

L'eau et la ville

Paul-Joël Derian est un ancien élève de l'École Normale Supérieure. Après un doctorat de physique, il a travaillé vingt-deux ans dans la recherche et le développement industriel (Rhodia puis Solvay). Depuis cinq ans, il est directeur Sciences & Technologies du groupe SUEZ¹.

L'eau et la ville sont des sujets tous deux particulièrement importants quand on sait que la population mondiale en 2050 sera de 9 à 10 milliards d'habitants, c'est-à-dire que nous aurons une croissance de 2,5 milliards d'habitants dans les trente prochaines années et que l'essentiel de cette croissance (80-90 %) sera localisée dans les villes. Les villes pour l'essentiel sont situées dans des zones côtières, et déjà aujourd'hui, 40 % de ces villes sont exposées à un stress hydrique, c'est-à-dire qu'elles sont situées dans des zones où il peut y avoir une pénurie d'eau ou des problèmes d'approvisionnement en eau.

La dimension du problème est donc importante mais nous allons voir que des solutions

existent et qu'il suffit de les mettre en œuvre. Les seuls problèmes auxquels il faut s'attaquer sont des questions d'infrastructure.

1 Le cycle urbain de l'eau

Tout le monde connaît le grand cycle de l'eau qui fait que l'eau s'évapore, qu'il pleut et que l'on retrouve l'eau dans la nature.

Le cycle urbain de l'eau peut, quant à lui, être divisé en quatre parties (**Figure 1**) : la production d'eau potable, son assainissement, sa collecte et sa distribution.

1.1. La production de l'eau potable

La production d'eau potable utilise les ressources disponibles : les ressources souter-

1. www.suez.com

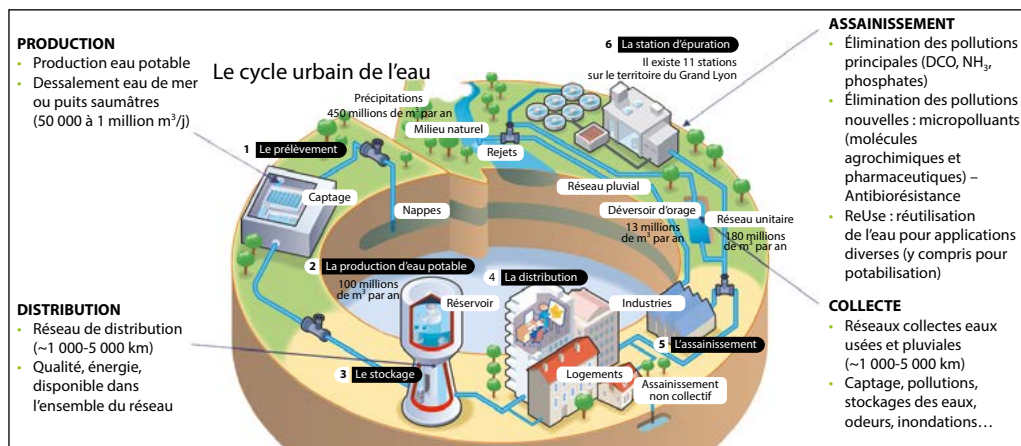


Figure 1

Le cycle urbain de l'eau.
DCO : demande chimique en oxygène.

Source : d'après Eau du grand Lyon

raines, les rivières, les lacs, mais aussi, de plus en plus dans certaines régions du monde, les ressources issues du dessalement² 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.

1.2. La distribution de l'eau potable

Typiquement, un réseau de distribution d'eau potable représente 1 000 à 5 000 kilomètres sur lesquels il faut assurer la qualité de l'eau, mais aussi résoudre des problèmes

2. Dessalement : processus permettant de retirer une partie (ou la totalité) des sels d'une eau pour la rendre potable.

d'énergie : car pomper de l'eau, quand il s'agit de 1 million de m³ par jour, consomme beaucoup d'énergie. De plus, 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.

1.3. 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 kilomètres. 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.

1.4. L'assainissement des eaux collectées

Les eaux collectées doivent être assainies avant de les ré-

injecter dans la nature. Il faut éliminer les polluants connus comme le carbone (la matière organique), les composés de l'azote et du phosphore, mais aussi les micropolluants³, ces molécules agrochimiques ou pharmaceutiques comme le cachet d'aspirine qu'on prend le matin et qu'on retrouve ensuite dans les eaux usées. Certaines pollutions ne sont pas vraiment des pollutions en tant que telles mais elles peuvent asphyxier le milieu naturel.

3. Micropolluant : substance polluante présente en très faible concentration dans l'eau (de l'ordre du microgramme ou du nanogramme par litre). Les résidus médicamenteux, les pesticides ou certains métaux lourds en sont des exemples.

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.

2 Les grands procédés, les technologies, les défis

L'objectif est de donner quelques éclairages sur les domaines technique et scientifique (notamment la chimie) des différentes étapes du cycle urbain de l'eau.

2.1. La production d'eau potable

La **Figure 2** résume les différents procédés de production

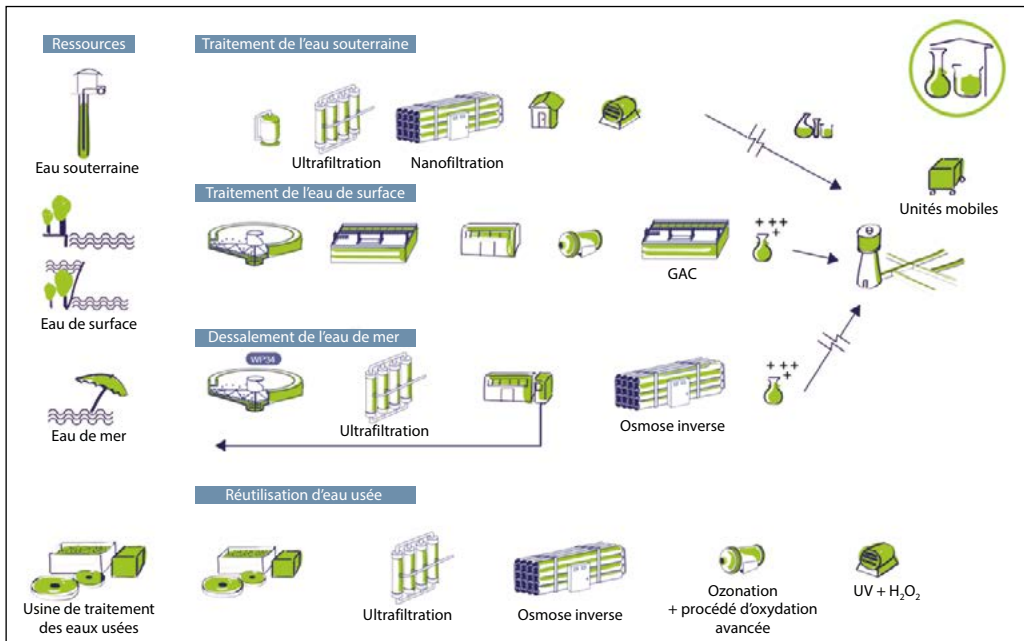


Figure 2

Techniques de traitement de l'eau en fonction des ressources, pour la production d'eau potable.

Source : Michel Hurtrez, Groupe SUEZ.

d'eau potable utilisés selon l'origine de la ressource : l'eau souterraine, l'eau de rivière, l'eau de surface, l'eau de mer, et de plus en plus l'eau usée.

Sans entrer dans les détails, examinons les traitements classiques.

2.1.1. Les traitements classiques

Nous choisirons ici deux traitements classiques : l'adsorption sur charbon actif⁴ et l'oxydation par l'ozone (O₃) pour éliminer les molécules organiques mais aussi pour éliminer les virus et les bactéries, donc pour assainir.

Le choix des procédés et des technologies dépend de la qualité de l'eau et de son

4. Adsorption : processus par lequel un composé est retenu sur (ou dans) une autre substance (appelée sorbant).

Charbon actif : matériau carboné à la structure poreuse présentant une grande surface spécifique. C'est un sorbant très utilisé pour le traitement de l'eau et de l'air.

origine (**Tableau 1**). L'eau souterraine est en général une eau de bonne qualité, assez facile à purifier, tandis que l'eau de surface est plus complexe à traiter, en particulier lorsqu'elle contient des molécules organiques dissoutes. Certaines eaux sont très compliquées à traiter, ce ne sont pas les eaux que l'on utilise dans les pays comme la France, mais produire une eau potable au Bangladesh est parfois aussi compliqué que de traiter une eau usée.

Il faut assurer le traitement de l'eau de façon flexible 24h/24, 365 j/an, il faut combiner les technologies, utiliser des procédés complexes mais aussi robustes, qui permettent d'assurer l'exploitabilité, la fiabilité.

Il faut régulièrement mettre à jour les paramètres de fonctionnement des procédés existants. Pour l'ozonation et l'adsorption sur charbon actif, ces paramètres sont rappelés dans le **Tableau 2**. On retrouve des problèmes de chimie,



Tableau 1

Les traitements classiques : les critères de choix, au cas par cas.

Qualité de l'eau à traiter	Évolutivité
<ul style="list-style-type: none"> - définition des taux de traitement : dose de CAP/ozone - influence de la matière organique 	<ul style="list-style-type: none"> - des molécules à traiter - des rendements d'élimination
Type de micropolluants à traiter	Ouvrages existants
<ul style="list-style-type: none"> - affinité avec les technologies disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> - intégration facilitée
Objectif de traitement	Exploitabilité, fiabilité
<ul style="list-style-type: none"> - micropolluants - annexes : désinfection 	

Tableau 2

Les paramètres de fonctionnement pour l'ozonation et l'adsorption sur charbon actif.

Ozonation 	Adsorption (charbon actif) 
<ul style="list-style-type: none"> - temps de contact minimum de réaction (hydrodynamique) - dose en fonction de la matière organique de l'eau - conception de contacteur adéquate pour garantir un transfert d'ozone optimum (> 90 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - temps de contact minimum requis et d'un temps de résidence maîtrisés - dose en fonction de la matière organique de l'eau/type et structure de charbon - réacteur hydrauliquement performant pour assurer l'adsorption et la rétention de CAP
Actions concomitantes	
<ul style="list-style-type: none"> - Désinfection - Oxydation des nitrites, Fer, Mg... - Couleur, odeurs - Traitement de la matière organique 	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement de la matière organique - Rétention des MES (selon les réacteurs) - Odeurs

Source des images : SUEZ/William Daniels.

voire de génie chimique, de temps de contact, des problèmes d'hydrodynamique, de dose, et tout ce qui est lié à la conception du réacteur pour mettre en contact ce gaz qu'est l'ozone avec l'eau, et assurer que le traitement dans des temps de contact raisonnables.

Encore une fois, il faut se rappeler qu'il faut traiter des dizaines de milliers à des centaines de milliers de m³ par jour, donc des débits énormes, et cela, à un coût acceptable. L'eau est tout de même, après l'air, le produit utilisé par l'homme le moins cher. L'ordre de grandeur étant de quelques € par m³, c'est-à-dire par tonne.

La **Figure 3** présente un exemple d'installation d'ozonation. Il faut d'abord produire l'ozone (O₃) à partir du dioxygène (O₂), puis l'envoyer dans un réacteur (le contacteur), dont il faut maîtriser le design pour assurer les bons temps

de contact, et ensuite détruire l'ozone résiduel par des procédés thermo-catalytiques⁵.

L'adsorption sur charbon actif, facile à réaliser au laboratoire, est plus compliquée à mettre en œuvre à très grande échelle dans des ouvrages robustes dans la durée. La **Figure 4** présente le procédé PulsazurTM. C'est un équipement qui fait plusieurs dizaines de mètres de haut et la subtilité du traitement est d'assurer une pulsation dans le lit de charbon pour éviter la formation de canaux préférentiels où l'eau passerait et ne serait plus en contact avec le charbon actif.

Le problème n'est pas très compliqué mais il faut le mettre en œuvre à très grande échelle, à des coûts acceptables et reproductibles quel que soit le niveau d'éducation des opérateurs qui vont l'utiliser.

5. Procédé thermo-catalytique : procédé catalysé, accéléré, par la température.

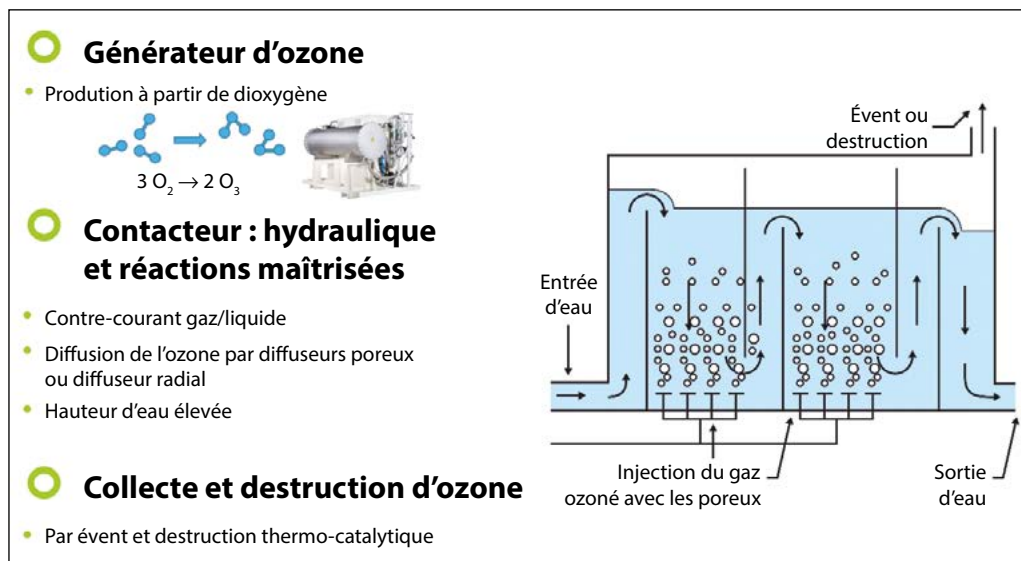


Figure 3

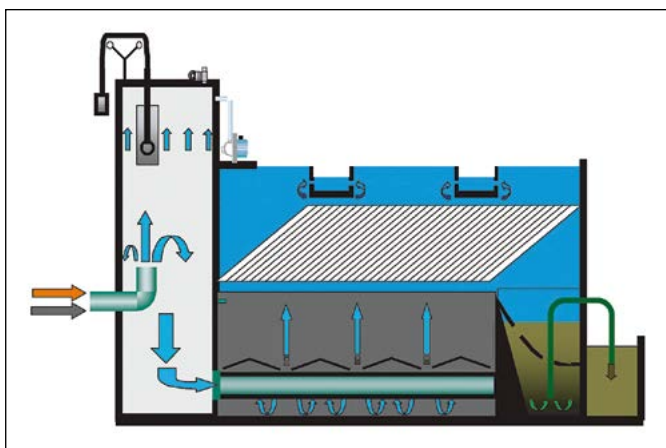
Installation d'ozonation.

Source : Degremont.

Figure 4

Le Pulsazur™ met en œuvre l'adsorption sur charbon actif en poudre dans un réacteur à lit de boues pulsé pour l'élimination des matières organiques dissoutes et des micropolluants.

Source : Degremont.



Le charbon actif en poudre est renouvelé en continu, la vitesse de l'eau au travers du lit est de 8 à 12 m/h. Il faut prévoir un système de collecte et d'évacuation des boues, un système de clarification de l'eau intégré et d'évacuation de l'eau traitée.

2.1.2. Les technologies membranaires

Parfois les technologies classiques ne suffisent pas et, selon la taille des polluants à retenir, on utilise diverses technologies membranaires

(Figure 5), qui sont des technologies plus nouvelles et aussi plus compactes, dans la mise au point desquelles la chimie a joué un rôle important.

Selon les cas, on utilise donc des membranes qui ont des perméabilités variables, qui peuvent retenir des objets de plus en plus petits, partant de très gros objets pour la filtration, qui seront des objets de l'ordre du micron (μm), pour aller jusqu'à la nanofiltration qui retiendra même quelques sels dissous, voire à l'osmose inverse, qui est une barrière absolue et élimine strictement tous les composés, ne laissant passer que les molécules d'eau pour produire effectivement de l'eau traitée.

L'installation de production d'eau de Saint-Cloud utilise

un procédé d'ultrafiltration à membranes spirales. Cette unité traite $100\,000\text{ m}^3$ d'eau par jour. Il faut que les membranes soient robustes et qu'elles puissent être nettoyées pour éviter le colmatage. Aujourd'hui, on sait fabriquer des systèmes qui ont des durées de vie de plusieurs années voire de plusieurs dizaines d'années.

La station d'ultrafiltration de Vigneux (Figure 6), dans le sud de la région parisienne, est une installation construite en unités modulaires.

Dans l'usine de traitement d'Hummelston (États-Unis), au lieu d'avoir de l'eau qui ressort de la membrane, c'est de l'eau qui entre dans des membranes immergées, fabriquées par General Electric (Figure 7).

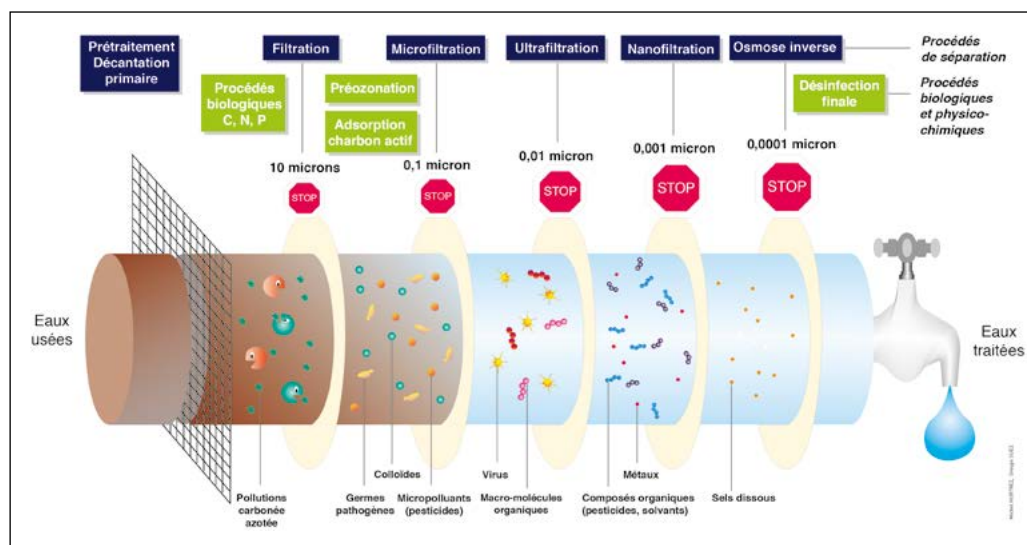


Figure 5

Les techniques membranaires de filtration varient selon la taille des polluants à éliminer.

Source : Michel Hurtrez, Groupe SUEZ.



Figure 6

La station de Vigneux utilise un système modulaire pour l'ultrafiltration afin d'obtenir des eaux clarifiées (55 000 m³/jour), avec 8 blocs de 28 modules de 64 m².

Source : usine de vigneux (©SUEZ Eau France SAS) ; bloc membranes (©SUEZ/Thierry Duvivier).



Figure 7

L'usine d'Hummelston (États-Unis) immerge les membranes dans l'eau pour le traitement (57 000 m³/jour), au lieu de faire passer l'eau à travers.

Source : removal©SUEZ.

2.1.3. Le dessalement de l'eau : des techniques au cœur de l'innovation

Le dessalement de l'eau est devenu une réalité industrielle : on passe du traitement par filtration à l'élimination de tous les sels de l'eau. D'énormes progrès ont été

réalisés ces dernières années. Aujourd'hui on ne doit pas être loin des 100 millions de m³ d'eau produite par jour par dessalement, par pratiquement 15 000 installations dans le monde dans 150 pays.

La **Figure 8** représente les unités de SUEZ dans le monde ;

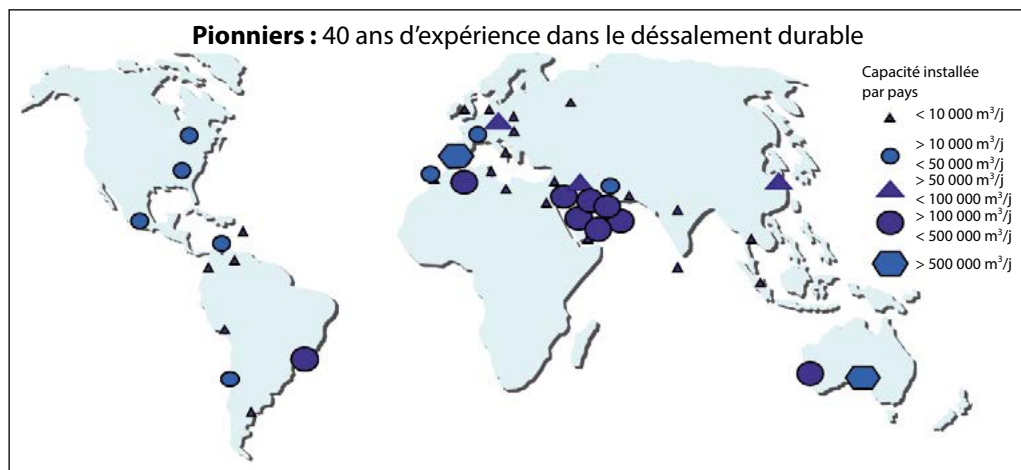


Figure 8

SUEZ est présent partout dans le monde, avec près de 15 000 installations, dont plus de 250 sont capables de fournir au total 3 700 000 m³/jour.

ce sont de grosses unités qui produisent déjà 4 millions de m³ d'eau dessalée par jour, dans 250 installations.

L'usine de dessalement de Melbourne en Australie (Figure 9) produit pratiquement 440 millions de litres d'eau dessalée par jour, ce qui correspond au pompage et au traitement de 1 million de m³ d'eau de mer par jour : 440 000 m³ d'eau potable sont injectés dans le réseau, et 560 000 m³ d'eau plus concentrés en sels sont rejetés à nouveau en mer. Cette très grosse usine est aussi très belle, localisée au bord de la plage et parfaitement intégrée dans le paysage grâce à un toit végétalisé (Figure 9A). Elle utilise les modules d'osmose inverse sous haute pression pour produire l'eau dessalée (Figure 9B). Bien entendu, quand tout a été éliminé, il faut réalimenter en sel cette eau dessalée pour assurer sa potabilité.

Le dessalement a la réputation d'être très coûteux en énergie, il faut en effet théoriquement environ 1 kW par m³ pour dessaler de l'eau de mer. Mais si on tient compte du fait que pour 1 m³ d'eau de mer traité, 50 % seront effectivement dessalés, mais que 50 % seront rejetés plus salés, cela correspond thermodynamiquement à un coût énergétique plus élevé de 1,56 kW par m³.

Aujourd'hui en fait, une unité d'osmose inverse consomme à peu près à 2 kW par m³ d'eau dessalée, donc presque la limite thermodynamique : le rendement énergétique du traitement de l'eau de mer ne peut donc pas être amélioré.

En fait, ce qui peut être amélioré est le problème de l'impact énergétique en termes de gaz à effet de serre. Dans cet objectif, SUEZ développe des usines de dessalement éco-énergétiques alimentés par des énergies renouvelables,



Figure 9

L'unité de dessalement de Melbourne (Australie) produit 450 000 m³ d'eau par jour.

A) Toit végétalisé couvrant l'installation. B) L'usine est située en bordure de plage. C) Modules de dessalement par osmose inverse.

Sources : A) Thiess/Degrémont ; C) SUEZ/Degrémont.

que ce soit à Melbourne avec des éoliennes ou à Masdar (**Encart : « SUEZ et la future ville de Masdar »**) avec de l'électricité photovoltaïque.

Cet effort est justifié car en fait il faut encore ajouter 2 kW par m³ d'eau dessalée pour le pompage et pour le rejet aux 2 kW mentionnés pour le

procédé d'osmose inverse, ce qui fait un bilan énergétique global de 4 kW/m³. Pour la production des centaines de millions de m³ d'eau dessalée par jour, cela représente beaucoup d'énergie consommée, donc un impact non négligeable en termes de gaz à effet de serre.

SUEZ ET LA FUTURE VILLE DE MASDAR (Abou Dhabi)

- 2014 : lancement d'une étude pilote pour choisir l'usine de production d'eau potable de la future cité verte de Masdar ;
- 2015 : inauguration du pilote éco-énergétique de SUEZ à Abou Dhabi (**Figure 10**) ;
- durée du test : 18 mois.

Caractéristiques

- Pilote de dessalement alimenté par des énergies renouvelables
 - Production 100 m³/jour
 - Technologies d'ultrafiltration et d'osmose inverse
 - Consommation électrique inférieure à 3,6 kWh/m³
 - Limite thermodynamique : 1,06 kWh/m³ et 1,56 kWh/m³ pour un taux de rejet de 50 %, proche des ~2 kWh/m³ d'une unité d'osmose inverse industrielle.
- Pompages, prétraitement, post-traitement et rejets.

Impact du dessalement sur les gaz à effet de serre : 1,6 kgCO₂/m³ !



Figure 10

Une unité de dessalement pilote fonctionnant à l'énergie photovoltaïque a été inaugurée en 2015 à Masdar.

Source : SUEZ.

2.1.4. La décarbonation de l'eau distribuée

La décarbonation⁶ centralisée de l'eau du robinet dans les régions où l'eau est dure peut être aussi une solution pour réduire l'impact car-

bone de la production d'eau. Une eau très dure entraîne par exemple des problèmes de canalisations, ou d'entartrage de ballons d'eau chaude (**Figure 11**), et tous ces inconvénients ont un coût chiffrable : environ 150 € par habitant en moyenne.

Distribuer une eau plus douce est technologiquement faisable soit par décantation à

6. Décarbonation : diminution de la quantité de carbonates de calcium (CaCO₃) dans l'eau (ici) par dissolution de CaO dans l'eau, avec dégagement de CO₂.

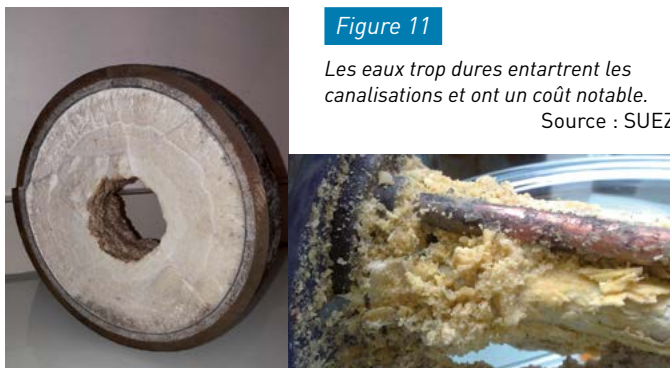


Figure 11

Les eaux trop dures entartrent les canalisations et ont un coût notable.

Source : SUEZ

la soude, soit par membrane de nanofiltration ou d'osmose inverse. Plutôt que d'utiliser des adoucisseurs d'eau chez soi, la décarbonatation pourrait être centralisée. Des villes commencent à s'y intéresser. Cela entraîne un léger renchérissement du prix de l'eau, parce qu'il faut bien payer l'équipement, mais le bénéfice est évident car à l'échelle nationale, cela représenterait pratiquement un million de tonnes de CO₂ économisées par an.

2.2. Des sites de production aux foyers : la distribution de l'eau par un réseau intelligent

L'eau produite est distribuée à travers un réseau de quelques milliers de kilomètres (Figure 12). Ces réseaux ont été installés il y a longtemps et ils étaient à l'origine assez peu instrumentés.

Aujourd'hui, ils deviennent beaucoup plus intelligents parce qu'on les équipe de multiples capteurs de données en

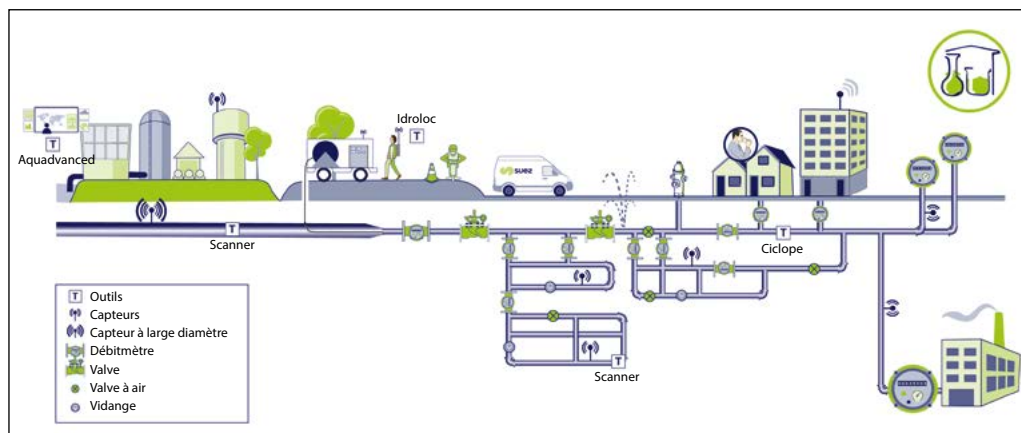


Figure 12

SUEZ a développé un réseau de distribution intelligent, avec des informations accessibles sans avoir à se rendre sur le site.

Source : Michel Hurtrez, Groupe SUEZ.

temps réel : de pression, de débit, de turbidité⁷, de sondes multi-paramètres (*Encart : « Des réseaux plus "intelligents" »*).

Ces capteurs communiquent en temps réel et doivent avoir une basse consommation énergétique car ils sont intégrés dans un réseau enterré, qui ne dispose pas forcément d'alimentation électrique. Les données collectées sont transmises à des opérateurs, qui doivent disposer de logiciels d'analyse des informations capables de décrire géographiquement le comportement du réseau et d'être des outils d'aide à la décision.

On peut ajouter à ces outils les compteurs dit intelligents, qui en fait n'ont rien d'intelligents, mais qui donnent une information permanente, et permettent de savoir s'il y a des pertes d'eau en ligne.

La *Figure 14* résume les différents types d'outils connectés développés pour aider à la décision et à la surveillance d'un réseau de 5 000 km. Les opérateurs qui les utilisent sont sur le réseau, dans la ville, et donc captent les informations sur les tablettes, les smartphones, etc., qui servent à leur donner un tableau de bord, que ce soit effectivement la détection des fuites ou tout autre problème qui peut se produire dans le réseau.

D'autres problèmes peuvent être liés à la détection de bactéries en temps réel dans l'eau (*Figure 15*). Dans certains États, les gens pensent à

DES RÉSEAUX PLUS « INTELLIGENTS » (*Figure 13*)

Des données en temps réel du réseau, des capteurs et des compteurs connectés :

Chaque jour...

Plus de capteurs, plus de compteurs sur le réseau.

Des nouveaux paramètres mesurés.

Un flux de données croissant.

...apportant plus de possibilités

Aide à la décision.

Surveillance du réseau.

Supervision optimisée (intelligence artificielle).

Prédiction et optimisation : énergie, consommation, production, renouvellement de l'eau dans la canalisation,...

Prévention : fuites, casses, gestion patrimoniale, risque terroriste.



Figure 13

Les capteurs installés sur les installations permettent l'accès à de nombreux indicateurs clés pour la gestion du réseau de distribution.

Source : SUEZ.

des risques terroristes, mais il peut heureusement s'agir simplement de ruptures de canalisations, de problèmes de contamination du réseau...

7. Turbidité : teneur d'un fluide en matières qui le troublent.

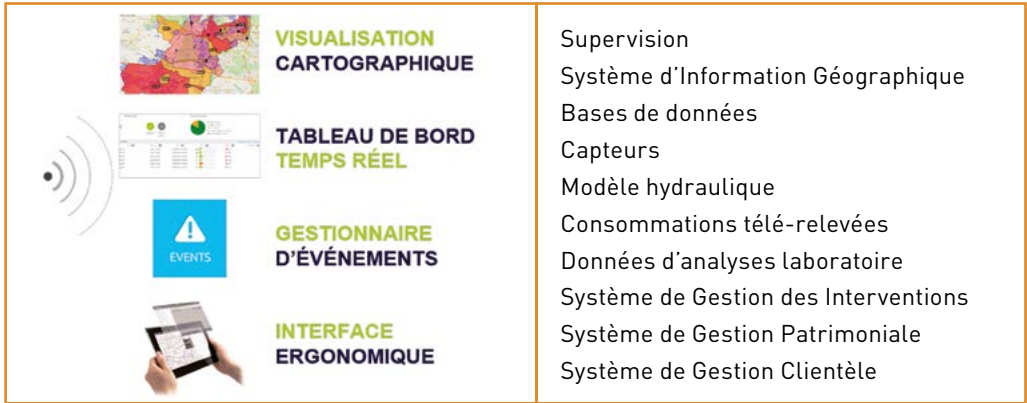


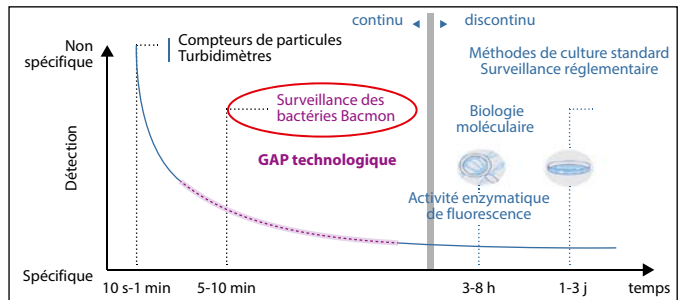
Figure 14

Des outils connectés ont été développés pour indiquer aux opérateurs où ils doivent se rendre pour identifier et résoudre les problèmes.

Source : SUEZ.

Figure 15

Les bactéries peuvent être détectées en temps réel en seulement quelques minutes.



La surveillance en temps réel des bactéries dans l'eau est un problème complexe résolu dans le cadre d'un partenariat, utilisant des technologies de microfluidique⁸, de microscopie 3D d'analyse d'images en temps réel (Figure 16). Cette surveillance permet, sans aller faire des analyses très complexes, d'avoir une vision de la qualité bactériologique de l'eau dans un point du réseau.

8. Microfluidique : science des écoulements dont la dimension caractéristique est de l'ordre du micromètre.

On commence à installer ces nouveaux types de capteurs, par exemple en région parisienne, dans les Hauts-de-Seine, pour monitorer en temps réel la qualité de l'eau du réseau, à terme jusqu'aux points de distribution.

Comme pour les autres capteurs, les millions de données annuellement obtenues doivent être collectées, centralisées, visualisées et analysées, puis traitées en temps réel par un nombre limité d'opérateurs, et donner de l'aide à la décision (Encart : « Un exemple de déploiement opérationnel »).

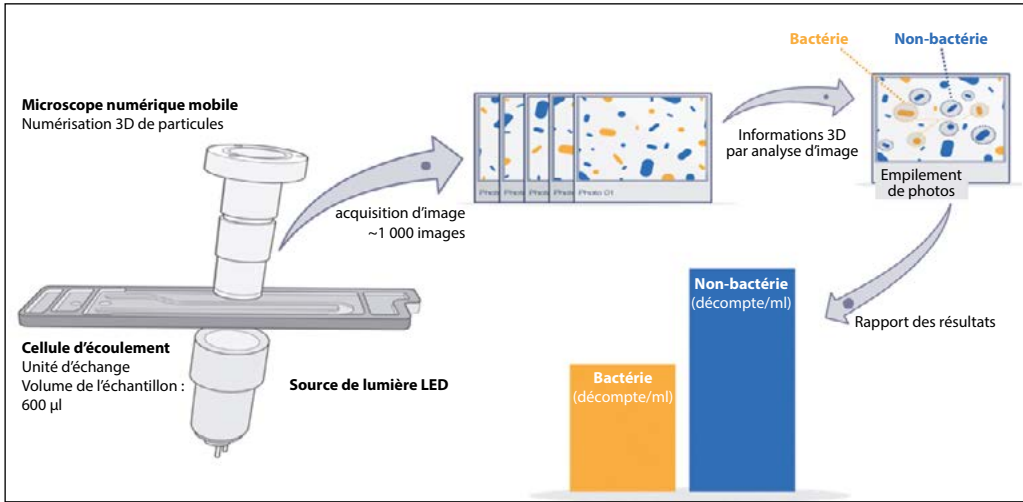


Figure 16

Ce type de système est installé dans le secteur de Versailles (Figure 18), pour 22 000 municipalités, 400 000 habitants, et

traite 24 millions de m³ d'eau par an. En deux ans d'utilisation, des économies ont été réalisées grâce à la détec-

Les analyses microscopiques d'images 3D donnent une vision de la population bactérienne dans le réseau.

UN EXEMPLE DE DÉPLOIEMENT OPÉRATIONNEL (Figure 17)

- 1 000 km de réseau de distribution
- 33 capteurs
- 7 paramètres
- Toutes les 5-15 min



- 37 millions données/an**
- Analyse des données
- Corrélation croisée
 - Alarmes
 - Qualité de l'eau KPI
 - Évènement détection
 - Placement optimal des capteurs
 - Visualisation sur une carte du réseau

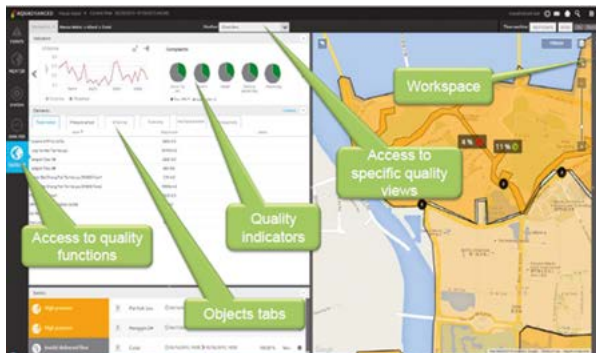


Figure 17

Exemple du département des Hauts-de-Seine : des capteurs installés sur le réseau envoient directement l'information aux stations.

Source : SUEZ.

Figure 18

En deux ans, 200 000 m³ d'eau ont été économisés dans le secteur de Versailles avec l'utilisation du système AQUADVANCED®.



tion préventive de fuites qui a permis de réparer le réseau aux bons endroits : dans ce réseau déjà de qualité, on a ainsi réussi à économiser 200 000 m³, ce qui correspond à la consommation d'une ville de 4 000 habitants. On voit que l'apport des technologies nouvelles, intégrées dans la gestion d'un métier ancien, permet de réaliser d'énormes progrès.

2.3. Les eaux usées et des eaux pluviales

La collecte des eaux usées et des eaux pluviales est un problème complexe traité en particulier en France dans des réseaux unitaires (Figure 19).

Le problème devient compliqué quand il pleut violemment et qu'il faut optimiser en temps réel la capacité de stockage du réseau, pour éviter les inonda-



Figure 19

Les eaux pluviales sont collectées sur le même réseau que les eaux usées. Elles sont d'abord stockées et peuvent être relarguées si besoin quelques heures après être entrées.

Source : SUEZ/Thomas Vieille.

tions. Il faut disposer d'outils modernes qui intègrent l'ensemble de l'information et qui permettent de gérer, voire de piloter, l'ensemble du réseau en temps réel (Figure 20), c'est-à-dire pomper, fermer des vannes, rediriger des flux d'eau.

Cela permet non seulement d'éviter les inondations, mais aussi les pollutions car environ 90 % des pollutions issues de la ville dans les milieux naturels se produisent à des épisodes pluvieux, qui envoient pendant les premières heures de pluie toute la pollution cumulée dans la ville pendant les épisodes secs. Au bout de 2h, on peut en général relarguer l'eau pluviale.

L'installation de ce type d'outil en région parisienne a permis d'économiser près de 400 millions d'euros d'investissement en ouvrages complémentaires de collecte d'eau. Bordeaux n'a maintenant plus d'inondations malgré récemment encore des pluies torrentielles. Le contrôle de la qualité écologique de l'eau dans le port de Marseille permettra bientôt de s'y baigner, et dans des conditions comparables à celle des calanques.

Ce même outil est en cours de mise en place à Singapour afin d'éviter des inondations dans certains endroits de la ville, en particulier Marina Bay.



Figure 20

AQUADVANCED® Assainissement est un logiciel de gestion et de pilotage d'un réseau de collecte (égouts, eaux pluviales) visant à optimiser les opérations de collecte et de gestion des eaux usées, optimiser les équipements existants, prévenir des débordements et des inondations et protéger le milieu naturel.

Source : SUEZ.

2.4. Le traitement des eaux usées

Pour contrôler la qualité des eaux usées, il faut les traiter. La technologie classique des boues activées⁹ (Figure 21) est une vieille technologie, qui a pour objectif d'éliminer le carbone, le phosphore et l'azote. Les boues issues de ce traitement sont récupérées pour en faire du biogaz, valorisé énergétiquement.

Ces unités classiques d'assainissement occupent des surfaces importantes et emploient un grand nombre de personnes (Encart : « L'usine d'assainissement de demain »). Ces stations d'épuration représentent des ressources

énergétiques potentielles, des ressources en micronutriments¹⁰, et même des ressources en eau. Conçues il y a vingt ou trente ans, en dehors de la ville, elles occupent de grandes surfaces (une trentaine d'hectares). De plus, la ville a grandi, et ces grandes surfaces sont maintenant en milieu urbain, ce qui représente un coût important. Cependant, reconstruire plus loin ce type de station coûterait aussi très cher. Il faut donc concevoir une rénovation de ces équipements sous forme de systèmes plus compacts et plus efficaces, peut-être les imaginer comme des raffineries des eaux usées conçues pour réutiliser l'eau,

9. Boues activées : procédé d'épuration pour le traitement des eaux usées. Il utilise l'épuration biologique (principalement bactériologique) pour traiter l'eau.

10. Micronutriment : anglicisme de micro-élément. Les micro-éléments du corps humain sont (entre autres) le brome, l'iode, le fer ou encore le zinc.

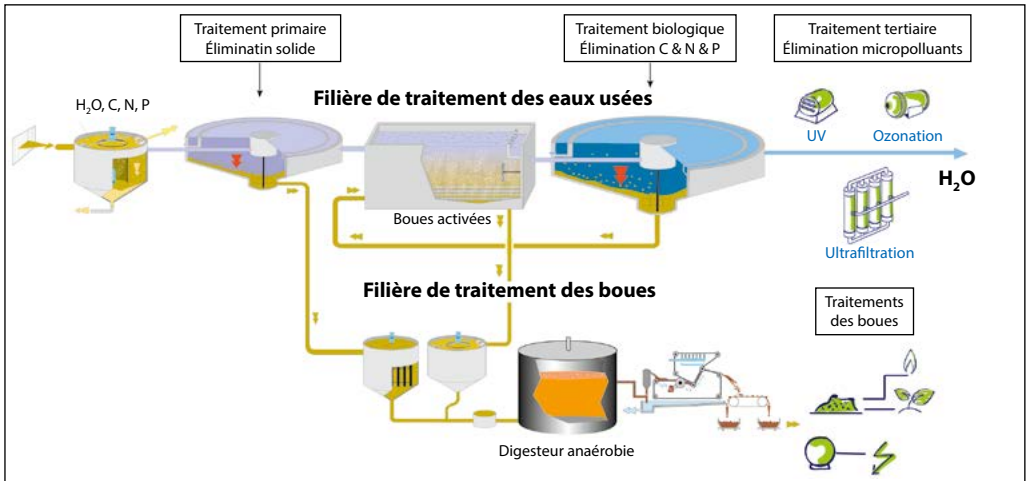


Figure 21

Les unités d'assainissement classiques traitent les eaux en trois temps : un premier traitement élimine les plus gros solides (1^{er} étage), un traitement biologique (boues activées) élimine le carbone, l'azote et le phosphore, puis un dernier traitement élimine les micropolluants (2^e étage).

Source : Michel Hurtrez, Groupe SUEZ.

L'USINE D'ASSAINISSEMENT DE DEMAIN CE QU'ELLE DEVRA TRAITER

- 1 million de personnes produisent chaque année :
- déchets organiques 100 000 t/a, dont un contenu minéral de 10 000 t/a ;
 - potentiel énergétique : 150 GWh/a ;
 - azote 5 500 t/a ; phosphore : 1 500 t/a ;
 - eau traitée : 55 000 000 m³/a ;
 - surface utilisée : 6 à 30 hectares.

pour mieux produire du biogaz et des nutriments (*Figure 22*). Les choix d'évolution doivent être économiquement efficaces et tenir compte des dépenses d'investissement (CAPEX) et d'exploitation (OPEX).

La *Figure 23* montre deux exemples de stations d'épuration, ayant à peu près les mêmes capacités de traitement, mais l'une, à la Farfana (*Figure 23A*) à Santiago de Chile, où il n'y a pas de contrainte

d'espace, utilise un procédé classique de traitement de boues activées ; elle occupe une surface de pratiquement 1 km². L'autre, en région parisienne (*Figure 23B*), où les contraintes d'espace sont importantes, utilise des procédés membranaires de traitement, des bio-filtrations. C'est un ensemble de traitements beaucoup plus compacts, plus capitalistiques en investissement, mais qui permet effectivement d'avoir la même efficacité.



Figure 22

Les unités de traitement des eaux usées se transforment en véritable raffinerie d'eaux usées.

Source : SUEZ/P. Coppé/CAPA Pictures.

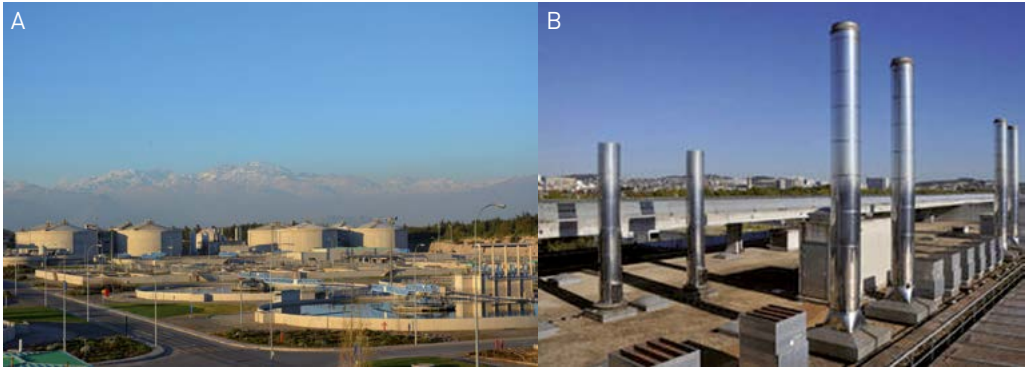


Figure 23

A) Le procédé classique de traitement des boues est mis en place à la Farfana (Santiago de Chile), où l'espace n'est pas restreint ; B) en région parisienne (Colombes), la technologie membranaire est mise en place pour réduire la surface de la station de traitement, à cause des contraintes d'espace.

Sources : A) Constance Covillard, SUEZ ; B) www.siaap.fr.

2.4.1. Les nouveaux traitements des eaux usées

Nouvelles approches utilisant de nouvelles bactéries

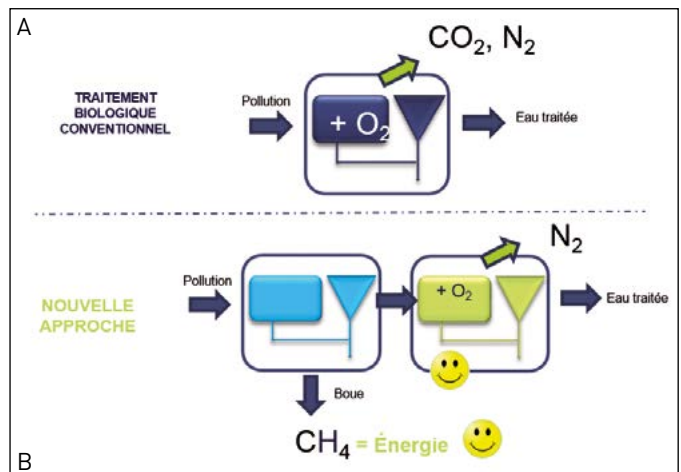
Dans le traitement classique des eaux usées, la fraction organique solide est récupérée et la fraction organique dissoute est oxydée, puis on élimine l'azote et le phosphore (Figure 24A). Mais si la dé-

gradation du carbone soluble en CO_2 est efficace du point de vue dépollution, c'est une perte en termes de ressource de biomasse.

Des nouveaux traitements (Figure 24B) sont en cours de développement dans lesquels on maximise la capture du carbone sous la forme de boues, avec cette fois l'objectif d'éviter

Figure 24

A) Les traitements biologiques conventionnels consomment O_2 et émettent N_2 et CO_2 ; B) dans la nouvelle approche, du méthane CH_4 serait émis ainsi que N_2 . Le méthane pourrait être valorisé par la production d'énergie.



la dégradation de la matière organique en CO_2 , pour l'utiliser comme matière première pour faire du biogaz. Ensuite, on éliminera les composés de l'azote et du phosphore.

Des nouvelles bactéries Anammox¹¹ (Figure 25) sont utilisées pour traiter les composés de l'azote, elles permettent de faire une dismutation¹² entre les deux états d'oxydation de l'azote, et de produire de l'azote N_2 à partir de NO_2 et NH_4 .

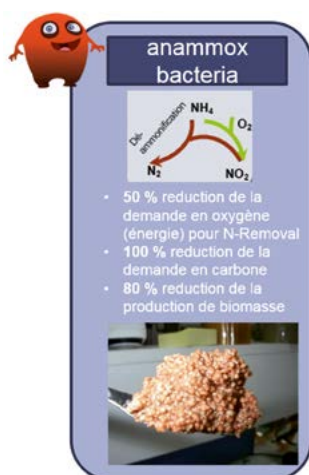


Figure 25

Les bactéries Anammox réduisent les demandes du traitement en oxygène, en carbone, ainsi que la production de biomasse.

Source : SUEZ.

2.4.2. Les micropolluants et leurs traitements

Les micropolluants produits dans notre activité au quotidien (Figure 26) sont une préoccupation grandissante, car ils ont un impact avéré sur le milieu naturel (sexe des poissons par exemple), et les effets potentiels sur la santé humaine (effets cocktail), ainsi que le lien de causalité, sont encore mal connus¹³. Les stations actuelles n'éliminent qu'une partie des micropolluants qui se retrouvent dans les boues d'épuration.

La station d'épuration de Sophia Antipolis (Figure 27) est la première station industrielle en France dédiée au traitement des micropol-

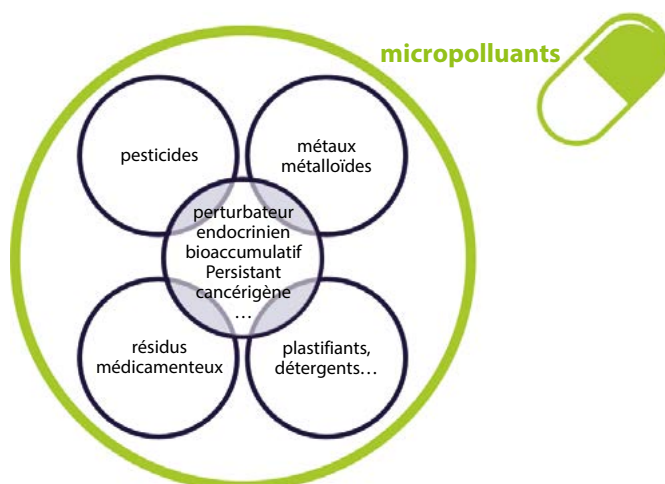


Figure 26

Les micropolluants ont diverses origines et ont des effets potentiels encore mal connus sur la santé humaine.

11. Anammox : abréviation pour « oxydation anaérobie de l'ammonium (NH_4^+) ». C'est une voie métabolique microbienne du cycle de l'azote, réalisée par des bactéries.
 12. Dismutation : réaction d'un même élément chimique présent sous deux états (ou degrés) d'oxydation différents.

13. Voir aussi *Chimie et expertise, santé et environnement*, Chapitres de J.-F. Lloret et P. Hubert, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2015.

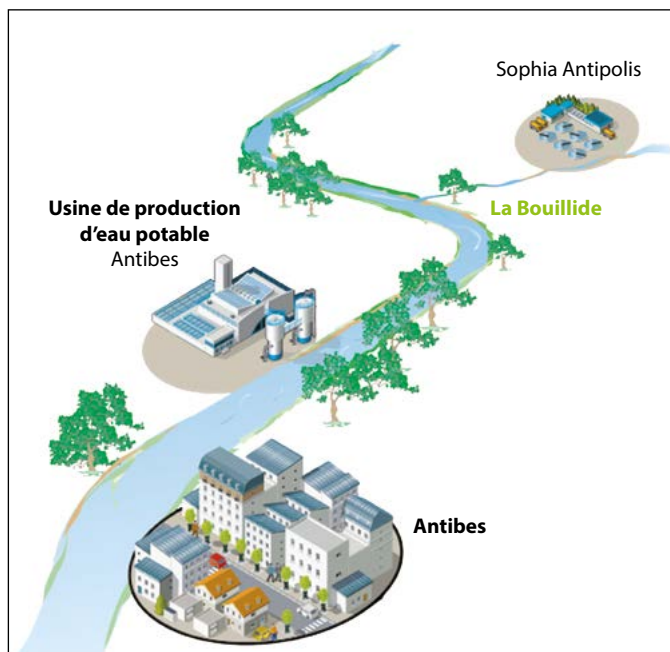
luants ; elle est située 20 km en amont de l'unité de production d'eau potable d'Antibes (50 000 équivalent habitants).

La Suisse, avec ses nombreux lacs qui sont des zones fermées, met en place ce type de solutions, c'est le cas dans la station de traitement des eaux

Figure 27

La station de Sophia Antipolis rejette ses eaux 20 km en amont de l'usine de production d'eau potable d'Antibes.

Source : Michel Hurtrez, Groupe SUEZ.



à Lausanne. Comme on peut le voir dans l'*Encart « Quelle stratégie de réduction des micropolluants ? »*, la réduction des micropolluants à la source est nécessaire mais pas suffisante. On le voit avec le cas

de l'atrazine, interdite d'utilisation depuis des années, que l'on retrouve en quantités importantes dans les eaux souterraines et les eaux de surface. Il faut donc absolument traiter ces micropolluants, que

QUELLE STRATÉGIE DE RÉDUCTION DES MICROPOLLUANTS ?

La réduction à la source, nécessaire mais pas suffisante ?

- 100 000 molécules chimiques répertoriées en Europe.
- des pollutions souvent diffuses (ex : les médicaments et hormones).
- l'inertie (ex : l'atrazine).

Pourquoi des traitements complémentaires sur les stations ?

- la STEP, point stratégique de collecte centralisé, et dernier point de passage avant le milieu naturel.
 - des technologies de traitement disponibles à coût raisonné (2 à 3 €/EH.an).
 - des bénéfices induits potentiels : reuse.
 - un impact favorable démontré sur la vie aquatique du milieu naturel → réduction de l'écotoxicité et élimination des effets perturbateurs endocriniens.
- pertinence d'une approche combinée « préventive » et « curative ».

ce soit dans les eaux usées ou les eaux de surface.

2.4.3. La méthanisation digestion

La méthanisation et la digestion (Figure 28) offrent la possibilité de valoriser les boues résiduelles du traitement des eaux.

La Figure 29 résume les différentes étapes de la production du biométhane sur les stations d'épuration et sa valorisation.

En France et à l'international, le groupe SUEZ est pionnier du développement du biométhane issu du traitement des eaux usées (Figure 30).

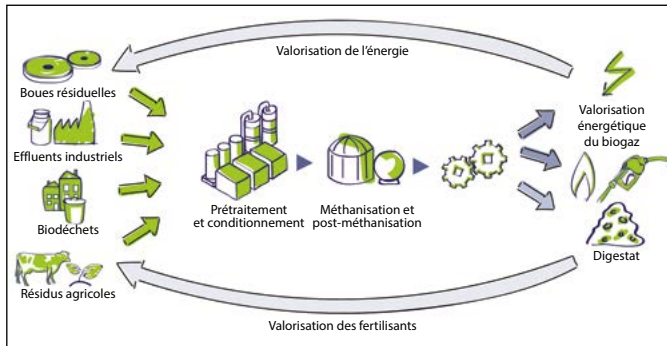


Figure 28

La méthanisation et la digestion offrent des possibilités pour valoriser les co-produits/déchets issus du traitement des eaux.

Source : Michel Hurtrez, Groupe SUEZ.

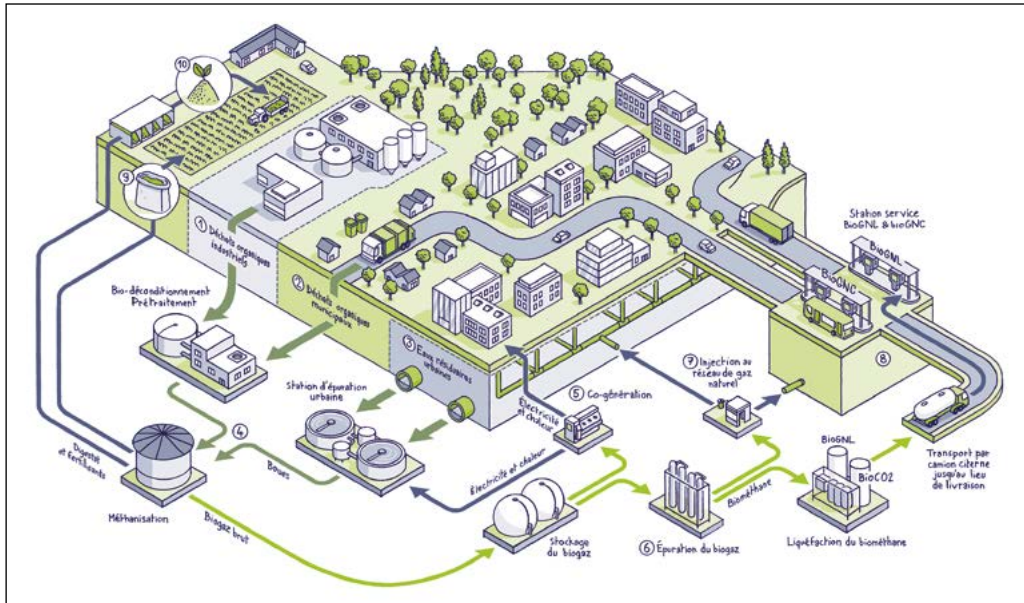


Figure 29

Une unité de production de biométhane, dans une station d'épuration qui traite les boues de 100 000 habitants, peut produire jusqu'à 3 GWh d'énergie, soit la consommation annuelle de 20 bus ou 100 véhicules légers.

Source : SUEZ/Jérôme Meyer-Bisch.



Figure 30

Exemples d'unités du groupe SUEZ de production de biométhane issu du traitement des eaux usées.

2.4.4. Les traitements biomimétiques

On peut aussi intégrer des technologies douces dans le traitement des eaux, et utiliser les eaux humides pour finir, polir le traitement, et faire une sorte d'interface avec le milieu naturel (Figure 31).

Les Zones humides¹⁴ naturelles ou les zones de service écosystémiques sont le siège

14. Pour en savoir plus, voir *La chimie et la nature*, chapitre d'É. Blin, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2012.

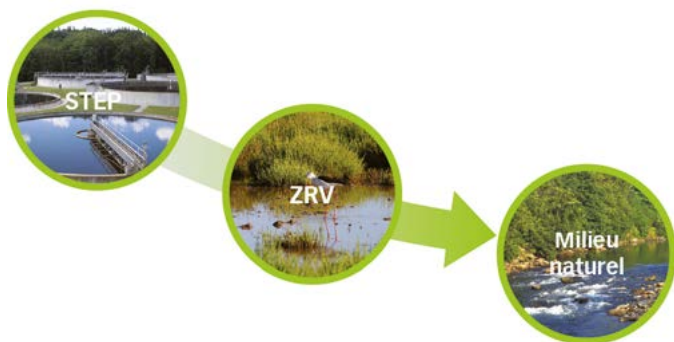


Figure 31

La Zone humide est une interface entre le traitement des eaux et le milieu naturel.

Source : Michel Hurtrez, Groupe SUEZ.

de processus physiques, chimiques et biologiques, qui permettent la régulation hydraulique, la sédimentation, la filtration mécanique, la transformation de la matière, et par conséquent un affinage de l'épuration de l'eau. De plus, elles rendent de nombreux services aux populations comme espace de loisir et de pédagogie, patrimoine naturel ou aménagement paysager.

2.4.5. Eaux usées : de nouvelles ressources en eau ?

Dans des zones de stress hydrique, les eaux usées peuvent devenir une nouvelle ressource en eau (Figure 32) quand elles ont été purifiées au maximum.

Aujourd'hui à Singapour, 30 % de l'eau usée sert à refaire de l'eau potable. Dans le sud de Los Angeles, une unité de SUEZ réutilise depuis dix ans les eaux usées pour en faire de l'eau agricole, de l'arrosage et des eaux industrielles (Figure 33).

2.4.6. Les nouvelles technologies

Aujourd'hui, toutes les technologies de microbiologie

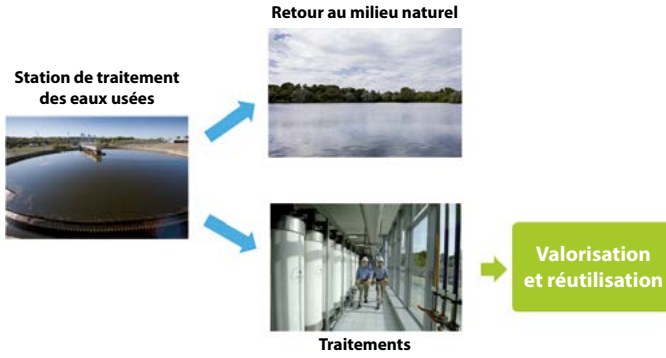


Figure 32

Les eaux issues des stations de traitement d'eaux usées peuvent être rejetées dans le milieu naturel, ou traitées une nouvelle fois pour être valorisées et réutilisées.

Sources : A) décantation : SUEZ/ ABACA PRESS/Laurent PASCAL ; B) milieu naturel : SUEZ/ William DANIELS ; C) traitement supplémentaire : SUEZ/Thierry Duvivier/Trilogi'c.

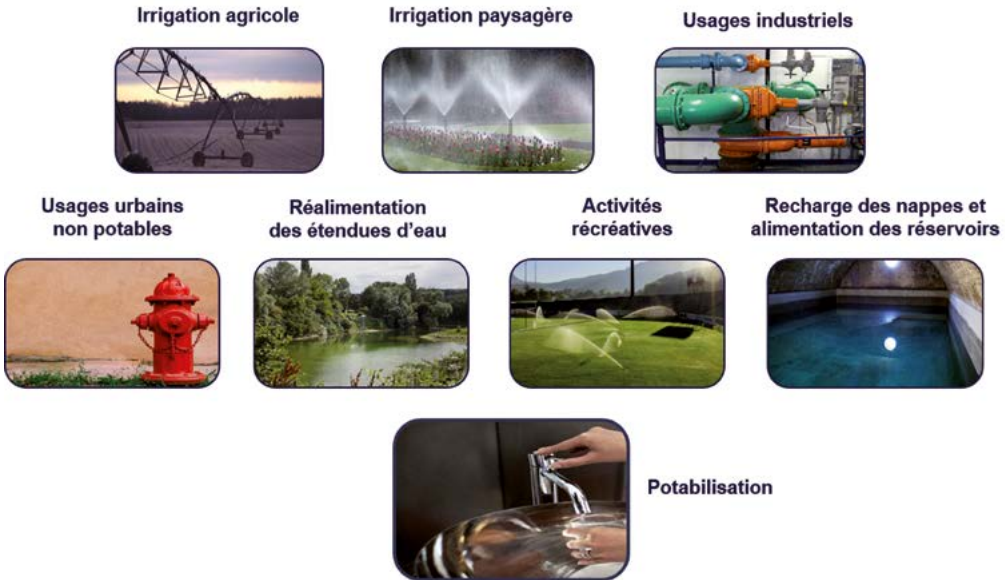


Figure 33

Ces eaux retraitées servent pour des usages industriels, agricoles, de type loisir, jusqu'à la potabilisation.

Sources : réalimentation : SUEZ/William DANIELS ; recharge : SUEZ/William DANIELS ; potabilisation : SUEZ / William DANIELS.

avancée permettent de mieux comprendre ce qui se passe dans l'ensemble de ces procédés, qui étaient un peu des boîtes noires (Figure 34).

Les progrès de la biologie moléculaire permettent de comprendre ce qui se passe dans

les digesteurs, et de développer des solutions beaucoup plus efficaces de traitement de l'eau, grâce à des communautés bactériennes adaptées (Figure 35).

Dans ce métier de traitement de l'eau, qui paraît ancien,

Figure 34

Les avancées en microbiologie permettent de mieux comprendre les procédés utilisés et de les optimiser.

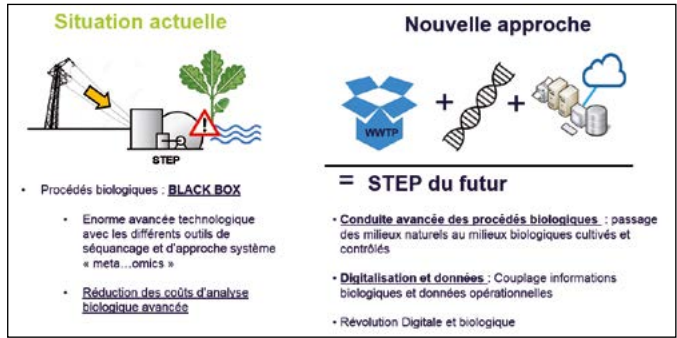
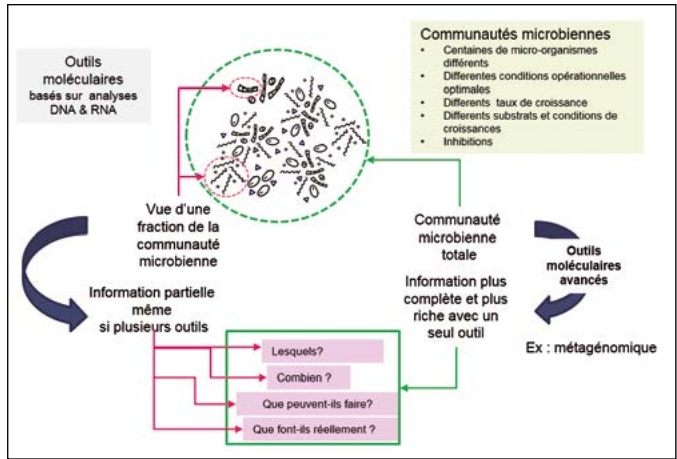


Figure 35

La connaissance des bactéries permet d'en optimiser l'utilisation.



l'utilisation conjointe des technologies de l'information, des technologies de microbiologie avancée, le génie chimique et la chimie permettent de mieux résoudre les nouveaux problèmes de l'eau dans la ville.

Le traitement des eaux, avenir pour la ville

L'eau dans la ville, c'est à la fois une photo de Paris sous les inondations (Figure 36A), ou des images de loisirs (Figure 36B). Si on n'apporte pas l'eau dans la ville, on n'a plus de ville : l'eau est indispensable à la vie, mais c'est aussi indispensable à la ville.

Il faudra de plus en plus prendre en compte : la protection des milieux naturels, la croissance



Figure 36

A) La ville de Paris a connu des inondations ; B) l'eau traitée sert largement pour le loisir de tous.

démographique, l'urbanisation et le développement des mégalo-poles, et cela dans le cadre d'une raréfaction des ressources, du changement climatique et d'une population de plus en plus connectée.

On peut donc prévoir

- une augmentation de la demande pour une gestion contrôlée du cycle de l'eau ;
- le besoin d'accès à de nouvelles ressources et à une gestion optimisée.
- l'émergence d'une économie circulaire et le développement du recyclage.

