion d'eau virtuelle

La notion un peu abstraite d'eau virtuelle n'est pas sans rapport avec celle d'empreinte écologique ou de bilan carbone. C'est un peu la même manière abstraite d'envisager l'impact d'un bien de consommation en termes de consommation d'eau.

Le concept d'**eau virtuelle** aide à connaître l'impact d'un produit ou d'une culture en termes de consommation d'eau. L'eau virtuelle s'exprime généralement en litres d'eau par kilogramme.

L'eau nécessaire à la production d'un produit

- Tous les produits de consommation sont concernés car tout nécessite de l'eau. La fabrication des biens nécessite de l'eau, une quantité invisible à laquelle on ne pense pas. Ces quantités d'eau indispensables à la production des biens de consommation sont appelées « eau virtuelle ».
- Les produits agricoles sont les premiers consommateurs. Pour produire une tonne de céréales, il faut 1 000 mètres cubes d'eau qui peuvent provenir de la pluie, des nappes phréatiques, des cours d'eau, ou de l'humidité du sol.

La principale consommation d'eau en France et dans le monde est consacrée à l'agriculture et à la production de produits pour l'alimentation humaine ou animale (l'élevage notamment). C'est de loin la production agricole qui requiert la plus grande quantité d'eau : 70 % de l'eau mondiale y est consacrée et notamment 92 % de l'eau douce !



Sources : Encyclo Ecolo (https://www.encyclo-ecolo.com/Eau_virtuelle)
Best Water Technology (<http://www.bwt.fr/fr/technologie-l-eau/eau-virtuelle/Pages/default.aspx>), consultés le 10.01.2019.

DOCUMENT 2 :
Le cycle urbain de l'eau

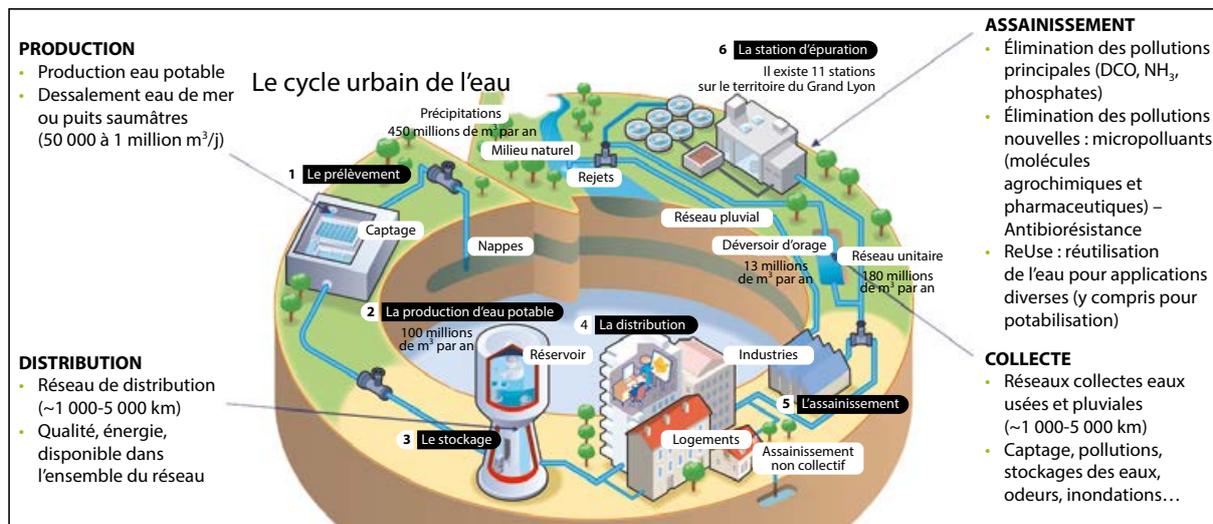


Fig. 2 : Schéma du cycle urbain de l'eau (d'après Eau du Grand Lyon)

Le cycle urbain de l'eau peut être divisé en 4 parties :

1. La production d'eau potable : elle utilise les ressources disponibles : les ressources souterraines, les rivières, les lacs, mais aussi, de plus en plus dans certaines régions du monde, les ressources issues du dessalement de l'eau de mer ou de puits saumâtres. Dans une ville, il faut capter et produire 50 000 à 1 million, voire quelques millions de m³ d'eau par jour, ce sont donc des quantités considérables qu'il faut ensuite distribuer dans des réseaux qui font plusieurs milliers de kilomètres à l'échelle d'une ville.

2. La distribution d'eau potable : typiquement, un réseau d'eau potable représente 1 000 à 5 000 km sur lesquels il faut assurer la qualité de l'eau, mais aussi résoudre des problèmes d'énergie, car pomper 1 million de m³ d'eau par jour consomme beaucoup d'énergie ! En outre, il faut assurer la disponibilité de l'eau dans l'ensemble du réseau, y compris dans les zones où l'eau peut stagner et on sait que l'eau stagnante est polluée.

3. La collecte des eaux usées : le réseau de collecte des eaux usées, mais aussi des eaux pluviales, est lui aussi très important : il représente entre 1 000 et 5 000 km. Se posent à ce niveau des problèmes de captage, de pollution, de stockage de ces eaux, et aussi éventuellement des problèmes liés aux odeurs et aux inondations.

4. L'assainissement des eaux collectées : les eaux collectées doivent être assainies avant de les injecter dans la nature. Il faut éliminer les polluants connus comme le carbone (matière organique), les composés de l'azote et du phosphore, mais aussi les micropolluants, ces molécules agrochimiques ou pharmaceutiques comme le cachet d'aspirine que l'on prend le matin et que l'on retrouve dans les eaux usées. Aujourd'hui, la réutilisation de l'eau usée pour des applications diverses dans la ville où elle a été produite est la tendance, surtout dans certaines régions du monde soumises à un grand stress hydrique.

DOCUMENT 3 :

La production d'eau potable selon les différentes ressources

Selon la provenance de l'eau, l'opération de production d'eau potable peut être plus ou moins aisée à mettre en œuvre.

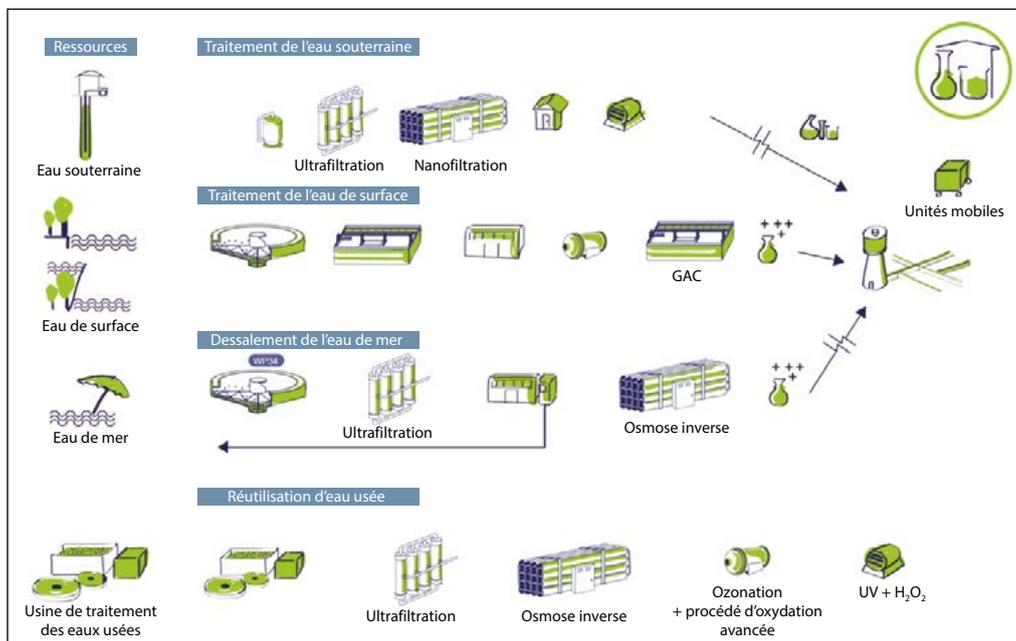


Fig. 3.1 : Produire de l'eau potable à partir de plusieurs ressources (Source : Michel Hurtrez, Groupe SUEZ)

La technique de production de l'eau potable se doit d'être adaptée à la ressource d'eau disponible localement. Cependant, où que l'on soit géographiquement, ces techniques doivent répondre à un certain nombre de contraintes :

- La durabilité dans le temps : les traitements de l'eau se font souvent de manière continue et ininterrompue au cours du temps. Il est donc nécessaire d'avoir des installations robustes et résistantes face aux pannes. De plus, elles doivent permettre le traitement de très grandes quantités d'eau au cours d'une même journée, leur fonctionnement doit être le plus optimal et efficace possible pour faire face à des débits très importants.
- Un coût abordable : il est important que la méthode puisse être reproductible à la fois sur une échelle adaptée à la zone dans laquelle elle est employée (débit d'eau à traiter), mais aussi au niveau du coût de mise en place et d'entretien des machines.

Plusieurs techniques de traitement de l'eau ont ainsi été mises en œuvre, et il est souvent nécessaire de les combiner afin d'optimiser au maximum le processus d'assainissement. Pour le traitement des eaux usées par exemple, plusieurs méthodes sont « mises en série » selon l'échelle de dimensions à laquelle elles opèrent.

Adsorption sur charbon actif

L'adsorption consiste en la fixation de certaines molécules initialement en solution sur une surface solide présentant une surface spécifique élevée (un rapport surface/masse élevé). Le charbon actif est un bon adsorbant : il s'agit de matière carbonée ayant subi un traitement pour permettre une bonne adsorption de molécules à sa surface. Il en existe deux types : le charbon actif en poudre (PAC), et le charbon actif granulaire (GAC). Ce dernier est plus souvent utilisé et permet l'adsorption des composés organiques présents dans l'eau. La polarité des composés à filtrer influence la qualité de l'adsorption : une molécule apolaire va plus facilement s'adsorber à la surface du charbon actif qu'une molécule polaire.

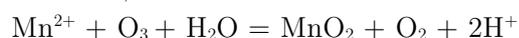


Fig. 3.2 : Charbon actif (<http://www.wehrle-umwelt.com/installations-d-adsorption>)

La préozonation

Cette méthode consiste à traiter l'eau avec de l'ozone O_3 afin d'éliminer des composés colorés ou odorants. Elle sert particulièrement à l'élimination du fer et du manganèse. L'ozone étant un composé instable, il doit être produit au sein même de l'installation. Il est notamment formé par le passage de l'air entre des électrodes chargées, ce qui permet la transformation du dioxygène en ozone selon la réaction : $3 O_2 = 2 O_3$

Une fois l'ozone formé, il est possible d'oxyder le cation manganèse (II) en dioxyde de manganèse insoluble, selon la réaction :



Il est nécessaire de bien choisir les proportions d'ozone à introduire : un excès de celui-ci pourrait conduire à la formation d'ions permanganate hydrosolubles, qui coloreraient l'eau en rose.

Le dessalement de l'eau de mer

Le dessalement de l'eau est devenu une réalité industrielle. D'énormes progrès ont été réalisés ces dernières années. Aujourd'hui on approche les 100 millions de m^3 d'eau produite par jour par dessalement, par pratiquement 15 000 installations dans le monde dans 150 pays.

Par exemple, l'usine de dessalement de Melbourne en Australie produit pratiquement 440 millions de litres d'eau dessalée par jour, ce qui correspond au pompage et au traitement de 1 million de m^3 d'eau de mer par jour : 440 000 m^3 d'eau potable sont injectés dans le réseau, et 560 000 m^3 d'eau plus concentrés en sels sont rejetés à nouveau en mer.



Fig. 3.3 : Usine de dessalement de Melbourne (Australie)

Elle utilise les modules d'osmose inverse sous haute pression pour produire l'eau dessalée.

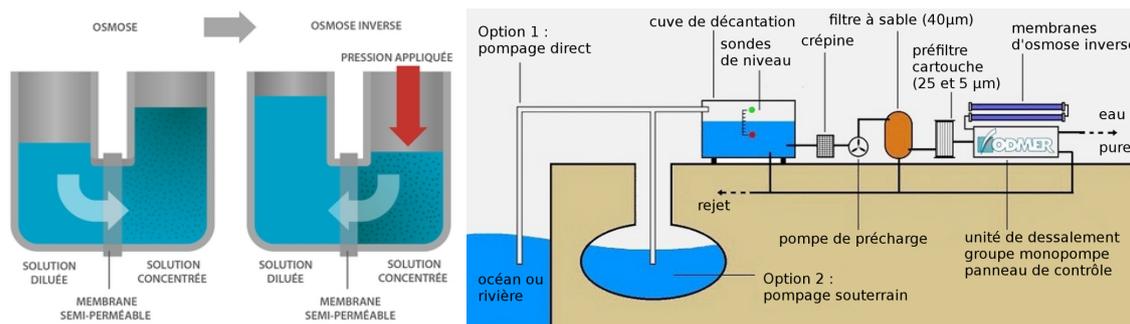


Fig. 3.4 : Principe de l'osmose inverse et schéma d'usine utilisant cette technique

Le dessalement a la réputation d'être très coûteux en énergie, il faut en effet théoriquement environ 1 kW/m^3 pour dessaler de l'eau de mer. Mais si on tient compte du fait que pour 1 m^3 d'eau de mer traité, 50 % seront effectivement dessalés, mais que 50 % seront rejetés plus salés, une unité d'osmose inverse consomme en fait à peu près 2 kW/m^3 d'eau dessalée, donc presque la limite thermodynamique : le rendement énergétique ne peut donc pas être amélioré.

Sources :

Chimie dans la ville, EDP Sciences

www.lenntech.fr

[Adsorption sur charbon actif - CANAL UNISCIEL - Vidéo - Canal-U www.canal-u.tv](https://www.canal-u.tv)

www.suezwaterhandbook.fr

DOCUMENT 4 :

Les enjeux de la distribution d'eau potable

Document 4.a : Le calcaire, une inégalité entre les territoires

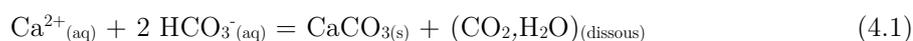
Le calcaire dans l'eau courante

L'eau courante contient différents minéraux et notamment des ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} . Le calcaire est un solide qui peut boucher les canalisations.



Fig. 4.1 : Canalisation entartrée

Ce que l'on appelle couramment « calcaire » est un solide, le carbonate de calcium, de formule CaCO_3 sous une forme cristalline particulière appelée « calcite ». Les dépôts se font de manière concentrique de l'extérieur vers l'intérieur du tuyau. Ce processus peut boucher progressivement les canalisations. L'équation de précipitation de la calcite est :



La dureté de l'eau

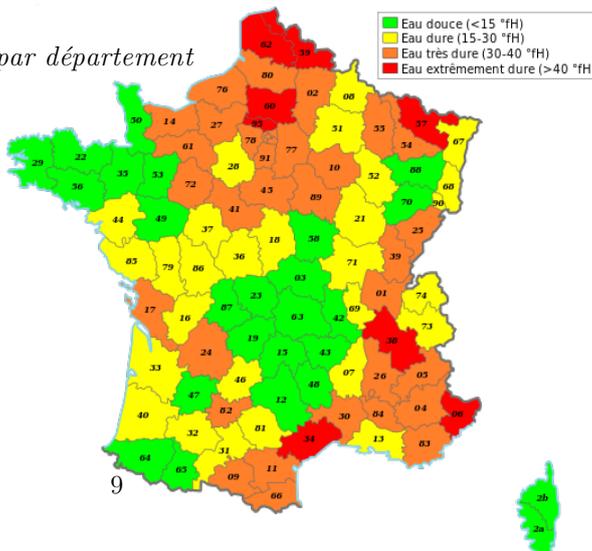
On peut classer l'eau en fonction de sa teneur en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Cette teneur est appelée titre hydrométrique, noté TH. L'unité du titre hydrométrique est le degré français (°fH) qui correspond à une concentration de dix milligrammes de carbonate de calcium par litre d'eau.

Tableau 4.1 : Plage de valeurs du titre hydrométrique

TH (°fH)	0 à 7	7 à 15	15 à 30	30 à 40	+40
Eau	très douce	douce	plutôt dure	dure	très dure

La dureté de l'eau augmente généralement avec la distance à la source car l'eau se charge en sels minéraux tout au long du parcours. Le titre hydrométrique dépend également intrinsèquement de la source. Ainsi, les différents départements français sont très inégaux face au calcaire.

Fig. 4.2 : Dureté de l'eau en France par département



Lutter contre le calcaire

Il existe différentes possibilités de lutter contre le calcaire, que ce soit de façon préventive ou curative.

- Éliminer le calcaire de nos tuyaux.

L'une des caractéristiques de la réaction de précipitation des carbonates (équation 4.1) est que sa constante de réaction $K(T)$ est une fonction croissante de la température T . Ainsi, le calcaire se dépose essentiellement au point le plus chaud du circuit domestique.

Pour éliminer le calcaire, on peut utiliser des systèmes magnétiques ou électromagnétiques. Il s'agit de générer un champ magnétique autour du tuyau dont les conséquences ont pour effet de transformer temporairement la calcite en aragonite. L'aragonite est du carbonate de calcium sous une autre structure cristalline que la calcite. Cette forme est plus instable et ne se dépose pas sur les bords de la tuyauterie.

La plage d'efficacité de cette technique magnétique correspond à un titre hydrométrique de 14 à 35°fH. Avec un électroaimant, on peut traiter de l'eau jusqu'à 50°fH.

- Les adoucisseurs

— Une résine chargée en ions sodium Na^+

On peut utiliser une résine chargée en ions Na^+ . Cette résine échange des ions sodium contre des ions calcium et magnésium de l'eau, responsables de sa dureté et des dépôts de calcaire. Le cycle annuel de la résine est :

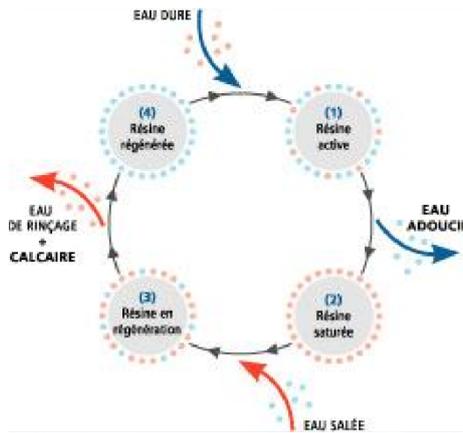


Fig. 4.3 : Cycle chimique d'adoucissement de l'eau par une résine

La régénération s'effectue en entretien annuel par une saumure, eau très salée saturée en ions Na^+ et Cl^- . Cela permet de recharger la résine en ions sodium.

- Un adoucisseur au CO_2

On peut modifier l'équilibre (4.1) en gazéifiant l'eau par adjonction de CO_2 . Cela favorise l'équilibre dans le sens de la dissolution ou la non-précipitation du carbonate de calcium.

Formellement, la constante de cette réaction s'écrit :

$$K(T) = \frac{[\text{CO}_2(\text{dissous})]}{[\text{Ca}_{(\text{aq})}^{2+}][\text{HCO}_3^-(\text{aq})]^2} \quad (4.2)$$

Cela présente néanmoins l'inconvénient de modifier la composition chimique, et en particulier de l'acidifier car le CO_2 dissous dans l'eau est un acide faible.

En effet, le CO_2 est en équilibre dans l'eau avec l'acide carbonique selon l'équilibre :

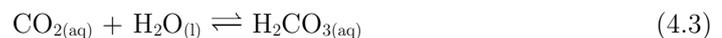


Tableau 4.2 : pK_a des couples acido/basiques de l'acide carbonique

Couple acido/basique	H_2CO_3/HCO_3^-	HCO_3^-/CO_3^{2-}
pK_a	6,4	10,3

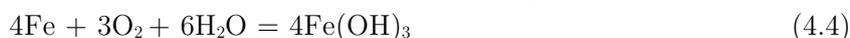
Document 4.b : La corrosion, un enjeu de santé

La tuyauterie, une source d'ions métalliques

La tuyauterie domestique peut être en acier, c'est-à-dire un alliage de fer, de carbone et d'un ensemble d'autres éléments comme l'aluminium, le chrome, le manganèse ou le nickel. Le passage de l'eau, dans certaines conditions, peut prélever des ions métalliques des tuyaux et polluer l'eau de boisson.

L'oxydation du métal

Sur l'exemple du fer Fe, la réaction d'oxydoréduction entre le dioxygène de l'eau et le fer est :



Cette réaction est à l'origine de la rouille, qui abîme les tuyaux.

Avec des tuyaux en cuivre, l'oxydation crée du « vert-de-gris » selon la réaction :



Les ions métalliques et leurs effets sur la santé

- Le fer :

L'ingestion chronique d'oxydes de fer en concentration excessive peut avoir comme conséquence le développement d'une maladie pulmonaire appelée la sidérose. Cela peut également favoriser l'apparition d'un cancer des poumons.

- Le chrome :

Le chrome le plus oxydé est le chrome (VI). C'est également le plus dangereux pour la santé. Il peut avoir de nombreuses conséquences, plus ou moins dangereuses. Le chrome peut affaiblir le système immunitaire, altérer le foie, les reins ou les poumons.

- Le nickel :

Lorsque le nickel est absorbé en quantités trop importantes, les conséquences se ressentent au niveau des poumons ou du cœur.



Fig. 4.4 : Métaux oxydés. Tuyau en acier rouillé à gauche. Cuivre « vert-de-gris » à droite.

Lutter contre la corrosion

Les recommandations les plus fréquemment rencontrées pour éviter des problèmes majeurs de corrosion sont :

- Choisir un métal inoxydable, même si dans l'absolu il n'existe pas de métal inoxydable
- Éviter le contact direct entre métaux de potentiels différents
- Éviter les hétérogénéités dans les tuyaux qui agissent comme des sites de nucléation privilégiés
- Vérifier la bonne mise à la terre de l'installation
- Maîtriser l'environnement et en particulier les principales caractéristiques de l'eau comme l'acidité, la dureté, la vitesse du fluide...

Sources des images :

bouteille.jpg : <https://www.sain-et-naturel.com/eau-en-bouteilles-qui-possedent-des-polluants.html>

carte_durete.png : <http://aicvf.org/bretagne-pdl/files/2015/07/aicvf-presentation-coroxyldu-21-mai-2015.pdf>

corrosion.png : <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/traitement-eau-adoucisseur/>

cuivre1.jpg : <https://plomberie.ooreka.fr/comprendre/tuyau-cuivre>

cuivre2.jpg : <http://blog.batirmoinscher.com/quels-tuyaux-pour-la-plomberie-cuivre-per-ou-multicouches>

gouttes.jpg : <https://plomberie.ooreka.fr/comprendre/tuyau-eau-potable>

petit_cycle.jpg : <http://www.services.eaufrance.fr/gestion/services/eau-nature-et-domestique/petit-cycle>

resine.png : <http://aicvf.org/bretagne-pdl/files/2015/07/aicvf-presentation-coroxyldu-21-mai-2015.pdf>

tuyau.jpg : <http://www.grand-perigieux-habitat.fr/Detartrage-et-prevention-de-la-legionellose.html>

vertdegris.jpg : <https://www.pinterest.fr/pin/38984353003187328/>

Inspiration générale du document 4 :

<http://aicvf.org/bretagne-pdl/files/2015/07/aicvf-presentation-coroxyldu-21-mai-2015.pdf>