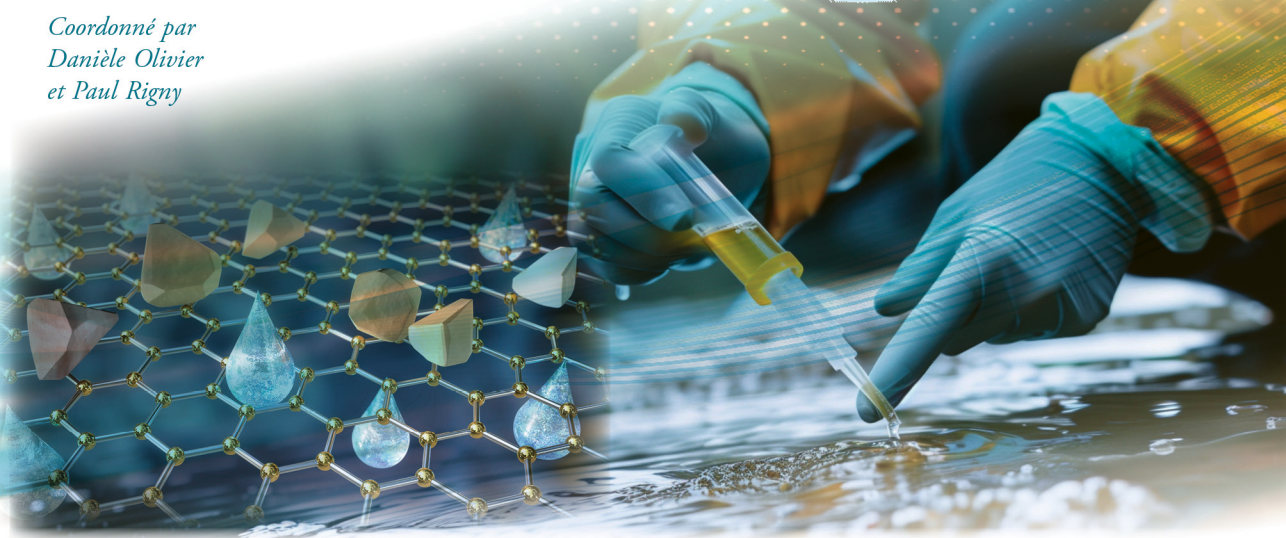




Chimie et eau

Marie-Hélène Aubert
Patrick Cleret
Bertrand Decharme
Tom Ducrocq
Alain Dupuy
Agathe Euzen
Andrea Flossmann
Fabrice Leteneur
Cécile Miège
Jérôme Montagnier
Laurent Moulin
Christelle Pagotto
Christophe Poinssot
Patrick Renck
Thomas Thiebault
Jean-Baptiste Thubert

*Coordonné par
Danièle Olivier
et Paul Rigny*



Chimie et eau

L'eau n'est pas un élément simple et sans histoire. Elle est indispensable tant au simple citoyen qu'aux agriculteurs et aux industriels, en particulier aux industriels chimistes, qui en sont gros consommateurs. Mais aujourd'hui, on peut craindre qu'elle devienne difficile à exploiter en quantité suffisante. En effet, les incroyables changements de la

démographie – population multipliée par cinq depuis 1910 – et le changement climatique modifient la situation.

Tous les milieux politiques, administratifs, scientifiques et industriels se mobilisent pour éviter les catastrophes sanitaires et économiques qui en résulteraient.

Cet ouvrage explique les mobilisations, études et efforts de grande ampleur actuellement déployés pour préserver la disponibilité de l'eau et les pratiques agricoles et industrielles dont la vie a besoin. Des exposés très éclairants sur les mesures prises par tous les acteurs au niveau local, comme européen ou planétaire, sont présentés. Les questions de pollutions (par exemple par les microplastiques) et de santé sont expliquées par des spécialistes de haut niveau.

Dans tous les domaines, on sera frappé des efforts déployés pour l'adaptation à la situation nouvelle : changements mis en œuvre dans les pratiques scientifiques (modélisation numérique ou analyse) et techniques (invention de nouveaux procédés industriels).

On aborde également l'organisation de ces études au niveau international par la création d'un programme « OneWater » ou par l'ONU dans le cadre du Développement Durable.



ISBN : 978-2-7598-3810-3

edp sciences

www.edpsciences.org

Chimie et eau



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et eau »
qui s'est déroulé le 6 novembre 2024 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Philippe Gœbel

Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Chimie et eau

Marie-Hélène Aubert, Patrick Cleret, Bertrand Decharme, Tom Ducrocq,
Alain Dupuy, Agathe Euzen, Andrea Flossmann, Fabrice Leteneur, Cécile Miège,
Jérôme Montagnier, Laurent Moulin, Christelle Pagotto, Christophe Poinssot,
Patrick Renck, Thomas Thiebault, Jean-Baptiste Thubert

Coordonné par Danièle Olivier et Paul Rigny

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
EDP Sciences

Crédits couverture :

Images : Adobe Stock – © Kateryna Kordubailo – © Naknakhone
– © Chinnapong – © Dr_Microbe – © TensorSpark – © MdBak

Mise en pages et couverture : Christine Porchat
Conception graphique, visuel du colloque : CB Defretin

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3810-3

ISBN (ebook) : 978-2-7598-3811-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© 2025 – Fondation de la Maison de la Chimie

Fondation de la Maison de la Chimie
28, rue Saint-Dominique
75007 Paris, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Marie-Hélène Aubert

*Inspectrice générale
honoraire de l'administration
de l'environnement et
du développement durable,
ancienne parlementaire*

Patrick Cleret

*Directeur des affaires
techniques de France Chimie*

Bertrand Decharme

*Directeur de recherche
CNRS au Centre national
de recherches météorologiques
(CNRM, Université de
Toulouse, Météo-France, CNRS
UMR 3589)*

Tom Ducrocq

*Docteur en chimie
environnementale, INRAE,
UR RiverLy*

Alain Dupuy

*Directeur de Programme
« Gestion des eaux
souterraines » au BRGM,
codirecteur du Programme
de recherche « OneWater – Eau
bien commun » – CNRS, BRGM,
INRAE*

Agathe Euzen

*Directrice de recherche
CNRS au LATTs, directrice
adjoite de CNRS Écologie
& Environnement, codirectrice
du Programme national
« OneWater – Eau bien
commun » (CNRS, BRGM,
INRAE)*

Andrea Flossmann

*Professeur émérite
à l'Université Clermont
Auvergne*

Fabrice Leteneur

*Président du Syprodeau
et président de néEAU*

Cécile Miège

*Directrice de recherche
en chimie environnementale
INRAE, UR RiverLy*

Jérôme Montagnier

*Directeur général de
DR KUEKE France*

Laurent Moulin

*Responsable du département
Recherche et Développement
à Eau de Paris*

Christelle Pagotto

*Chef de projet « Qualité
assainissement » – Direction
technique Veolia Eau France*

Christophe Poinssot

*Directeur général délégué
du BRGM*

Patrick Renck

*Responsable Environnement
Alsachimie*

Thomas Thiebault

*Géochimiste, maître
de conférences à l'École
pratique des hautes études-
Paris Sciences & Lettres
à Paris, membre de l'UMR
METIS*

Jean-Baptiste Thubert

*Directeur Technique
et Innovation Veolia Water
Technologies*

Équipe éditoriale :

*Danièle Olivier
et Paul Rigny*

Sommaire

Avant-propos, par Paul RIGNY	9
Préface, par Danièle OLIVIER	13

Partie 1 : Les ressources en eau

Chapitre 1 : L'eau, enjeu vital : ressources et tensions d'après la conférence de Marie-Hélène AUBERT	17
---	----

Chapitre 2 : Le cycle continental de l'eau et la ressource mondiale associée : évolution récente et projections futures d'après la conférence de Bertrand DECHARME	33
---	----

Chapitre 3 : L'eau, un bien commun : enjeux et perspectives d'après la conférence d'Agathe EUZEN	51
--	----

Partie 2 : Eau et innovation

Chapitre 4 : Les micropolluants organiques : méthodologies innovantes pour mieux les explorer dans les rejets et les milieux aquatiques par Cécile MIÈGE et Tom DUCROCQ	67
--	----

Chapitre 5 : Traitement des contaminants dans les usines de potabilisation d'après la conférence de Laurent MOULIN	85
--	----

Chapitre 6 : Les techniques analytiques pour évaluer la santé des populations par les eaux usées par Thomas THIEBAULT	99
--	----

Chapitre 7 : Chimie et eaux souterraines d'après la conférence d'Alain DUPUY et de Christophe POINSSOT	117
---	-----

Chapitre 8 : L'ensemencement des nuages : progrès et limites par Andrea FLOSSMANN	131
--	-----

Partie 3 : Préserver la ressource : eaux potables et industrielles

Chapitre 9 : Osmose inverse, de la fabrication des membranes à l'exploitation des méga-usines d'après la conférence de Jean-Baptiste THUBERT	143
---	-----

Chapitre 10 : Des stations d'épuration encore plus performantes pour réutiliser les eaux par Christelle PAGOTTO	155
--	-----

Chapitre 11 : Préserver la ressource en eau – Exemple de la chimie d'après la conférence de Patrick CLERET	171
---	-----

Chapitre 12 : Actions concrètes de réduction des prélèvements d'eau industriels d'après la conférence de Patrick RENCK	177
---	-----

Chapitre 13 : Réutilisation des eaux industrielles dans l'industrie agroalimentaire par Fabrice LETENEUR et Jérôme MONTAGNIER	183
--	-----

Avant-propos

Les colloques «Chimie et...» et les ouvrages qui en sont issus traitent de situations qui présentent des enjeux critiques, économiques ou sociétaux, pour lesquels la recherche scientifique et le milieu industriel sont appelés à se mobiliser. Alors, consacrer l'un des colloques de la Fondation de la Maison de la Chimie au thème «Chimie et Eau», voilà qui peut paraître singulier. L'eau est en effet tellement omniprésente dans nos vies ! N'est-elle pas évidente, indispensable et disponible à la demande ? Les dernières décennies ont montré que cette idée banale est devenue tout à fait fausse : l'eau est bien indispensable, mais elle est tout sauf disponible «à la demande». Bien au contraire, elle est devenue typiquement un «enjeu critique» et sa gestion réclame efforts et soins de tous, du milieu technique au milieu politique ; sinon, c'est la vie même sur Terre qui est menacée.

Dès le ^{xx}e siècle, le statut de l'eau a été placé au premier plan des décisions administratives qui ont imposé une gestion rigoureuse dans de nombreux pays, et progressivement dans une majorité

des pays de la planète. C'est une loi sur l'eau, en 1964, qui a marqué l'engagement de l'État en France vers une gestion nationale (les Agences de l'eau), puis bientôt une autre loi qui l'a déclarée «patrimoine commun». Finalement, ce sont tous les pays qui ont placé l'eau au centre des questions d'environnement, au sens large, auxquelles l'humanité entière est confrontée.

Quelques observations simples illustrent les causes de ces changements de statut :

- La spectaculaire évolution démographique (multiplication de la population mondiale par 5 depuis 1910) fait que les besoins en eau ont considérablement augmenté et que la ressource elle-même de ce précieux élément n'apparaît plus comme illimitée.
- Le changement climatique, avéré depuis le début du siècle, bouleverse l'hydrologie (précipitations, fusion des glaces, tempêtes). Il entraîne catastrophes, épidémies, disettes... qui font maintenant les nouvelles des quotidiens. Les prévisions, malheureusement, ne vont pas dans le bon sens, il faut les faire mentir.

De nombreux laboratoires étudient les phénomènes multiples et interconnectés qui décrivent les flux, les stockages de l'eau dans tous les milieux géologiques. Les couches sous-terraines (aquifères et couches profondes) et les flux d'eau douce sont observés minutieusement et modélisés. Un objectif extrêmement ambitieux est de savoir établir et valider les scénarios permettant, en termes de charge ou de décharge des ressources en eau, de prévoir les évolutions dans les années à venir. Ces travaux qui sollicitent les moyens et méthodes les plus sophistiqués d'aujourd'hui sont présentés et explicités dans cet ouvrage.

Parallèlement, il s'agit de définir des mesures concrètes aussi efficaces que possible pour éviter, ralentir ou contrôler les dommages dus aux changements de l'économie de l'eau. Depuis le début du ^{xx}e siècle, les industries ont réalisé l'importance des évolutions en cours ou prévisibles du cycle de l'eau. Elles définissent et mettent en œuvre des modifications des procédés industriels limitant la consommation de l'eau. L'industrie chimique, la branche industrielle la plus impliquée sous ce rapport, est pionnière et déjà en possession de nombreux exemples de succès en la matière, dont certains sont présentés ici. Ces travaux, sur les plans scientifique et industriel (les actions de France Chimie), sont étroitement coordonnés d'abord au niveau national dans le cadre du programme « OneWater – Eau, bien commun » puis à l'échelle européenne et, sous l'égide de

l'ONU, au niveau mondial. Les acteurs responsables de ces programmes expliquent leurs résultats et leurs efforts dans le présent ouvrage.

Parmi les dommages liés aux perturbations en cours du cycle de l'eau, il est clair qu'il ne faut pas oublier de mettre les questions de santé au premier plan. Elles ne sont pas seulement importantes dans les pays tropicaux ou en difficulté de financer les efforts d'infrastructure qui s'imposent. Elles concernent aussi toutes les populations humaines par le biais des épidémies dont la propagation pose toujours beaucoup d'énigmes aux spécialistes de la santé. Le contrôle de la pollution des eaux est rendu plus critique dans une société où la consommation de masse de grands volumes de marchandises (métaux lourds ou matières plastiques, par exemple) soulève de graves problèmes. Ainsi, les récentes communications sur la pollution par les microplastiques ont alerté tous nos compatriotes sur des problèmes encore récemment passés sous silence. L'ouvrage *Chimie, recyclage et économie circulaire*, publié dans notre collection « Chimie et... » au début de l'année 2025, donnait déjà un éclairage sur ces importants objectifs sous leur aspect de gestion des ressources économiques.

Il n'est pas nécessaire, ni même approprié, de feindre, de sous-estimer l'acuité des questions abordées dans cet ouvrage. Oui, l'eau est une substance vitale dont on ne peut minimiser l'importance.

Sans elle s'effondre non seulement l'économie, mais tout aussi bien la vie elle-même – les superlatifs ne sont pas ici hors de propos. La science et la technologie étonnent toujours par leur puissance, elles semblent capables d'apporter des réponses à toutes les questions et tous les besoins... Mais, en l'occurrence, rien ne sera acquis sans des efforts considérables de toutes les communautés scientifiques et

industrielles et de leurs autorités politiques. Il y a urgence !

Pour étendre l'impact des avertissements éthiques présenté par le présent ouvrage, n'hésitons pas à répéter que son contenu est intégralement diffusé sur le site «mediachimie.org».

Paul Rigny

*Conseiller du président
de la Fondation de la Maison
de la Chimie*

Préface

L'eau est indispensable à la vie et au développement socioéconomique. C'est une ressource vitale qu'il faut protéger, pour le développement humain, pour la régulation du climat et l'équilibre des écosystèmes. De nouveaux défis sont apparus, d'origine anthropologique et climatique : pour prévenir et nous protéger, il faut comprendre afin de pouvoir agir.

La première partie de cet ouvrage a pour objectif la présentation de ces défis au niveau national et mondial.

Marie-Hélène Aubert illustre par des exemples pourquoi l'eau est le 6^e Objectif de développement durable de l'Agenda 2030 adopté par l'Assemblée générale des Nations Unies dès 2015 et présente la place importante de l'eau dans le rapport de mars 2024 des Nations Unies pour la prospérité et la paix.

Bertrand Decharme, à travers la présentation du « cycle continental de l'eau et de la ressource mondiale qui y est associée », montre l'importance et la diversité des sujets à comprendre et des défis qui y sont associés : comment prévoir l'évolution du cycle et les

conséquences sur le stockage et le transfert de l'eau entre les océans, l'atmosphère et les surfaces continentales compte tenu des éléments perturbateurs que sont le changement climatique et les activités humaines ?

Agathe Euzen, codirectrice du programme national commun « OneWater », qui associe les laboratoires de trois grands organismes de recherche (le CNRS, le BRGM et l'INRAE), présente les défis scientifiques de ce programme qui souhaite lever les verrous de connaissance, mais aussi d'en assurer le transfert *via* les acteurs de l'eau sur le territoire français, métropolitain et ultramarin.

La deuxième partie est plus spécifiquement dédiée à la recherche et à l'innovation.

Les micropolluants organiques toxiques à des concentrations très faibles dans les rejets et les milieux aquatiques ont fait la une de l'actualité dans les médias. Ils sont difficiles à analyser et à étudier car le défi est de pouvoir les piéger.

Cécile Miège présente les résultats de la recherche dans ce domaine.

Laurent Moulin expose, sur l'exemple Eau de Paris, les avancées technologiques dans le domaine des analyses, et l'apport de la biologie moléculaire pour répondre aux nouvelles préoccupations : la surveillance des pollutions virales, l'élimination des contaminants chimiques et microbiologiques, pour garantir la sécurité sanitaire.

Thomas Thiebault montre qu'il est possible d'évaluer l'état de santé des populations à partir des analyses des eaux usées. Ces méthodes initiées pour le suivi des substances illicites se sont développées au moment du Covid pour permettre une veille épidémique. Mais les eaux usées sont une matrice complexe et les progrès à réaliser sont présentés.

La majeure partie des réserves en eaux douces utilisables sont enfouies dans les formations géologiques du sous-sol : les eaux souterraines. La chimie des eaux souterraines est devenue un programme de recherche fondamental pour le BRGM. Une synthèse des connaissances acquises est présentée par **Alain Dupuy**, directeur de la Gestion des eaux souterraines.

Les risques de pénurie d'eau sont devenus des enjeux majeurs pour les populations et les gouvernements. Modifier le temps devient un enjeu politique et économique. **Andrea Flossman** présente les différentes méthodes d'ensemencement des nuages, ainsi que les limites et les risques qui y sont liés.

La troisième partie est dédiée à l'aspect industriel de la

préservation des ressources en eau potable.

Jean-Baptiste Thubert, pour Veolia, explique comment l'élargissement des nouvelles techniques d'osmose inverse, initialement utilisées pour le dessalement de l'eau de mer, appliquées au traitement des eaux usées, permet la production d'eau ultra-pure.

Christelle Pagotto expose les nouveaux procédés mis au point par Veolia pour recycler les **eaux usées industrielles dans des usages spécifiques.**

Patrick Cleret et **Patrick Renck** montrent, à partir d'exemples, les engagements et les efforts des industriels de la chimie pour réduire leurs prélèvements en eau.

Un exemple concret de réutilisation d'eaux industrielles dans l'industrie laitière est présenté par **Fabrice Leteneur** et **Jérôme Montagnier**.

Plus de 1 000 personnes ont suivi le colloque à l'origine de cet ouvrage, dont 700 lycéens accompagnés de leurs enseignants, ce qui traduit l'intérêt du monde éducatif pour ce thème. La fête de la Science d'octobre 2025 était sur le thème « Océan de savoir » et nous avons accompagné cette fête en proposant dans une page « **Eau et chimie** » de notre médiathèque media-chimie.org une sélection de ressources en relation avec cette thématique.

Je vous souhaite une très bonne lecture.

Danièle OLIVIER

Vice-présidente de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Partie 1

Les ressources en eau

L'eau, enjeu vital : ressources et tensions

D'après la conférence de Marie-Hélène Aubert, inspectrice générale honoraire de l'administration de l'environnement et du développement durable. Ancienne parlementaire, elle a été vice-présidente de l'Assemblée nationale de 2001 à 2002, députée européenne de 2004 à 2009, puis conseillère auprès du président de la République de 2012 à 2016, chargée des négociations internationales sur l'environnement et le climat.

1 Introduction

1.1. Le cycle naturel de l'eau et les usages

L'eau est un enjeu absolument vital au sens propre du terme, c'est-à-dire que, sans eau, il n'y a pas de vie : il n'y a pas d'êtres vivants, il n'y a pas d'êtres humains et il n'y a aucune activité humaine possible. Cela semble être une évidence, mais dans le monde dans lequel nous vivons, ou en

tout cas dans les pays développés, nous avons l'impression que tourner le robinet et avoir l'eau courante est quelque chose de tout à fait naturel, alors que c'est totalement faux.

En amont, il y a en fait toute une infrastructure, tout un travail qui est fait, où la chimie entre en ligne de compte pour vous fournir de l'eau, *a fortiori* potable, et pour assainir les eaux usées qui sont rejetées dans les canalisations à cet

effet. Ce grand cycle de l'eau est décrit sur la **figure 1** :

Il concerne tout le cheminement, toujours mouvant, entre l'océan, l'atmosphère et le continent. Prenons les exemples récents des pluies torrentielles qui se sont produites dans la région Rhône-Alpes, en Ardèche, et en Espagne. Il n'y a pas eu plus de pluie : c'est en fait l'élévation de la température des océans qui a produit plus d'eau dans l'atmosphère, ce qui se traduit ensuite en précipitations torrentielles sur le continent.

Les ressources en eau sont une ressource globale finie : c'est un flux, un stock, qui se renouvelle en permanence et qui passe de l'état solide à l'état liquide, puis à l'état gazeux sous forme de vapeur d'eau. Il faut bien comprendre que ces ressources sont finies

et que leur importance est vitale pour nous. Nous sommes nous-mêmes constitués d'eau : un être humain adulte est constitué de 65 à 70 % d'eau. L'eau salée est aussi importante puisque la vie vient en grande partie de l'océan. Il ne faut jamais oublier que tous les mésusages qu'on peut faire de l'eau, toutes les atteintes que l'on peut porter à l'eau nous atteignent dans notre existence même.

1.2. Le petit cycle de l'eau

Ce dont on ne parle peut-être pas assez, c'est du **petit cycle de l'eau** à partir de la station de pompage. On pompe de l'eau dans les nappes souterraines et dans les rivières, puis on la traite pour la rendre potable et elle est acheminée par des canalisations à tous ceux qui



Figure 1

Description du grand cycle de l'eau.

en ont besoin. Ensuite, les eaux dites « usées » sont rejetées aussi dans des infrastructures et aboutissent à une station d'épuration des eaux usées. (Voir le chapitre de Laurent Moulin pour Eau de Paris dans cet ouvrage.)

Il est très intéressant et riche d'enseignements de visiter les stations d'épuration et de traitement qui desservent nos territoires ou nos communes.

Ensuite, après la station d'épuration, le flux retourne dans le milieu naturel plus ou moins bien épuré et toutes sortes de questions se posent à ce niveau.

1.3. Impact du changement climatique

Aujourd'hui, avec l'impact très lourd du changement climatique, le grand cycle de l'eau se modifie. Il est beaucoup plus aléatoire, les précipitations sont plus intenses là où elles tombaient déjà, les sécheresses sont encore plus longues et durent là où elles se produisaient déjà. Tout cela induit des bouleversements importants et incite forcément les décideurs, les industriels, les administrations, et tous ceux qui sont chargés de l'urbanisme, de l'aménagement du territoire et de l'habitat, à réfléchir autrement par rapport à cette nouvelle donne.

2 La géopolitique de l'eau

2.1. Politiques européenne et française

J'ajoute, pour compléter la **figure 1**, qu'en France, la

politique de l'eau est gérée dans le cadre de la directive-cadre européenne sur l'eau¹. Tous les pays de l'Union européenne sont inscrits pour leur politique nationale de l'eau dans cette directive sur l'eau. C'est une politique européenne très forte et qui implique des schémas de planification dans notre pays qu'on appelle les « schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux ». La directive européenne implique, impose qu'on atteigne le bon état écologique des eaux en 2027.

En France, ce sont les agences de l'eau qui gèrent l'eau à l'échelle des grands bassins hydrographiques² qui dépassent très largement les frontières des Conseils régionaux et des Départements. C'est leur spécificité qui donne une cohérence à cette politique. Vous pouvez aller sur les sites Internet des 6 agences de l'eau françaises : vous y trouverez non seulement un large panel d'informations sur l'eau dans votre région, mais aussi beaucoup de choses qui concernent la recherche, la science et les actions que mènent tous les acteurs concernés, pour une politique de l'eau ambitieuse, efficace et protectrice.

1. Directive-cadre européenne : actes législatifs qui fixent des objectifs aux états membres de l'Union européenne.

2. Bassin hydrographique : zone dans laquelle les eaux de ruissellement convergent à travers un réseau de rivières, de fleuves et de lacs, vers la mer où elle se déverse.

2.2. Objectifs de développement durable à l'échelle internationale

Examinons le schéma de la **figure 2** qui résume les Objectifs de développement durable de l'ONU. En 2015, avant la conférence sur le climat, a eu lieu une autre discussion au niveau international que j'ai suivie personnellement dans mes fonctions de l'époque, qui concerne les Objectifs de développement durable. C'est un ensemble de cibles et d'objectifs que la communauté internationale se donne pour atteindre un mode de développement qui combine à la fois les aspects économiques, sociaux et

écologiques. Pour ce faire, la grande innovation, et c'est le sens de cette roue, c'est que les objectifs sont tous interconnectés, c'est-à-dire qu'on ne peut pas traiter un sujet sans s'intéresser à l'autre :

L'objectif de l'eau propre est le numéro 6. Dans cet objectif eau, un certain nombre de cibles concernant notamment l'accès de la population à une eau potable et l'accès à l'assainissement, mais pas seulement. Il y a d'autres aspects qui concernent le grand cycle de l'eau, à savoir la qualité de l'eau, mais aussi la préservation des écosystèmes aquatiques : les zones humides, les deltas, etc., qui concourent,

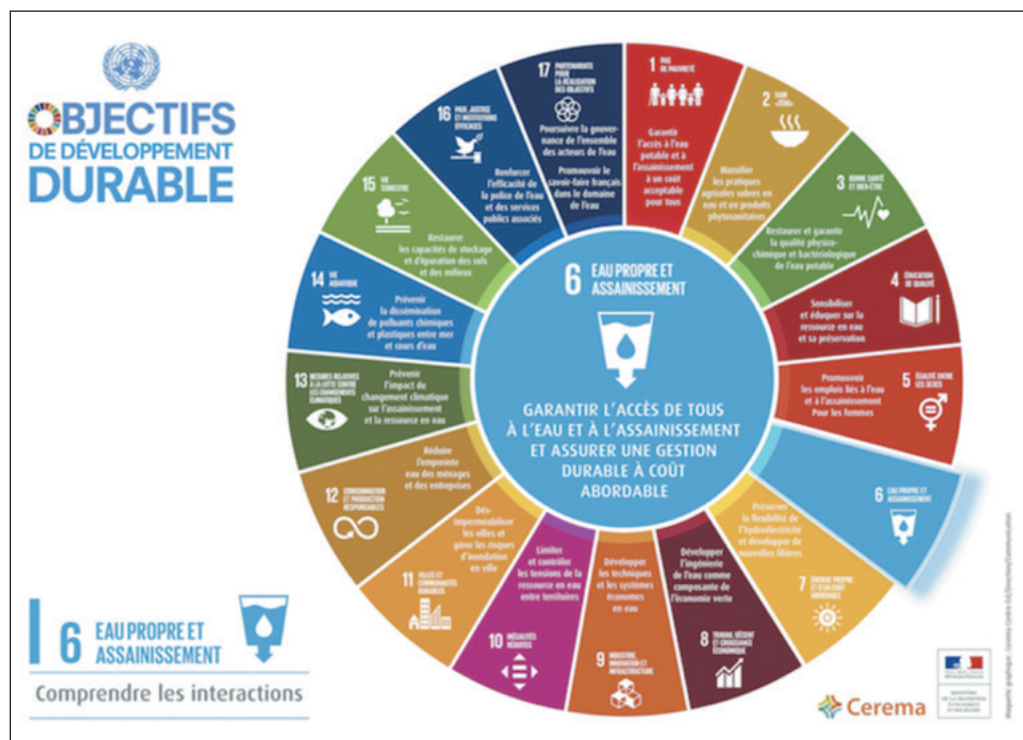


Figure 2

Objectifs de développement durable de l'ONU.

aussi bien sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif, à la disponibilité de l'eau et à sa qualité.

L'autre spécificité de cette grande convention internationale est qu'elle s'est dotée d'indicateurs de suivi pour chaque pays et que cette politique ne s'adresse pas qu'aux pays dits « en développement » : elle s'adresse à tout le monde. Tous les pays membres des Nations unies, c'est-à-dire la quasi-totalité, sont tenus de présenter leur progression par rapport à ces objectifs. Là aussi, je vous invite à consulter le site de la France www.agenda2030.fr. Vous y verrez tous les détails des indicateurs de suivi par rapport à ce que fait la France, où en est la France par rapport aux Objectifs de développement durable concernant l'eau.

2.3. Situation de la France

Globalement, en France, tout ne va pas si mal. Il y a quand même de gros soucis, notamment dans les outre-mer et les États insulaires. Par exemple, vous avez sûrement entendu parler de la crise de l'eau à Mayotte qui a été extrêmement dure et qui perdure. Malheureusement, ce n'est pas parce qu'une crise disparaît de l'actualité médiatique qu'elle n'existe plus. Il y a aussi de gros problèmes en Guadeloupe, en Martinique, un peu partout. La question insulaire est très prégnante.

Une autre problématique émerge aussi fortement dans notre pays. C'est celle des zones à risque, les zones

inondables. Elles ont été, hélas, beaucoup trop urbanisées depuis plusieurs décennies, avec les conséquences que l'on voit en cas d'événements climatiques dits « extrêmes », mais qui, malheureusement, risquent de se reproduire beaucoup plus souvent qu'on ne le pensait. Dans ces zones à risque, la France s'est dotée de plans de prévention des inondations, de plans de prévention des risques. Ils sont mis en œuvre, mais avec une certaine difficulté parce que ce n'est pas toujours évident, aussi bien pour les décideurs et les élus locaux que pour les particuliers, d'accepter un certain nombre de règles par rapport à ce qu'on peut faire dans telle zone, avec telle eau. Cela suppose beaucoup d'échanges, de dialogues, expliquant pourquoi il ne faut pas construire dans telle zone ou pourquoi dans telle autre il faut désimperméabiliser les sols, laisser s'écouler les eaux pluviales de façon plus efficace, plus rapide, etc. Je vous invite à consulter ce site (www.agenda2030.fr) pour avoir une idée plus précise parce qu'il y a aussi des indicateurs qui concernent la présence de micropolluants, par exemple. (Voir aussi l'article de Cécile Miège dans cet ouvrage.)

2.4. Avancées des pays des Nations unies

Tous les ans, en juillet, aux Nations unies, les pays présentent leurs avancées par rapport à ces 17 Objectifs de développement durable. Notons-le, parce qu'on le signale peu alors qu'on parle

beaucoup du climat, à juste titre, mais que la question climatique ne se résoudra pas non plus sectoriellement. Ce n'est pas qu'une question d'énergie propre³, ce n'est pas qu'une question de bas-carbone⁴. Tout est lié : les territoires, l'urbanisme, nos modes de production, nos modes de consommation, la façon dont nous gérons et utilisons l'eau. Tout cela est lié, y compris les enjeux de paix.

On sait qu'une grande partie de l'humanité n'a, malheureusement, toujours pas accès ni à une eau potable, ni à des structures d'assainissement des eaux usées. Aujourd'hui encore, des milliers d'enfants meurent chaque jour de maladies liées à de l'eau impropre à la consommation. Les maladies de ce type perdurent, hélas, et concernent encore énormément de régions du monde. On est donc très loin d'avoir atteint justement les objectifs cibles de l'ODD6.

3 L'eau comme enjeu de paix

Ces infrastructures dont nous parlons, les barrages, les tuyauteries, les canalisations, tous les systèmes d'adduction d'eau⁵, sont en fait d'une grande vulnérabilité. Je vais faire un focus sur quelque chose dont on parle peu : c'est la façon dont l'eau ou les dommages que peut causer l'eau

sont utilisés dans les conflits armés.

3.1. Vulnérabilité des systèmes

Malheureusement, de plus en plus, les belligérants, comme on le voit en Ukraine ou au Proche-Orient, frappent les infrastructures d'acheminement de l'eau pour mettre en péril les populations civiles, empêcher le belligérant adverse de progresser, le noyer sous des trombes d'eau ou l'assécher. Ce n'est pas nouveau : depuis que la guerre existe, et, hélas, elle existe toujours, les belligérants utilisent l'eau comme une arme. Tous nos beaux systèmes où nos pays ont fait énormément de progrès sont d'une grande vulnérabilité en cas d'agression ou de guerre, les guerres étant évidemment un désastre humain, social et écologique absolu mettant en péril tous les efforts que nous pouvons faire par ailleurs pour atteindre les objectifs dont j'ai parlé précédemment.

La guerre détruit les infrastructures, que ce soient les adductions d'eau potable, les stations d'épuration, les barrages et les digues ou les pollutions volontaires des eaux, les attaques sur les infrastructures électriques et informatiques. Les systèmes d'adduction d'eau ou de traitement des eaux sont, en effet, informatisés. Ces systèmes étaient très vulnérables car on a pris conscience qu'avec quelques manipulations on pouvait bloquer complètement des systèmes d'adduction d'eau ou d'assainissement.

3. Énergie propre : énergie sans émissions de gaz à effet de serre.

4. Énergie bas-carbone : énergie peu émettrice de CO₂.

5. Système d'adduction d'eau : ensemble des techniques pour attirer l'eau d'un certain point à un autre.

3.2. Exemples où l'eau est utilisée comme une arme

Les attaques par rapport à ces structures sont, hélas, très nombreuses et j'évoquerai simplement le drame de juin 2023 en Ukraine sur le barrage de Kakhovka sur le Dniepr, ce grand fleuve qui traverse l'Ukraine et la Russie, qui a explosé. Ce sont les Russes qui l'occupaient à ce moment-là. Évidemment, ils disent que ce n'est pas eux, mais on ne voit pas qui d'autre peut être responsable vu que ce sont eux qui occupent ce barrage. Ce dernier a explosé, déversant

des quantités phénoménales d'eau en aval et causant des dégâts considérables et des victimes (*Figure 3*). Dans les faits, l'explosion du barrage de Kakhovka gêne aussi énormément la Crimée qui a été annexée par la Russie, puisque l'eau retenue était très utilisée par la Crimée du Nord.

De même, lors de la guerre avec Daesh, Daesh a occupé des barrages en Syrie (car ils sont stratégiques) et menaçait de les faire exploser. Comme Mossoul se trouvait en aval, c'était aussi une des raisons pour lesquelles les



Figure 3

Les enjeux hydro-militaires du barrage de Kakhovka à la frontière russo-ukrainienne.

Avec l'aimable autorisation de Franck Galland, expert des questions géopolitiques et sécuritaires liées à l'eau.

alliés ont tenté d'éviter l'explosion de ces barrages. Les barrages sont donc à la fois des outils ancestraux pour canaliser l'eau stockée, l'eau étant ensuite utilisée pour de l'irrigation et toutes sortes de choses, mais c'est aussi en cas d'attaque des armes redoutables.

3.3. Droit international durant les conflits

En termes de droit international, car il existe, toutes les conventions internationales prohibent l'attaque des infrastructures qui mettent en péril les populations civiles. Au vu de ce qui se passe dans les conflits actuels, sans tous les citer, cette situation est absolument scandaleuse, préoccupante. Malheureusement, elle ne fait pas l'objet de sanctions, et rien ne semble arrêter les belligérants dans ce domaine.

Selon la convention dite de Genève de 1949, toutes les attaques contre les infrastructures d'adduction d'eau, notamment, sont considérées comme des crimes de guerre et les responsables peuvent être poursuivis devant la Cour pénale internationale pour ces crimes. Au moment où le réchauffement climatique aggrave encore les tensions autour de l'accès à l'eau et de la gestion de l'eau, tout cela devrait être pris en compte. Il y a une réflexion qui est menée pour pousser les États et la communauté internationale à se saisir de tous ces enjeux et trouver des accords, des compromis, des solutions pour éviter les situations les plus dramatiques.

3.4. Mesure de l'impact du changement climatique

Concernant les impacts du changement climatique, j'ai sélectionné quelques éléments qui montrent à quel point la situation est difficile. En [figure 4](#), ce sont des infographies du journal *Le Monde* que vous pouvez retrouver facilement qui sont extraites du World Resources Institute :

La moitié de la population mondiale est confrontée au stress hydrique durant au moins un mois par an et, au fil des années, on s'aperçoit que ces impacts sont en fait plus lourds et plus rapides qu'on ne le pensait ([Figure 4](#)). Cette carte n'est pas périmée car les zones restent à peu près les mêmes, mais, en réalité, les taches rouge sombre se sont dispersées de plus en plus. Vous voyez à quel point cela est problématique. On constate notamment que l'Europe est loin d'être épargnée et que l'Espagne et la France sont très exposées. La [figure 5](#) reproduit trois cartes issues de l'Agence européenne de l'environnement qui montrent les impacts du réchauffement climatique sur les pays de l'Union européenne :

La première carte est sur le risque d'incendie, la deuxième est sur le risque de sécheresse et la troisième sur le risque d'inondation-submersion. Pour vous montrer l'actualité de ces cartes, vous voyez que Valence, en Espagne, et toute la région sont déjà très concernées. Ce qui est terrible, c'est que, malgré les alertes lancées depuis des années sur cette situation, les aménageurs, les décideurs

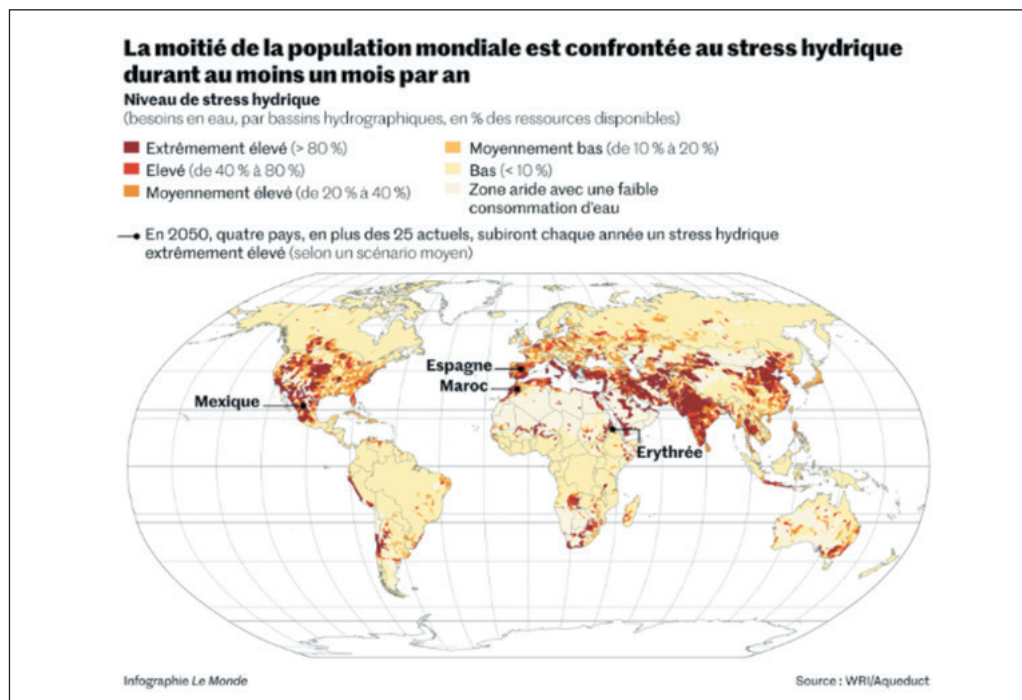


Figure 4

Niveau de stress hydrique dans le monde.

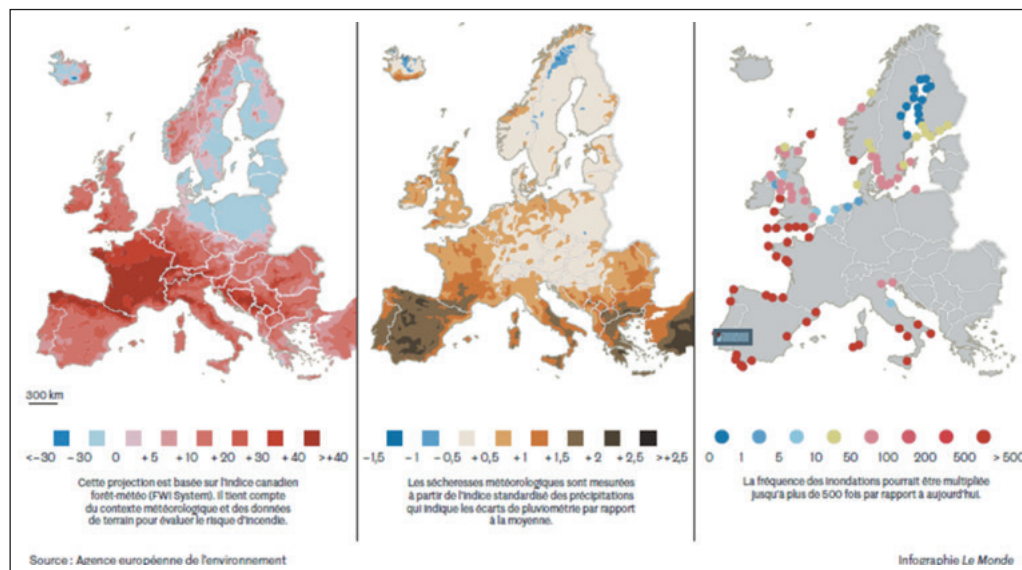


Figure 5

Impact du réchauffement climatique sur les risques d'incendie, de sécheresse et d'inondation en Europe.

et même nous tous n'avons pas encore pris conscience de l'importance de modifier en profondeur nos modes de vie, de développement, de production, de consommation, nos façons d'occuper le territoire.

3.5. Les enjeux sécuritaires liés à la sécurité hydrique dans le cadre du réchauffement climatique

La **figure 6** est une carte prévisionnelle récente de toutes les zones dans le monde où l'eau est source de conflits :

En fait, la plupart des grands fleuves traversent plusieurs pays. Donc, pour que chacun de ces pays ait un accès à l'eau, il faut des coopérations transfrontalières, de compromis, et aujourd'hui on en est très loin. Il y a plus de 150 fleuves qui

sont transfrontaliers et, à ce jour, seuls 35 accords environ les concernent, c'est-à-dire trop peu, d'où des sources de conflits et de tensions croissantes.

Néanmoins, depuis les années 2000, il y a une prise de conscience beaucoup plus forte dans les milieux de la défense, de la stratégie, de la géopolitique de l'importance de gérer l'eau et de prendre en compte l'importance vitale de l'eau pour l'ensemble des populations civiles, mais aussi pour les nations et la bonne entente entre les États. La **figure 7** en fournit quelques exemples :

L'OTAN s'en est saisie dès 2006 quand Hillary Clinton était secrétaire d'État, c'est-à-dire ministre des Affaires étrangères aux États-Unis.

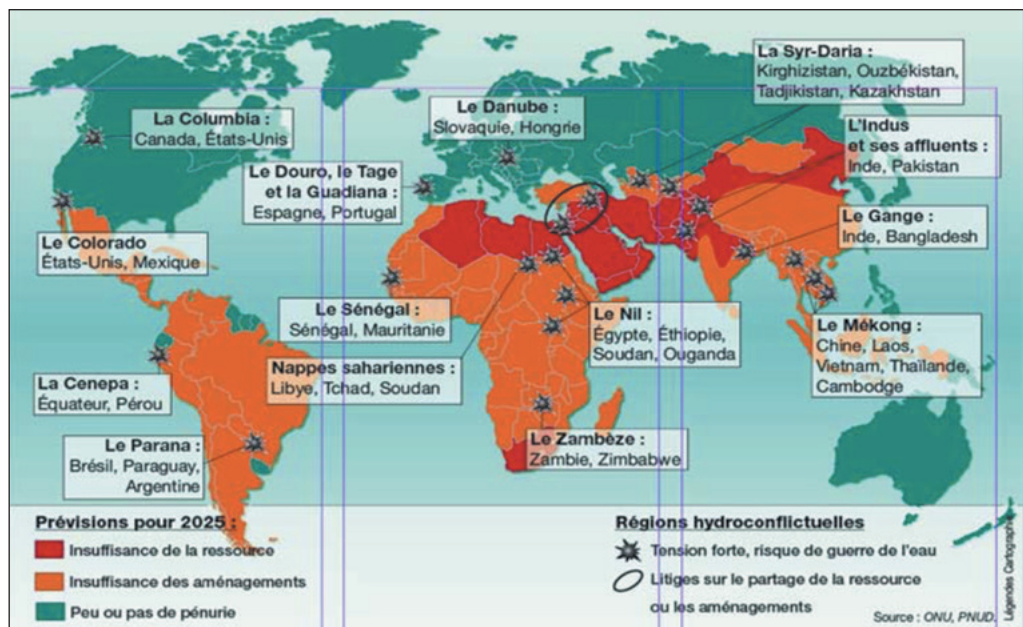


Figure 6

Prévisions des ressources en eau dans le monde en 2025.



Figure 7

Prise de conscience des enjeux de sécurité hydrique en période de réchauffement climatique.

La direction de l'Intelligence nationale aux États-Unis avait produit un rapport très important sur les enjeux sécuritaires liés à la gestion de l'eau et, plus tard, sur les enjeux alimentaires, puisque les deux sont très liés. En 2016, Macky Sall, qui était président du Sénégal à l'époque, a aussi proposé un débat au Conseil de sécurité sur la question. En France, c'est très récent. C'est en 2009 qu'a été créée au sein du ministère des Affaires étrangères une Direction générale de la mondialisation qui traite de ces enjeux écologiques globaux.

Voici quelques exemples du rôle que jouent l'accès à l'eau et les infrastructures de l'eau dans les conflits complexes du Proche-Orient (**Figure 8**) :

Cette place est énorme. Sans la détailler complètement, vous avez une carte représentant la Turquie, la Syrie et l'Irak. En haut, le demi-cercle vert concerne tout le programme très important de la Turquie

pour aménager tout l'amont du Tigre et de l'Euphrate avec des barrages. Vous comprenez bien que s'il y a un grand nombre de barrages en amont sur l'aval, on craint que le pays en amont garde l'eau pour lui, et c'est bien ce qui se passe.

Ces barrages sont donc évidemment des outils pour stocker l'eau et la distribuer, mais aussi des outils de pression, des outils géostratégiques par rapport aux pays voisins. Pour le Tigre et l'Euphrate, ce n'est pas nouveau : si vous lisez les textes de l'Antiquité, ils ont toujours été des enjeux considérables en termes géostratégiques. Tous ces barrages ont des impacts énormes sur la disponibilité de l'eau et sur les tensions accrues dans chacun de ces pays. Beaucoup de rapports montrent que le manque d'eau a conduit indirectement à ces conflits, même s'ils ont aussi des origines religieuses, politiques ou sociales. Néanmoins, l'assèchement contribue très

largement à l'aggravation des tensions.

On voit aussi, en **figure 8**, sur l'Irak la grande zone humide dans le Sud, qui a malheureusement été beaucoup détruite lors des guerres successives, mais qui fait l'objet d'une renaissance également.

Le cas le plus problématique et inquiétant aujourd'hui est celui du barrage de la Renaissance, en Éthiopie (**Figure 9**), l'Éthiopie ayant la volonté d'accroître cette disponibilité en eau, ce que l'on peut comprendre.

L'Éthiopie est un pays encore très pauvre, très sec, qui construit cet énorme barrage

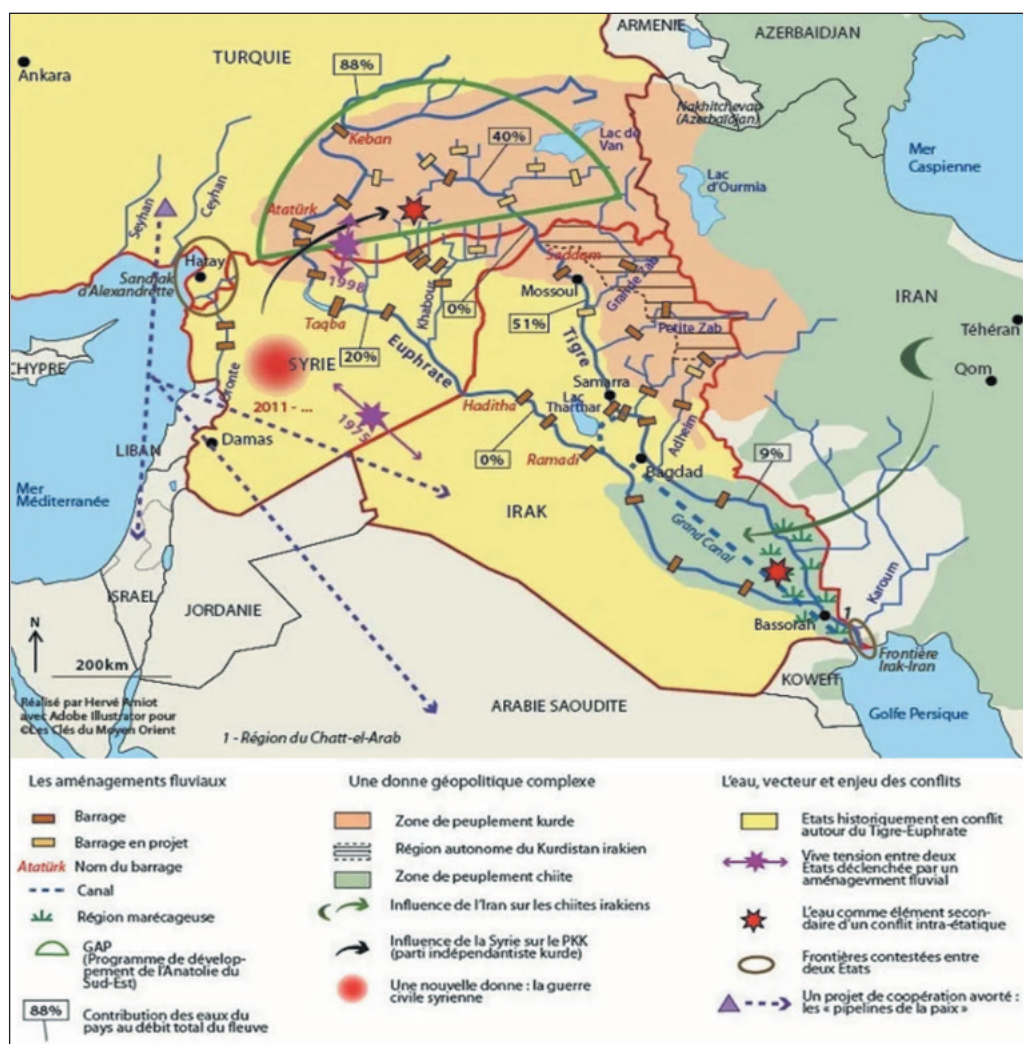


Figure 8

Situation du conflit hydrique entre la Turquie, la Syrie et l'Irak, autour des bassins du Tigre et de l'Euphrate.

Source : « Les clés du Moyen-Orient », carte réalisée par Hervé Amiot.



Figure 9

Situation du conflit hydrique provoqué par le barrage éthiopien.

qui sera un des plus grands du monde pour retenir l'eau du Nil Bleu. Néanmoins, le Nil est aussi l'artère vitale de l'Égypte, et l'Égypte sans le Nil n'est plus l'Égypte, et c'est surtout la faim et la soif assurées pour un pays qui compte bientôt 100 millions d'habitants. Le conflit est donc croissant entre l'Égypte et l'Éthiopie, et beaucoup de pays se démènent pour que ces deux pays trouvent un accord sur la répartition de l'eau, sur sa gestion, mais c'est loin d'être le cas. Vous voyez donc à quel point ces grandes infrastructures qui sont indispensables pour fournir de l'eau aux régions concernées sont aussi des objets de tension très forte et de conflits armés.

Un autre exemple est celui du Mékong, dont les sources remontent jusqu'à la Chine. On parle dans le langage stratégique de pays «hydro-dominants» et «hydro-dominés». C'est-à-dire que ceux qui sont à l'amont des grands fleuves disposent évidemment d'une carte énorme pour s'assurer l'accès à l'eau. Ceux qui sont en aval doivent subir ce que fait le pays en amont, sauf si, et heureusement cela existe, ils s'entendent pour gérer collectivement l'eau du fleuve en question. Il y a donc beaucoup de tension aussi entre la Chine et les pays voisins à propos du Mékong notamment.

Il y a heureusement beaucoup d'exemples positifs, comme on peut le voir dans le rapport annuel des Nations unies

sur la ressource en eau. Ces documents sont accessibles en ligne très facilement en français et, chaque année, les Nations unies produisent un rapport sur l'eau avec une thématique particulière. Cette année : « L'eau, la prospérité et la paix ».

Un autre exemple positif, dans ce rapport des Nations unies, est l'Organisation de la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS). Notons que le Sénégal vient d'être touché par de très fortes inondations inattendues. L'OMVS est un exemple, qui remonte à la présidence de Léopold Sédar Senghor, d'entente entre quatre pays pour gérer ce fleuve et faire en sorte que tout le monde puisse accéder à l'eau et gérer le fleuve collectivement à l'échelle de cet immense bassin.

Il y a heureusement beaucoup d'exemples de ce type, mais pas assez, d'où la nécessité absolue d'aller beaucoup plus loin dans la coopération transfrontalière.

4 Recommandations et conclusion

En conclusion, voici quelques recommandations qui sont faites dans ce domaine de l'hydro-diplomatie (*Figure 10*).

Tout d'abord, il faut intégrer l'eau et le climat dans les stratégies de sécurité globale. Cela veut dire que l'orientation des dirigeants politiques est très importante et qu'aller voter est donc très important.

Il y a la nécessité de développer des coopérations transfrontalières beaucoup plus nombreuses et efficaces, à l'instar de l'Observatoire mondial de l'eau pour la paix créé depuis 2022 à Genève qui est aussi un siège des Nations unies très proactif sur les questions de paix et de sécurité.

Il y a aussi la nécessité de mieux protéger les infrastructures de l'eau et les systèmes d'accès à l'eau par rapport à toutes les attaques possibles, y compris des attaques chimiques, bactériologiques ou autres, qui peuvent se produire.

Enfin, mais cela n'exclut pas d'autres solutions, il faut développer des solutions que l'on dit « fondées sur la nature », et qui sont en fait fondées sur le fait de mieux préserver les écosystèmes aquatiques tels que les deltas, les zones humides, les ripisylves, c'est-à-dire les rives des fleuves et toutes les zones qu'il y a autour, et utiliser justement ces écosystèmes que l'on détruit beaucoup, malheureusement. Même si cela s'améliore, il y a eu énormément de destructions de zones humides, de zones de marais, etc., notamment sur le littoral, considérées, à

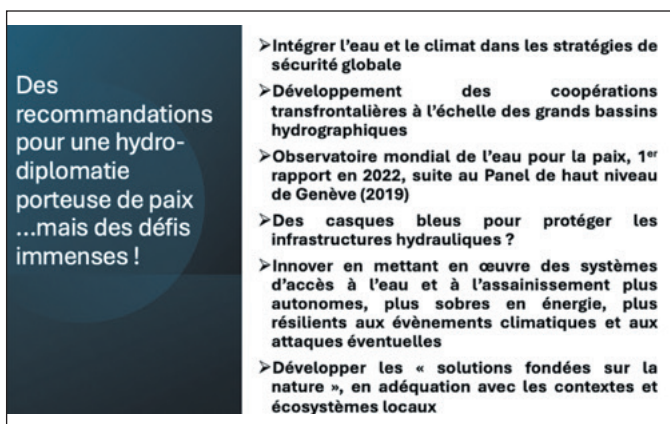


Figure 10

Recommandations de travaux diplomatiques sur l'eau.

tort, comme des zones inutilisées. On considère qu'on peut drainer et sécher ces zones et construire parce qu'on en a besoin. C'était la mentalité pendant des décennies, cela change heureusement, mais

lentement, et, hélas, ce sont souvent les événements climatiques extrêmes et les catastrophes qui poussent à dire que ce n'est plus possible et qu'il faut restaurer, et faire autrement.

Conclusion

Je conclus en citant Gaston Bachelard qui disait, en 1942, dans ces fameux essais sur la matière : « L'eau est le miroir de notre avenir. » Cette phrase est très forte et tout à fait juste. L'eau est notre vie même. Si nous n'y prenons pas garde, si nous ne faisons pas preuve d'un sursaut d'inventivité, d'innovation par rapport à la nouvelle donne que nous avons aujourd'hui, notre avenir risque d'être sérieusement assombri.

Il y a donc quantité d'initiatives extrêmement positives et porteuses, aussi bien à l'échelle territoriale qu'à l'échelle globale ou à l'échelle des grands bassins fluviaux, qui méritent d'être découvertes.

Allez voir sur les sites des agences de l'eau, vous découvrirez quantité de choses passionnantes et aussi beaucoup de métiers d'avenir. Le secteur de l'eau emploie déjà énormément de monde et en emploiera de plus en plus. Je vous invite à vous y intéresser à partir du local, de l'échelle territoriale jusqu'au niveau le plus global que vous devez avoir en tête aussi pour bien comprendre l'urgence d'agir efficacement et de façon cohérente sur les questions de politique de l'eau.

Le cycle
continental
de l'eau
et la ressource
mondiale
associée :
évolution
récente et
projections
futures

D'après la conférence de Bertrand Decharme, directeur de recherche au CNRS¹, détaché au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), le centre de recherche de Météo France. Il présente un travail effectué par Maya Costantini dans le cadre de sa thèse en collaboration avec Jeanne Colin, chercheuse à Météo France.

1. CNRS : Centre national de la recherche scientifique.

Introduction

Ce chapitre traite de la ressource en eau de la planète Terre, c'est-à-dire de la totalité du stock d'eau continentale exploitable par l'être humain (*Figure 1*).

1 L'eau sur Terre

97 % de l'eau sur Terre est salée et donc difficilement exploitable par l'être humain. 3 % seulement de l'eau est douce, dont 70 % sont concentrés dans les glaciers arctiques ou groenlandais, donc difficilement exploitables aussi. Seul 1 % de cette eau douce est contenu dans les rivières, les lacs, les sols superficiels, les marécages. La majeure partie, 29 %, est contenue dans les aquifères, c'est-à-dire les structures géologiques perméables qui contiennent les nappes d'eau souterraines auxquelles on accède par des puits. La ressource en eau, ce sont donc simplement ces 30 % d'eau douce, soit moins de 1 %

de l'eau totale présente sur Terre. Ce n'est pas beaucoup! (*Figure 2*)

2 Le cycle hydrologique

La ressource en eau est régie par le cycle hydrologique global selon lequel, sous l'effet du Soleil principalement, l'océan va se réchauffer. Cela va créer un apport de vapeur d'eau dans l'atmosphère, et cette eau va retomber en précipitations sur les continents : les précipitations sont donc l'apport principal de notre ressource en eau (*Figure 3, image de gauche*). Ces précipitations vont engendrer un ruissellement de surface qui alimente les rivières, les lacs..., et l'infiltration qui nourrit le sol (*Figure 3, image de droite*).

Simultanément à ces apports se produit une perte d'eau (*Figure 4, image de gauche*) par écoulement vers les océans et une autre par évapotranspiration (*Figure 4, image de droite*).



Figure 1

Ensemble du stock continental d'eau douce exploitable par l'être humain.

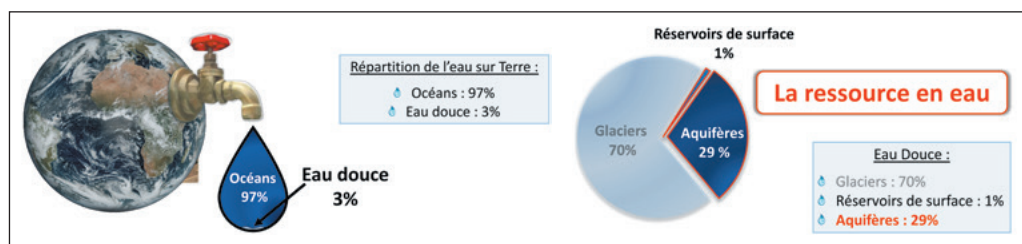


Figure 2
Répartition de l'eau sur Terre et de sa part exploitable par l'homme.

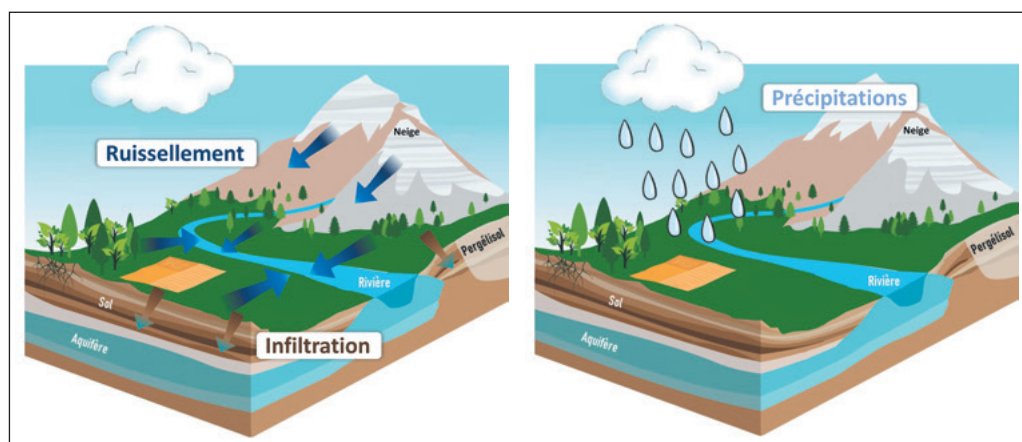


Figure 3
Le cycle hydrologique continental et ses apports principaux.

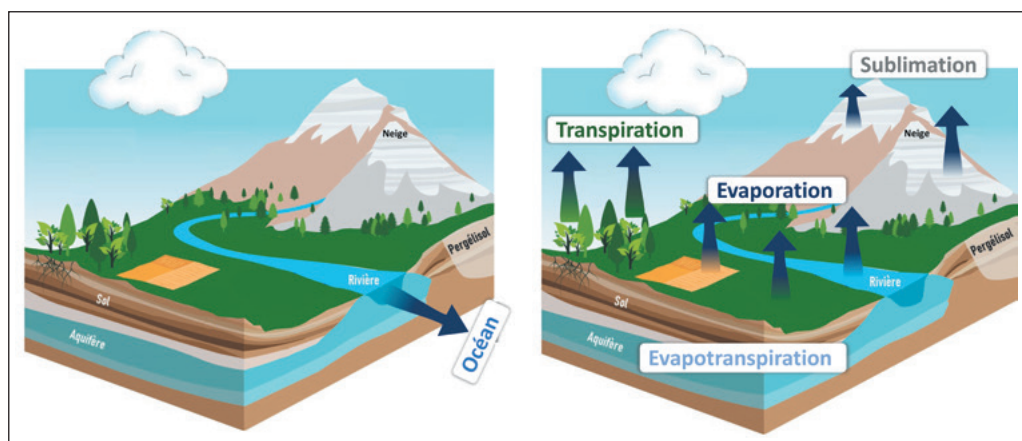


Figure 4
Le cycle hydrologique et ses pertes principales.

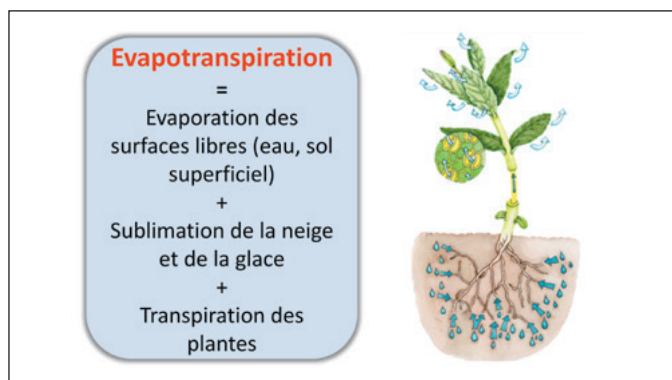


Figure 5

Schéma de l'évapotranspiration.

Focus à droite sur la partie réalisée par les plantes.

Cette dernière contribution consiste en l'évaporation des lacs, des rivières, des sols, ou en la sublimation² de la neige et de la glace, ou encore en la transpiration des plantes qui puisent de l'eau dans le sol pour pouvoir survivre (Figure 5). Cette transpiration

2. Sublimation : passage (d'un corps) de l'état solide à l'état gazeux sans passage par l'état liquide.

des plantes représente 70 % de l'évapotranspiration globale.

La faible quantité d'eau qui s'est infiltrée dans les sols peut pénétrer encore plus profondément, rechargeant ainsi les nappes aquifères (Figure 6, image de gauche) dont une toute petite partie va s'évaporer en échangeant par capillarité avec les sols ou grâce à certaines plantes qui ont des racines profondes capables de puiser l'eau dans ces aquifères (Figure 6, image de droite). Enfin, les aquifères échangent de l'eau avec les rivières avec qui ils sont à l'équilibre. En période humide, la rivière peut contribuer à la recharge des aquifères, alors qu'en période sèche ce sont les aquifères qui nourrissent les rivières, ce qui permet d'assurer les débits d'étiages.

3 Le changement climatique

Le cycle hydrologique naturel est fortement perturbé par les

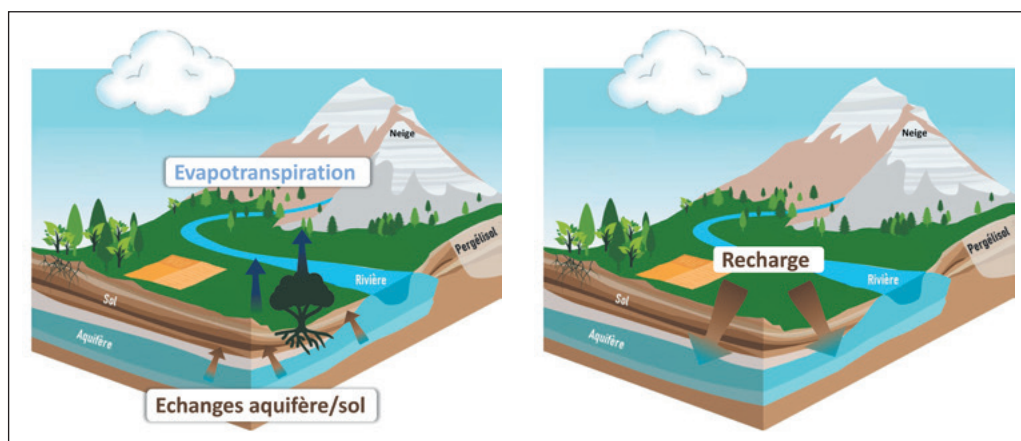


Figure 6

Le cycle hydrologique et la recharge en eau.

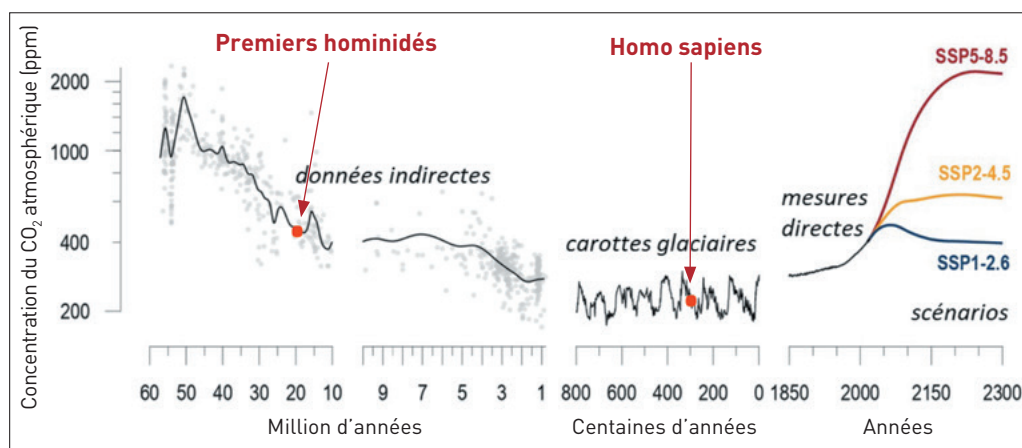


Figure 7

Graphiques montrant l'évolution de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère au cours des 60 derniers millions d'années (d'après IPCC, 2021³).

activités humaines et le changement climatique. L'examen des données historiques du GIEC⁴ (Figure 7) fournit l'illustration évidente de l'évolution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère au cours des 60 derniers millions d'années.

Cela confirme qu'elle a diminué tout au long des 60 derniers millions d'années, puis

qu'elle a oscillé, dans la période plus récente, d'environ 100 ppm⁵ sur 100 000 ans, ce sont les cycles glaciaires et interglaciaires. Aujourd'hui, on est sur un cycle interglaciaire, donc plus chaud qu'un cycle glaciaire. En l'espace de moins de 200 ans, de 1850 à nos jours, les concentrations atmosphériques en CO₂ ont augmenté de 200 ppm jusqu'à atteindre 426 ppm, ce qu'on n'avait jamais vu depuis 14 millions d'années et l'apparition des premiers hominidés.

À cet état de fait sont associées des variations de température (Figure 8). On constate que la température a évolué de la même manière que le CO₂ : plus la concentration de CO₂ est élevée, plus la température augmente. Sur la figure 8, on a porté la température globale de la Terre relativement à la moyenne de

3. IPCC, 2021: Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

4. GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

5. ppm : partie par million, fraction valant 10⁻⁶, soit un millionième.

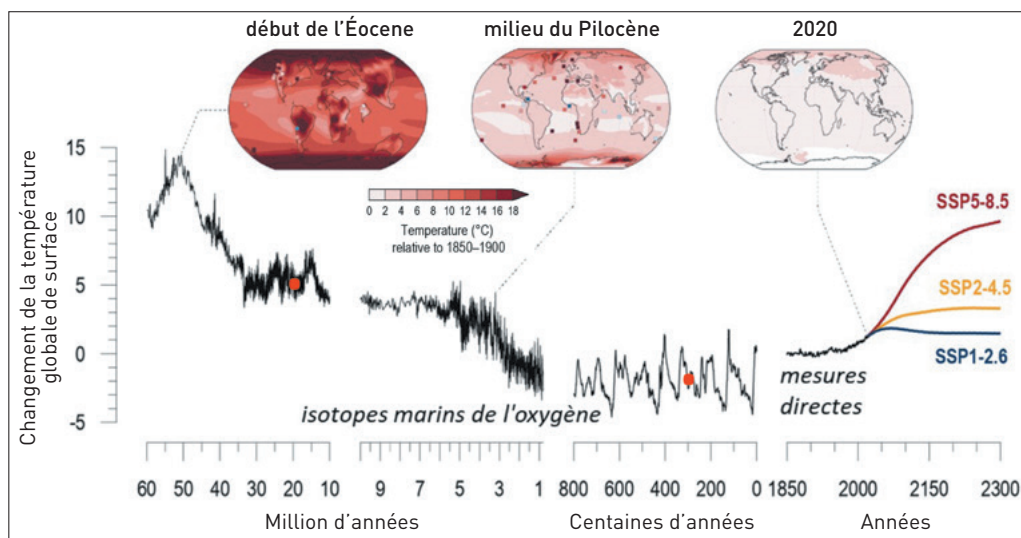


Figure 8

Graphique montrant l'évolution de la température du globe au cours des 60 derniers millions d'années (d'après IPCC, 2021).

la période 1850-1900, période préindustrielle, prise comme référence. On est aujourd'hui à un niveau de réchauffement de 1,26 °C à l'échelle globale.

Cela confirme qu'elle a diminué tout au long des 60 derniers millions d'années, puis qu'elle a oscillé, dans la période plus récente, d'environ 100 ppm sur 100 000 ans, ce sont les cycles glaciaires et interglaciaires. Aujourd'hui, on est sur un cycle interglaciaire, donc plus chaud qu'un cycle glaciaire. En l'espace de moins de 200 ans, de 1850 à nos jours, les concentrations atmosphériques en CO₂ ont augmenté de 200 ppm jusqu'à atteindre 426 ppm, ce qu'on n'avait jamais vu depuis 14 millions d'années et l'apparition des premiers hominidés.

À cet état de fait sont associées des variations de température (Figure 8). On constate que la

température a évolué de la même manière que le CO₂ : plus la concentration de CO₂ est élevée, plus la température augmente. Sur la figure 8, on a porté la température globale de la Terre relativement à la moyenne de la période 1850-1900, période préindustrielle, prise comme référence. On est aujourd'hui à un niveau de réchauffement de 1,26 °C à l'échelle globale.

Les spécialistes en socio-économie ont édité en 2014 des scénarios des évolutions jusqu'à la fin du XIX^e siècle (Figure 8, graphique de droite). Les scénarios optimistes évoluant des concentrations de CO₂ (et donc de températures) qui augmentent puis diminuent ensuite jusqu'en 2300 sont déjà obsolètes. Des scénarios plus modérés (comme celui tracé en couleur jaune), avec des concentrations qui

augmentent puis stagnent, et des scénarios très forts (en couleur rouge), où les concentrations en CO_2 reviennent en 2300 au niveau de celui qu'on avait il y a 60 millions d'années, ont été élaborés. Aujourd'hui, on serait au-dessus du jaune. Une prévision de $+3^\circ\text{C}$ entre 2100 et 2300 paraît une bonne hypothèse de travail.

Ces températures sont obtenues à partir de modèles climatiques qui sont des assemblages de plusieurs modèles représentant l'atmosphère, les océans, la cryosphère⁶, la chimie atmosphérique, etc., et, bien sûr, les surfaces continentales (Figure 9).

Au CNRM, nous travaillons sur ces modèles. Ils mettent en œuvre le meilleur savoir-faire en physique et en mathématiques pour résoudre des équations pertinentes sur les processus physiques, biophysiques et biochimiques. Ils intègrent des forçages naturels comme le Soleil ou les éruptions volcaniques qui envoient des aérosols qui refroidissent la Terre. On leur fournit aussi des forçages anthropiques, comme les concentrations en CO_2 observés dans l'atmosphère sur la période préindustrielle jusqu'à aujourd'hui, ou les scénarios climatiques que nos collègues socioéconomistes nous délivrent.

À titre d'illustration, on peut noter, en considérant l'évolution de la température entre 1850 et aujourd'hui, la correspondance entre la courbe noire et nos modèles climatiques

en marron (Figure 10). Si, sur toute la période, on force nos modèles avec une concentration qui reste proche de celle pendant la période préindustrielle, on obtient des

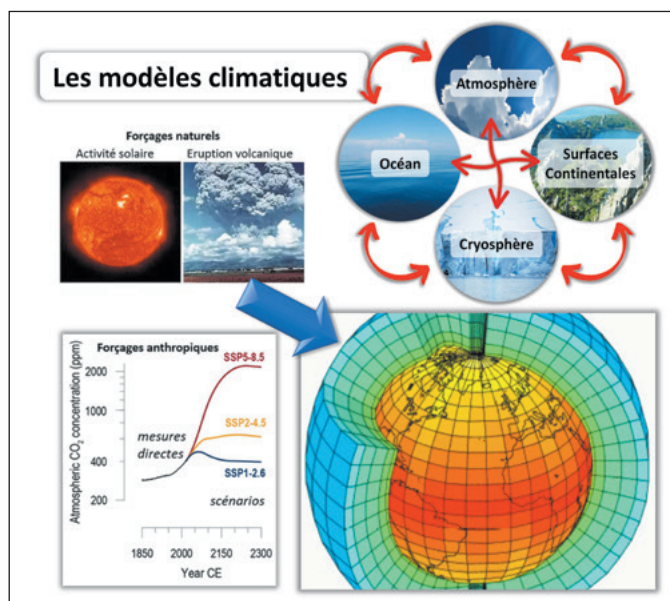


Figure 9

Schéma simplifié de la construction des modèles climatiques.

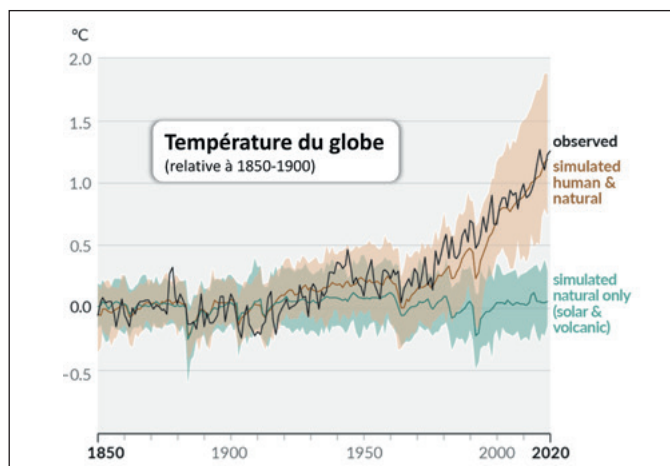


Figure 10

Évolution de la température du globe de 1850 à 2020 (d'après IPCC, 2021).

6. Cryosphère : glace terrestre sous toutes ses formes.

températures globales calculées qui restent très éloignées des observations. Cela confirme à l'évidence la réalité : l'impact de l'humanité sur le réchauffement climatique.

Pour obtenir un autre aspect de la vérification de nos conclusions, la [figure 11](#) montre que ce que l'on calcule à l'échelle de toute la Terre se passe sur tous les continents : il n'y a pas une seule parcelle de Terre sur cette planète qui ne se réchauffe pas.

Il est intéressant de signaler une représentation originale ([Figure 12](#)) des résultats obtenus dans l'étude du changement climatique : il s'agit de la construction d'un « code barre », où chaque barre représente une année. La progression de la concentration en CO_2 ainsi que celle de la température relative à la moyenne en 1850, qui augmentent très fortement ces 30 dernières années, sont ainsi mises en évidence.

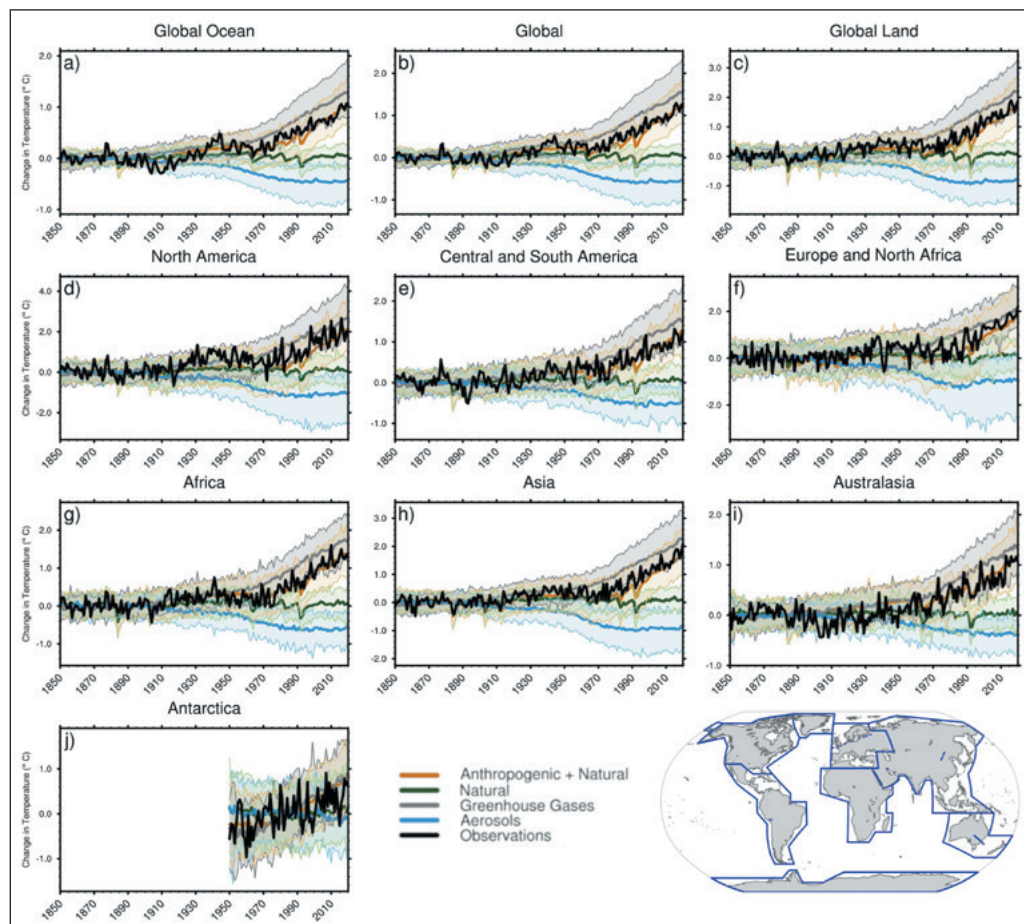


Figure 11

Évolution des températures sur les différents continents de 1850 à nos jours (d'après IPCC, 2021).

Le changement climatique perturbe également le cycle hydrologique, comme le révèle l'examen de l'évolution des précipitations dans l'hémisphère Nord ces 30 dernières années. On observe le même phénomène dans l'hémisphère Sud, mais moins fortement. Cette corrélation entre la hausse de la température de l'atmosphère et l'augmentation des précipitations s'explique par les lois de Clausius Clapeyron⁷ : l'air emmagasine plus d'humidité et cela accroît son potentiel de précipitations (Figure 13).

Les cartes de la **figure 13** illustrent bien la situation. Dans les zones colorées en bleu, les précipitations augmentent ; dans les zones en couleur marron, elles diminuent. On observe ainsi que,

7. Lois de Clausius Clapeyron : l'augmentation de la température de 1 °C correspond à une augmentation de l'humidité de l'atmosphère d'environ 7 %, c'est-à-dire environ 1 à 3 % de précipitations en plus à l'échelle mondiale.

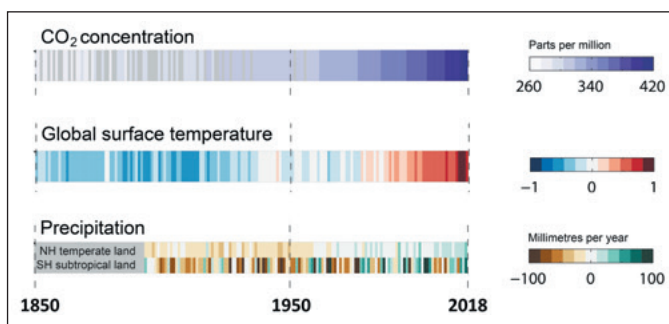


Figure 12

Représentation du changement climatique et ses principales manifestations entre 1850 et 2018 (d'après IPCC, 2021).

au cours des 30 dernières années, les précipitations ont augmenté dans l'hémisphère Nord, à l'exception du pourtour méditerranéen et de l'Est asiatique, et dans l'hémisphère Sud. Si l'on se projette maintenant dans un monde qui serait plus chaud de 1,5 °C par rapport à l'ère industrielle, soit aux environs de 2030, on aura encore des précipitations en croissance. Ce sera le cas des zones de mousson (Afrique de l'Ouest ou Asie).

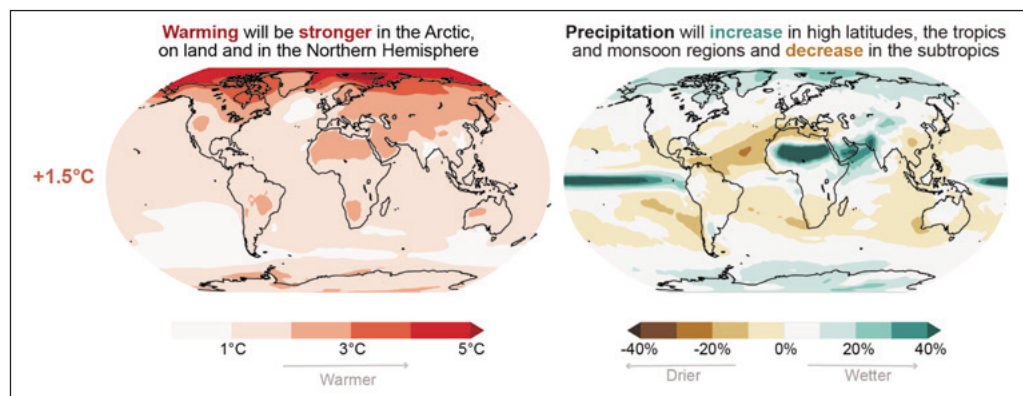


Figure 13

Impact du réchauffement climatique et des changements des précipitations dans un scénario à +1,5 °C (d'après IPCC, 2021).

4 Effet de l'anthropisation et de l'irrigation sur la ressource en eau

Le fort accroissement de la consommation en eau au cours des derniers siècles est largement le résultat de la pratique de consommation des humains. À l'échelle planétaire, 20 % des prélèvements sont liés à l'industrie, 10 % à l'usage domestique. Cette eau est prélevée dans les rivières, les lacs et les aquifères, mais toute une partie est rendue à la nature, si bien que la part consommée va de 5 à 15 %. Au total, il semblerait que l'on ne consomme pas beaucoup d'eau par rapport à ce que l'on prélève, mais l'effet est tout de même majeur car l'état dans lequel on la rend n'est bon ni du point de vue thermique, ni du point de vue de la pollution (Figure 14).

Les 70 % restants de l'eau prélevée, c'est l'agriculture qui la prélève pour l'irrigation. La grande majorité est évaporée dans l'atmosphère et une toute petite partie repart dans les rivières ou se réinfiltre dans les sols ou les aquifères. On estime que l'agriculture consomme 60 à 80 % des prélèvements en eau qu'elle effectue ; c'est donc le secteur le plus gourmand en eau à l'échelle mondiale. Une publication récente de Huang *et al.* fait ressortir que c'est surtout en Asie, dans le sud de l'Europe et dans l'est des États-Unis que sont effectués les plus gros prélèvements en eau pour l'agriculture (Figure 15).

Sur le graphique de la figure 16 est retracée la moyenne globale de ces prélèvements pour l'agriculture sur les 40 dernières années. Le chiffre

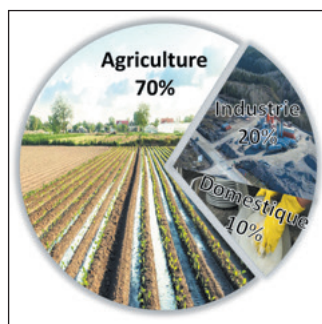


Figure 14

Répartition de l'utilisation de l'eau par secteur : agriculture, industrie et usage domestique.

D'après Costantini, 2023, Étude de l'évolution de la ressource mondiale en eau dans un contexte de changement climatique. Surfaces et interfaces continentales, Hydrologie. Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2023. Français. <http://thesesups.ups-tlse.fr/5999/>.

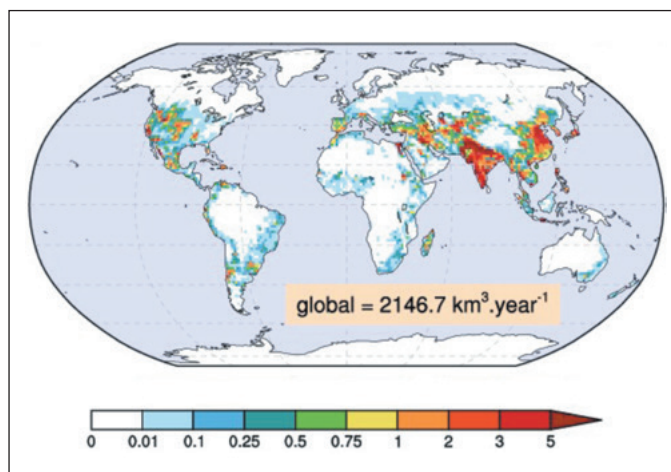


Figure 15

Carte de la consommation d'eau douce dans le monde chaque année (km^3/an).

D'après Decharme, B., Costantini, M., and Colin, J. A simple approach to represent irrigation water withdrawals in Earth System Models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 17, e2024MS004508, <https://doi.org/10.1029/2024MS004508>, 2025.

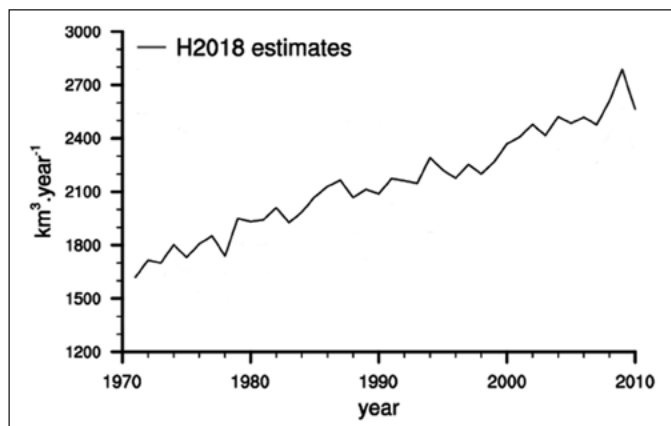


Figure 16

Évolution de la moyenne globale des prélèvements en eau pour l'agriculture de 1970 à 2010.

D'après Decharme *et al.*, 2025.

actuel représente à peu près 16 fois les débits de la somme de tous les fleuves de France ou le tiers du débit annuel du fleuve Amazone. Ces quantités sont considérables.

Les moyens techniques d'aujourd'hui permettent de connaître l'évolution des stocks d'eau douce de la planète. Le satellite GRACE peut voir la variation de tout le stock contenu sur les continents (eau contenue dans les eaux de surface, lacs, rivières, etc., neige, végétation, humidité du sol et des aquifères). Sur la **figure 17**, les zones jaunes montrent des diminutions de ce stock sur la période 2002-2016 et les zones bleues montrent des augmentations. On peut, par exemple, retrouver la fonte des glaciers ou l'impact des prélèvements pour l'irrigation, qui se voit très bien sur l'Asie et sur l'est des États-Unis.

Très récemment, dans une publication de 2024, un travail américain (Jasechko *et al.*),

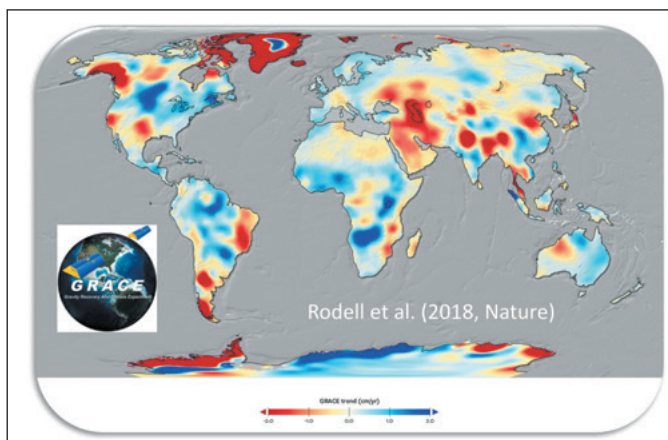


Figure 17

Variation mondiale des ressources en eau détectée par GRACE (Rodell *et al.*, 2018).

effectué grâce à des données obtenues à l'aide de puits d'observation de piézomètres⁸ dans les aquifères, a montré que les aquifères colorés en rouge sont des points où

8. Piézomètre : instrument servant à mesurer la pression des liquides.

le niveau de la nappe phréatique est inexorablement descendu entre les années 2000 et 2020 (**Figure 18**). On voit bien qu'il y a une forte corrélation entre cette diminution des nappes phréatiques et les prélèvements en eau. C'est ce qu'avait déjà suggéré un modèle de 2019, à bases physiques simplifiées, qui montrait que le volume des aquifères allait diminuer d'ici à 2100 sous l'effet des activités humaines.

5 La ressource en eau

Faisons un essai modeste, en tout cas provisoire, pour évaluer l'évolution de la ressource mondiale en eau souterraine. Pourquoi souterraine ? Parce que c'est la principale ressource, et qu'on ne peut pas s'attaquer à toutes les questions en même temps. On a regardé l'évolution de la recharge (**Figure 19**), le témoin de la ressource en eau souterraine par excellence, parce qu'elle représente la quantité d'eau qui peut être prélevée

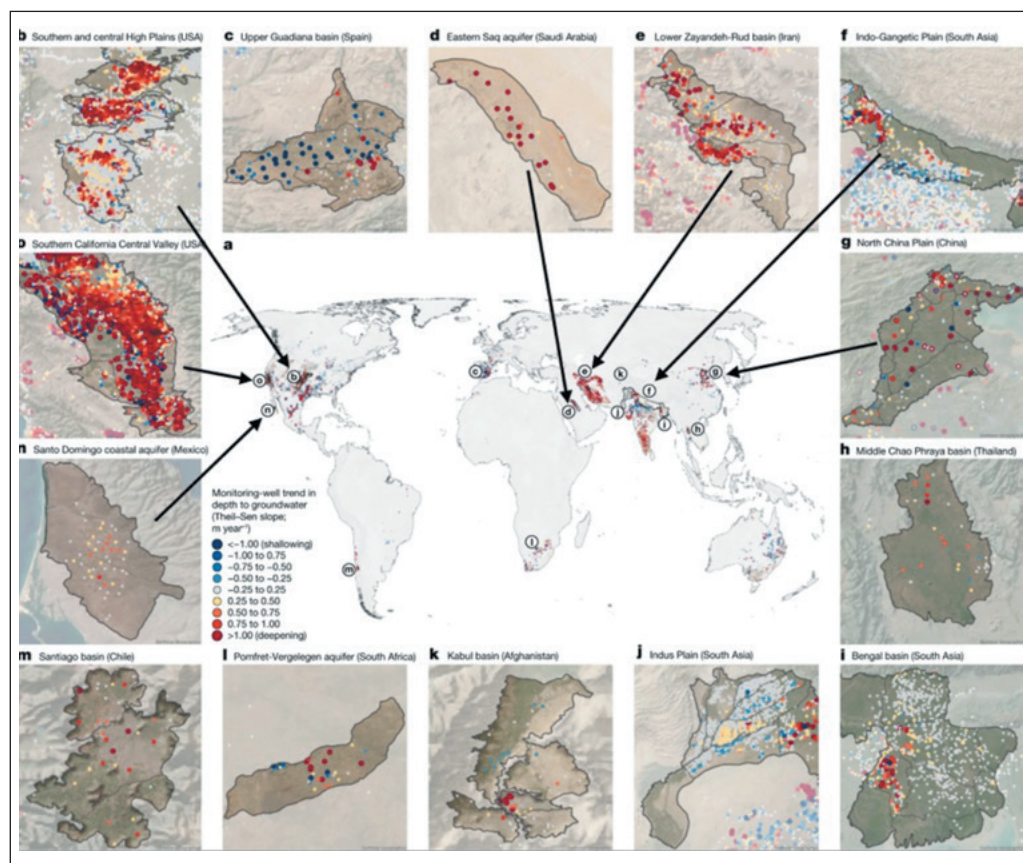


Figure 18

Tendances mondiales de l'évolution des nappes phréatiques dans les aquifères majeurs (Jasechko et al., 2024).

dans les aquifères sans compromettre la capacité de ceux-ci à se reconstituer sur le long terme. Bien sûr, si on prélève 100 % de la recharge annuelle, l'aquifère ne se reconstitue pas.

Dans ce travail, on a séparé l'effet du changement climatique de l'effet des prélèvements pour l'irrigation. Pour ce faire, on a utilisé tous les modèles de climat cités sur la [figure 20](#), modèles développés en Chine, en Allemagne, en France, en Angleterre, etc. Pour pouvoir utiliser ces modèles, chaque centre fait des simulations groupées grâce au projet CMIP-6 WCRP, et on a ensuite communiqué toutes les données pour faire les recherches.

Ces modèles ont été appliqués aux scénarios cités sur la [figure 21](#). Certains sont des

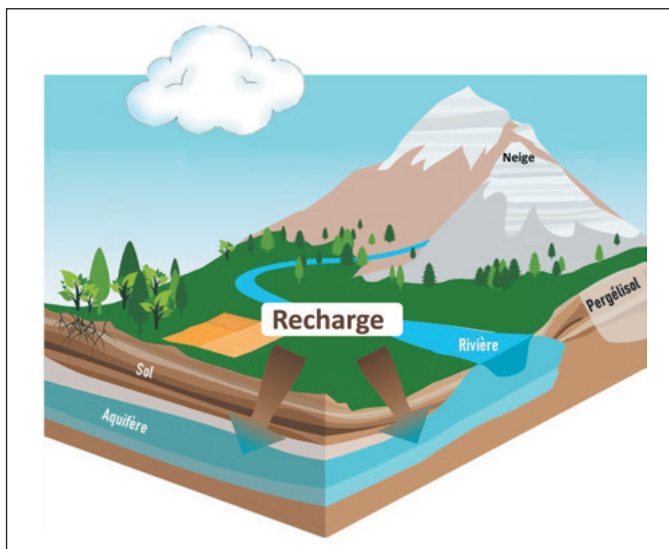


Figure 19

Le cycle hydrologique et la recharge en eau.

	Nombre de membres
AS-RCEC/TaiESM1	1
BCC/BCC-CSM2-MR	1
CCCma/CanESM5	25
CCCma/CanESM5-CanOE	3
CMCC/CMCC-CM2-SR5	1
CMCC/CMCC-ESM2	1
CNRM/CNRM-CM6-1	6
CNRM/CNRM-EMS2-1	5
CSIRO-AARCCSS/ACCESS-CM2	3
EC-earth-Consortium/EC-Earth3	8
EC-earth-Consortium/EC-Earth3-Veg	6
EC-earth-Consortium/EC-Earth3-Veg-LR	3
IPSL/IPSL-CM6A-LR	6
MIROC/MIROC-ES2L	10
MOHC/UKESM1-0-LL	5
MPI-M/MPI-ESM1-2-LR	10
MRI/MRI-ESM2-0	1
NASA-GISS/GISS-E2-1-G	7
NCAR/CESM2	5
NCAR/CESM2-WACCM	1
NCC/NorESM2-LM	1
NCC/NorESM2-MM	1

Figure 20

Ensemble des modèles climatiques utilisés pour quantifier l'impact des prélèvements pour l'irrigation.

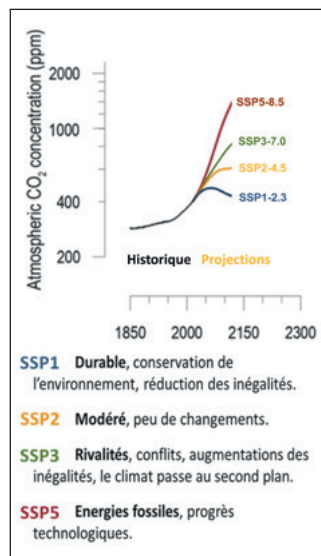


Figure 21

Évolution historique et projections de la concentration atmosphérique en CO₂ selon différents scénarios socioéconomiques partagés (SSP).

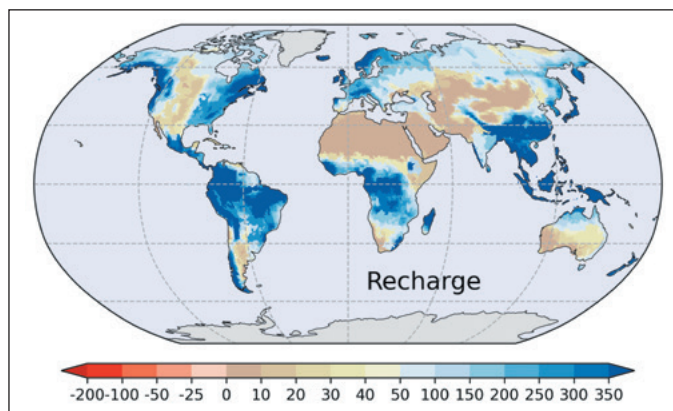


Figure 22

Carte montrant la recharge en eau sur la période 1971-2000 simulée par les modèles climatiques.

D'après Costantini, M., Decharme, B., and Colin, J.: Évolution récente et projection future de la ressource mondiale en eau souterraine, *La Météorologie*, p. 039, <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2025-0035>, 2025.

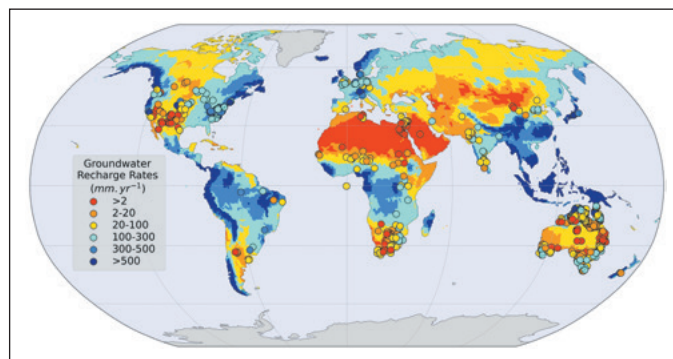


Figure 23

Carte montrant la recharge en eau sur la période 1971-2000 construite à partir d'observations.

D'après Maya Costantini, 2023.

scénarios durables : le SSP1 (**Figure 21**) est déjà obsolète ; le SSP2 est le scénario modéré qui est privilégié aujourd'hui, mais dont, en fait, on sait déjà qu'on est au-dessus. On a aussi un scénario qui est basé sur les conflits actuels ou prévisibles au sein de l'humanité

(augmentation des inégalités dans le monde) où le climat passe au second plan (SSP3). Un autre scénario, le SSP5, est centré sur les énergies fossiles, alors qu'il semblerait que celui-là aussi soit obsolète – heureusement pour nous. Aujourd'hui, on a choisi de vous montrer le résultat du scénario jaune, même si, d'après certains, notre situation serait entre le jaune et le vert.

La carte de la **figure 22** montre la recharge en eau, moyennée sur la période 1971-2000. C'est la période historique simulée par les modèles climatiques. On distingue bien les zones où on n'a pas de problème de ressource en eau et celles où la ressource est beaucoup plus limitée.

La **figure 23** est identique, sauf qu'on va l'utiliser pour comparer les modélisations aux observations. Les petits ronds représentent des observations de recharge disponibles. On veut faire constater ici au lecteur qu'il y a **une très bonne concordance entre les observations et ce qu'est capable de simuler le modèle**. Cependant, on ne rentrera pas dans le détail parce que, dans la publication que Maya a faite, on évalue nos modèles de manière plus poussée.

Pour faire saisir l'importance des changements hydrologiques en cours, regardons **la moyenne de la recharge en 2100 moins la moyenne de cette recharge sur la période historique (Figure 24)**. Toutes les zones en bleu sont les zones où cette recharge (donc la ressource en eau) va augmenter ; et toutes les zones en rouge représentent celles où elle va diminuer.

La **figure 24, figure de droite** donne une image des effets du changement climatique sur la ressource en eau souterraine ; les hachures représentent les zones où 80 % des modèles sont d'accord entre eux, et où l'on a donc le plus de certitude. On peut voir, en comparant avec la carte prévisionnelle des précipitations de la **figure 24, figure de gauche**, publiée par le GIEC en 1921, qu'il y a concordance entre l'évolution de ces précipitations et celle de la recharge en eau.

5.1. Estimation de la place actuelle de l'irrigation

Après l'étude de **la recharge, qui n'est autre que le prélèvement en eau renouvelable**, qui alimente principalement les rivières et les aquifères, on se tourne vers **leur consommation, essentiellement l'irrigation**. On dispose pour cela de données sur les prélèvements effectués dans le monde, toujours estimés par *Huang et al.* (**Figure 25, figure de gauche**), et leur projection (toujours le

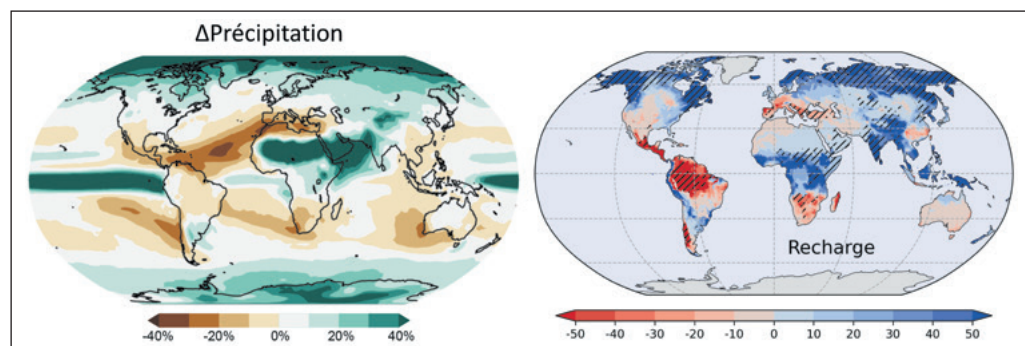


Figure 24

Prévisions des effets du changement climatique sur les précipitations et sur la ressource en eau souterraine pendant la période 1971-2100.

D'après IPCC, 2021 et Costantini *et al.*, 2025.

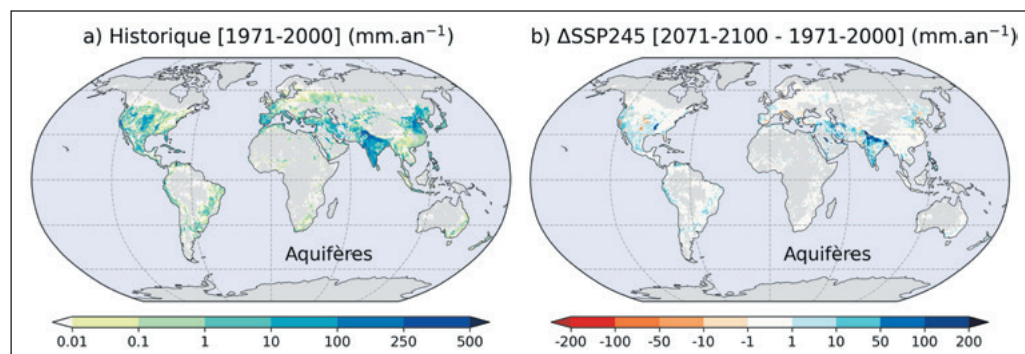


Figure 25

Estimations des prélèvements en eau 1971-2000 (*Huang et al.*, 2018) et projection 2071-2100 (*Khan et al.*, 2023).

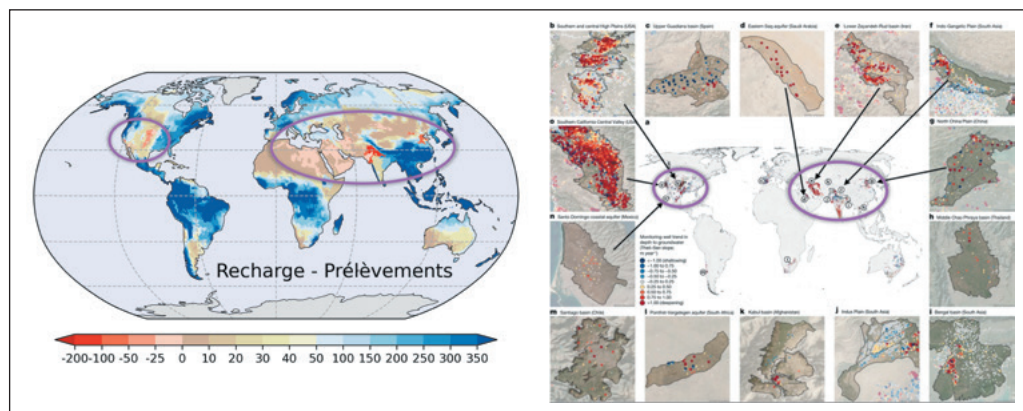


Figure 26

Bilan global des ressources en eaux souterraines : recharge naturelle moins les prélèvements (1971-2000).

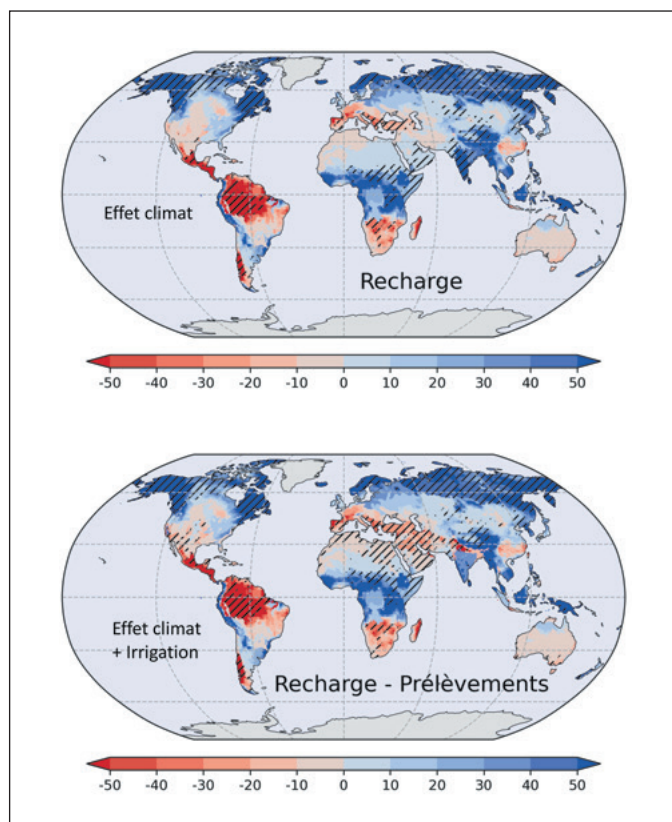


Figure 27

Cartes montrant l'effet de l'ajout de la prise en compte des prélèvements sur la ressource en eau.

futur moins le présent). On peut l'opposer aux prélèvements en eaux non renouvelables que l'on obtient en faisant la recharge moins les prélèvements (cf. [Figure 26](#)) estimés par un de leurs collègues ([Figure 25, figure de droite](#)). Le point capital est que ces prélèvements soit stagner, soit augmentent dans certaines parties du monde.

On peut opposer la recharge aux prélèvements en eau « non renouvelables » que l'on obtient en faisant la recharge moins les prélèvements en eau « renouvelable » ([Figure 26, figure de gauche](#)). Les zones rouges de la carte de la [figure 26, figure de droite](#) (le centre des États-Unis, l'Inde) correspondent à des zones où les prélèvements sont supérieurs à la recharge : on est en train d'épuiser les ressources. Ces données sont complètement en accord avec les observations effectuées aujourd'hui dans le monde avec l'Inde, qui est rouge, ainsi que l'est des États-Unis.

5.2. Estimation de la place de l'irrigation dans le futur

On sépare l'effet du changement climatique sur la ressource (*Figure 27, figure du haut*) de l'effet de l'irrigation cumulé avec celui du changement climatique (*Figure 27, figure du bas*). Comme précédemment, les zones rouges vont voir leurs ressources diminuer et les bleues augmenter. L'influence de ce couplage sur les prélèvements est importante à comprendre.

Il y a des zones, comme en Europe, sur le pourtour méditerranéen ou dans l'est des États-Unis, où **les prélèvements vont amplifier la diminution de la ressource en eau** initiée par le changement climatique, des zones où **les prélèvements vont limiter l'augmentation naturelle liée à l'accroissement**

des précipitations et enfin des zones où **les prélèvements vont inverser le signe des projections sur les ressources**. Dans ces zones, le changement climatique est à l'origine de plus de précipitations, donc de plus de ressources. Mais comme on va puiser de plus en plus d'eau, l'effet final sera une diminution de l'eau.

En résumé, on peut dire que, dans certaines régions du monde, l'effet des **prélèvements peut être supérieur ou égal à l'effet du changement climatique** et conduit à une restriction de la quantité d'eau disponible.

5.3. Bilan résumé sur les ressources en eau pour la période de 1971 à 2100

La *figure 28* retrace l'évolution de 1971 à 2100. On prend en compte les prélèvements

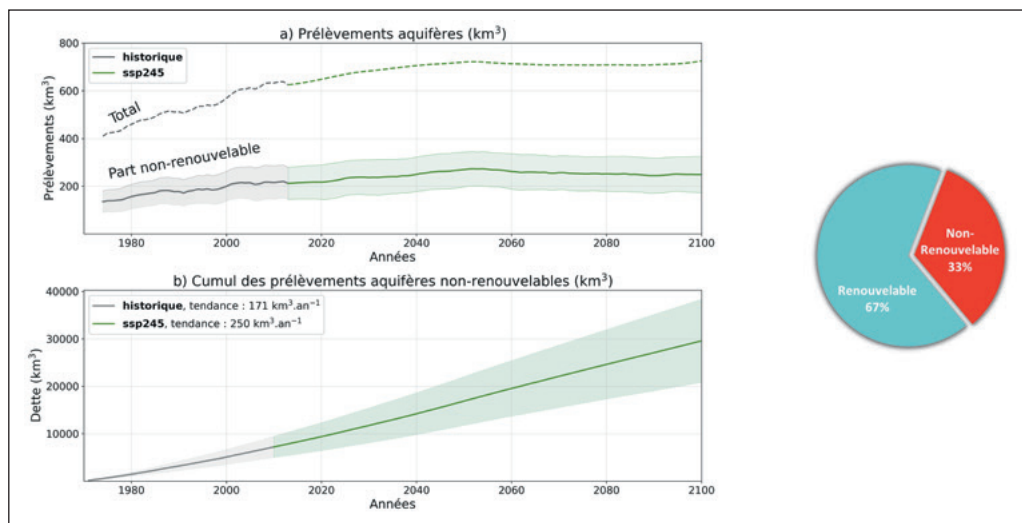


Figure 28

a) Évolution globale des prélèvements totaux et non renouvelables dans les aquifères de 1971 à 2020.
b) Dette hydrique à l'échelle mondiale.

D'après Costantini et al., 2025.

totaux dans les aquifères (cadre supérieur de la figure) et, dans le cadre inférieur de la figure, la part non renouvelable (*Figure 28*). Le résultat est que 33 % de l'eau prélevée à l'échelle mondiale est non renouvelable aujourd'hui en 2020 (*Figure 28, diagramme de droite*).

Le **bilan hydrique de la Terre** dans les années qui viennent est un accroissement global important des précipitations, mais également un accroissement des prélèvements en eau pour les besoins de l'humanité. Nous sommes donc en train de créer une **dette hydrique** à l'échelle mondiale.

Conclusion et perspectives

Les prélèvements en eau non renouvelable de notre planète se situent majoritairement dans les régions fortement irriguées, mais aussi, bien entendu, dans les régions où les précipitations sont faibles. À l'avenir, l'effet de ces prélèvements dans certaines régions pourrait être supérieur ou égal à l'effet du changement climatique, même si la ressource en eau mondiale doit augmenter. Aujourd'hui, **environ 33 % des prélèvements mondiaux liés à l'irrigation sont non renouvelables, et cela crée une dette hydrique** importante.

Les perspectives du travail résumé dans ce chapitre sont de faire prendre conscience qu'aujourd'hui, **dans les modèles climatiques, on ne modélise pas vraiment l'anthropisation du cycle de l'eau**. On suspecte même que certains comportements indispensables dans notre économie, comme la pratique de l'irrigation, pourraient avoir des rétroactions sur le système climatique. Il faut les étudier et, pour cela, il est indispensable de réussir à modéliser ces processus anthropiques dans les modèles climatiques de façon à affiner les résultats déjà obtenus et les préciser : revisiter le passé, aller dans l'avenir.

Il n'y a que les modèles qui nous feront progresser sur ces problématiques.

L'eau, un bien commun : enjeux et perspectives

D'après la conférence de Madame Euzen, directrice de recherche CNRS au LATTs, directrice adjointe de CNRS Écologie & Environnement et codirectrice du programme national « OneWater – Eau bien commun », formée en psychologie, en anthropologie, et en ingénierie et gestion de l'environnement. Elle est membre de divers conseils scientifiques, communautés de bassin et de nombreuses instances nationales et européennes. Elle a rédigé de nombreux ouvrages scientifiques sur l'eau, dont le dernier, Tout comprendre (ou presque) sur l'eau, vient de paraître aux éditions du CNRS.

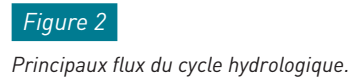
Introduction

Chacun a une perception de l'eau différente selon l'endroit où il se trouve (**Figure 1**), le moment dans sa vie, sa culture, la société dans laquelle il évolue. Cela aura une incidence sur la relation qu'il va établir avec cet élément précieux, auquel il va attribuer des valeurs, sacrées ou profanes. Chacun a donc un rapport à l'eau singulier qui renvoie à sa préservation, à ses usages par exemple, et qui aura une incidence sur la transmission de l'eau et de ses valeurs aux

générations futures et pour assurer la pérennité du vivant sur cette Terre.

La **figure 2** rappelle des aspects reliés au grand cycle de l'eau, car cette molécule circule, d'un compartiment à un autre.

L'interconnexion entre les différents compartiments fait que si, à un bout de la chaîne, on vient modifier quelque chose, cela aura une incidence ailleurs, à un endroit donné, à un moment donné. Cela peut avoir des effets majeurs sur la vie des sociétés.



Toutes les activités humaines sont présentes dans ces socio-hydrosystèmes complexes. Leurs impacts se mesurent de façon plus ou moins directe, plus ou moins visible et localisée, à travers le temps, les territoires et les sociétés. Les flèches en couleur jaune (**Figure 2**) montrent les interactions et les interconnexions entre les compartiments, et illustrent l'importance du rôle de l'eau pour la biodiversité et le vivant – non seulement l'humain, mais aussi les écosystèmes. Sans une bonne qualité de l'eau, sans une bonne qualité de l'environnement, les humains ne pourraient pas continuer à vivre.

La question n'est pas tant de savoir s'il y a suffisamment d'eau sur Terre pour tout le monde, mais où elle se trouve et quelle est sa disponibilité, en quelle quantité en fonction des besoins qui s'expriment ou qui peuvent se révéler à un moment ou à un autre. La **figure 3** illustre les inégalités de répartition de la ressource

à la surface de la Terre et en souterrain : elles ont nécessairement une incidence sur le développement des populations. Il est important de pouvoir estimer l'impact que les uns ou les autres vont pouvoir avoir sur cette ressource pour en assurer la continuité.

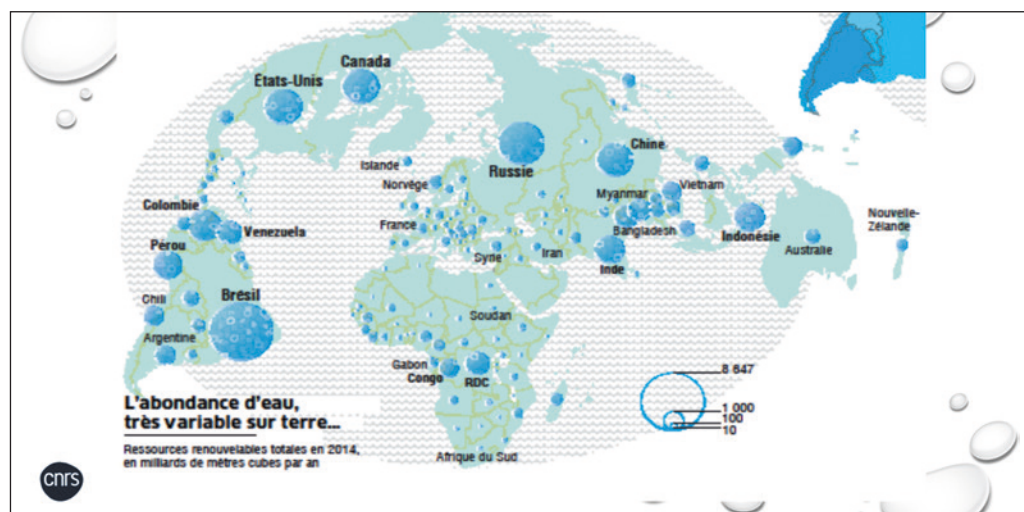
1 Enjeux climatiques et environnementaux : comprendre les dynamiques du changement global

L'évolution de la répartition de l'eau témoigne d'une dynamique de changement global corrélée à la façon dont la Terre se réchauffe depuis quelques décennies, ce qui n'est plus à démontrer.

La **figure 5** montre bien, aujourd'hui, que les trajectoires continuent à évoluer. Nous sommes dans un régime d'accélération de la vitesse d'augmentation de la température auquel il va bien falloir s'adapter, même si,

Figure 3

Variabilité de la répartition de l'eau sur Terre.



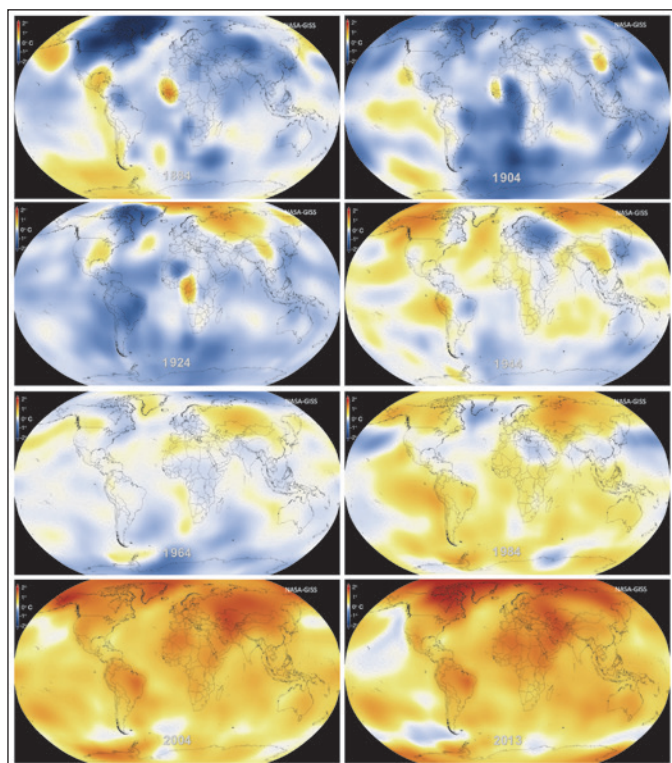
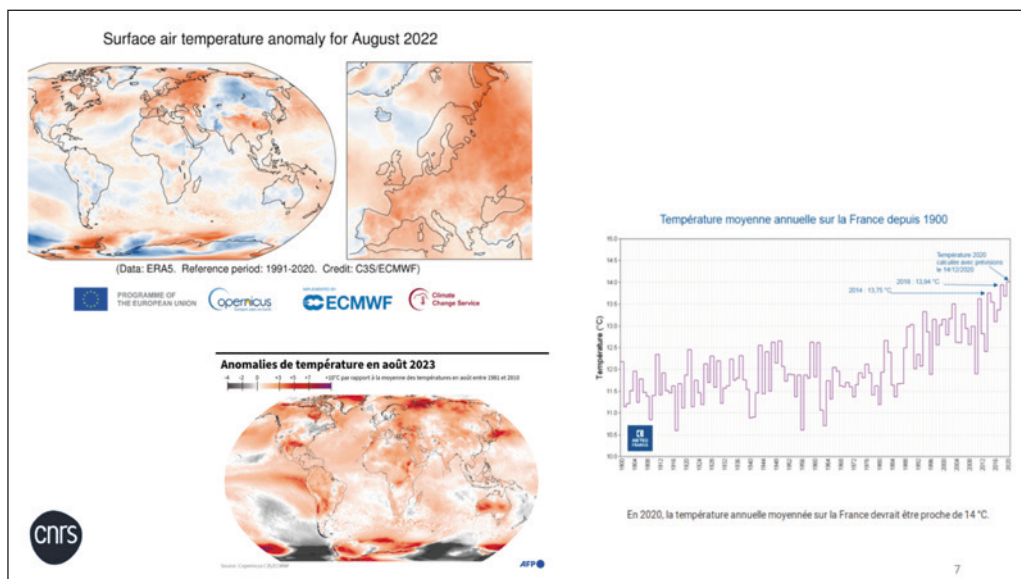


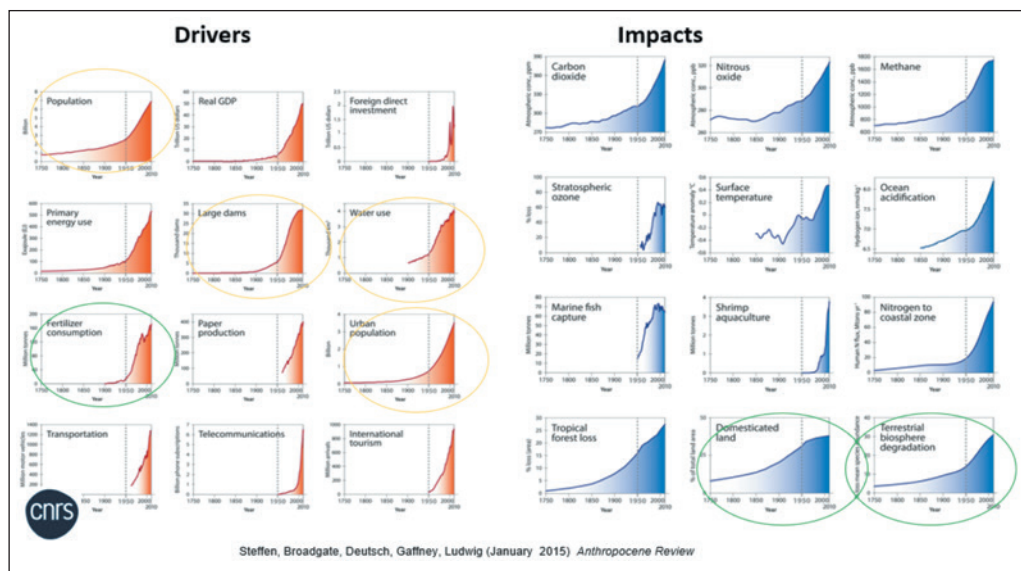
Figure 4

Température à la surface de la Terre par périodes de vingt ans (extrait d'une vidéo).

Figure 5

Température à la surface de la Terre en 2013 et évolution.





dimension cruciale à prendre aussi en compte, on pourra peut-être l'atténuer d'une manière ou d'une autre. De toute façon, il s'agit d'une problématique de changement global.

Les courbes de la **figure 6** expriment la croissance et l'accélération des activités humaines dans tous les domaines, notamment à partir des années 1950. Depuis cette période se manifeste une volonté de se déployer d'un point de vue économique dans tous les domaines (production de fertilisants, développement des transports, télécommunications...), et donc de l'usage de l'eau. Tout a et aura des impacts sur la qualité du milieu dans lequel on se trouve.

Toutes les observations montrent non seulement la pression des activités humaines sur l'environnement, mais aussi comment l'environnement répond et nous offre, ou pas, les services nécessaires pour continuer le développement.

Assurer le développement économique de chacun est évidemment un objectif idéal, mais jusqu'où cela sera-t-il possible ? Pourrons-nous aller au bout sans limite ?

On observe de façon aussi objective que possible les impacts des activités humaines, et plus particulièrement du dérèglement climatique, sur les socio-écosystèmes¹. On regarde notamment le cycle de l'eau, les problématiques d'évolution de la température, de dégradation de la pluviométrie, d'exacerbation des phénomènes extrêmes. On est frappés par ce que les événements récents nous ont montré, en France, en Espagne, mais aussi partout dans le monde, leurs fréquences et intensités jamais rencontrées, excessives et inattendues.

1. Socio-écosystème : système qui associe les êtres humains (société) et l'environnement naturel (écosystème). Ces deux parties interagissent et s'influencent mutuellement.

Figure 6

Les dynamiques de la société : croissance et impacts de l'activité humaine.

Notre «nature» semble en révolution : des modifications des systèmes, des dynamiques et des trajectoires extrêmement importantes deviennent chose courante. Elles auront des impacts sur les végétaux, complètement perturbés, au point de fleurir à des moments où on ne les voyait pas en fleurs auparavant, sur les animaux qui arrivent alors même que les premières herbes ne sont pas encore là... Alors, comment se nourrir ? Tout va devoir se déplacer. Des processus d'évolution sont déjà observables : le vivant s'adapte à de nouvelles conditions.

Évidemment, au premier chef, la question de la santé et de la sécurité des populations est posée par ces évolutions.

L'épisode du SARS-CoV-2 est là, comme par hasard, comme le marqueur des évolutions qui démarrent, ou comme la conséquence des interconnexions entre activités humaines et écosystèmes.

Pour se développer, il faut nourrir les populations, ce qui signifie avoir une activité agricole importante. Cela met au premier plan les questions de disponibilité de la ressource, de sa distribution en fonction des besoins qui vont évoluer ici, là-bas, ailleurs, aujourd'hui, et pour demain.

L'approche scientifique de ces questions a conduit à construire la notion de limites planétaires (Figure 7). Les 9 limites planétaires spécifiées définissent notre capacité à respecter le

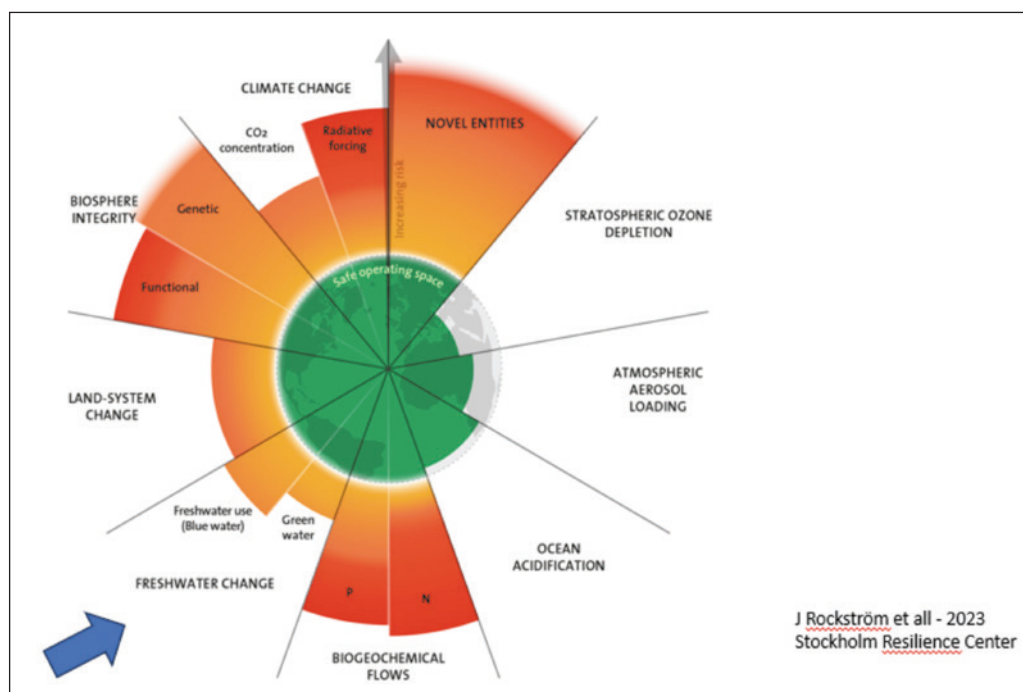


Figure 7

Dépassement des limites planétaires.

milieu, à nous servir de l'ensemble des services nécessaires pour nous développer et leurs limites, limites qu'il faut définir, évaluer et faire évoluer. Il est clair qu'il s'agit là d'un travail extrêmement global. C'est une approche qui reste théorique, mais qui va se décliner de façon totalement singulière selon les territoires et les localités.

Certains dépassements de limites ne vont jamais s'appliquer à certains endroits ou à certains moments, mais l'étude de ces situations doit nous servir de boussole pour nous interroger sur nos modes de production, nos modes de consommation et nos modes de développement. Et si l'aspect « évolutions physiques » de l'environnement est inséparable des activités humaines, il ne faut absolument pas le dissocier du rapport à la société et du développement économique.

Associer à ces programmes le travail de Rockström et de Raworth, comme le fait la **figure 8**, est donc absolument essentiel pour donner sa juste place au dialogue entre la société qui se développe et la disponibilité des éléments nécessaires à ce développement. On subit à la fois les limites à la disponibilité des éléments dont on a besoin pour se développer, et, simultanément, la capacité du milieu à résister aux pressions liées aux activités humaines. On se retrouve ainsi dans des systèmes d'inégalités extrêmement importantes avec une croissance urbaine qui est cause d'une demande en eau en des lieux où l'eau n'est pas toujours présente.

Depuis plusieurs décennies se met en œuvre, dans toutes les zones du monde, un accroissement considérable des populations urbaines ou de métropoles en des lieux

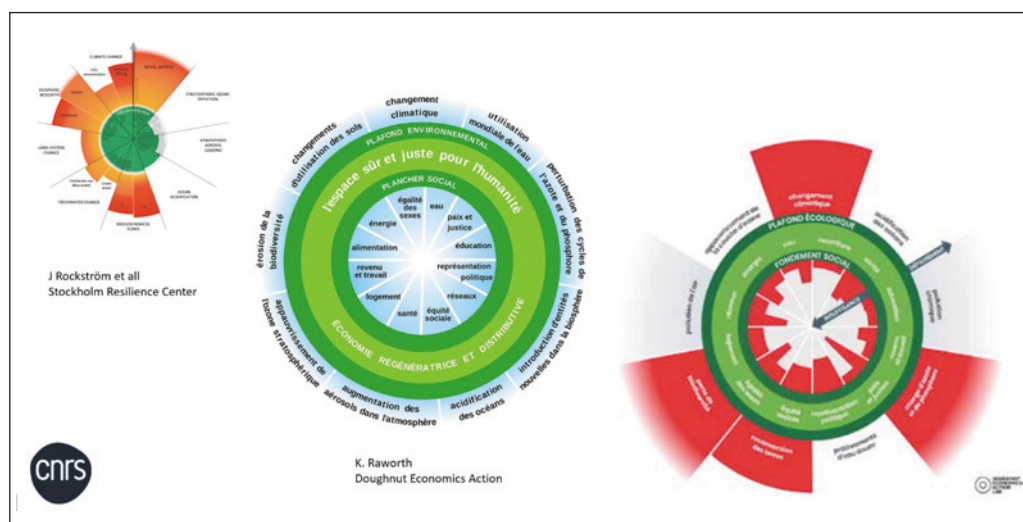


Figure 8

L'eau au cœur d'enjeux environnementaux et de société.

où l'eau est souvent peu présente. Comment, alors, régler la question de l'approvisionnement en eau, pourtant une priorité, puisque c'est cette eau que l'on boit et dont on connaît l'importance pour le vivant et pour l'humain ?

Devant l'urgence et la nécessité, le monde politique s'est sensibilisé et déjà partiellement organisé. La question de l'eau a été prise en charge à l'échelle internationale avec une première **décennie mondiale sur l'eau**. Le « **droit à l'eau** » a même été consacré comme valeur universelle et promu comme un **droit de l'homme**.

Il n'en reste pas moins qu'aujourd'hui, plus de deux milliards de personnes dans le monde, soit près de **25 % de la population, n'ont pas accès à l'eau courante**. Et quand il y a accès, c'est souvent dans des conditions sanitaires que l'on voudrait interdire. De la même manière, on se retrouve dans une situation où plus de 45 % de la population n'ont pas accès à un service d'assainissement viable. On ne peut pourtant pas dissocier le fait d'apporter de l'eau de la nécessité de l'évacuer. Il faut réaliser ce que cela veut dire de ne pas avoir accès à de l'eau gérée. Pour plus de la moitié, ces populations ont accès à un point d'eau à moins de trente minutes aller-retour. Pour d'autres, il leur faut plus de trente minutes. Pour d'autres encore, il y a bien un point d'eau présent à proximité, mais dont on n'assure pas la qualité puisqu'elle n'est pas mesurée. En France métropolitaine, et davantage encore en France ultramarine, on est également touchés par

ces problématiques d'accès à l'eau par les populations plus vulnérables, ou par des systèmes de réseau inexistantes ou qui ne sont pas suffisamment entretenus.

Ces considérations techniques conduisent tout de suite au problème social. On ne peut pas poser la question de la disponibilité en eau sans poser celle du partage de cette ressource, des valeurs qu'on va lui attribuer, et ce, à tous les niveaux, à tous les étages.

2 Vers une « eau bien commun »... dans les textes et dans la pratique

Depuis 1977, un grand nombre de conférences internationales ont établi comme un droit la possibilité d'avoir accès à une eau potable. C'est un fait, c'est important et cela concerne l'ensemble des États. La conférence internationale de Dublin est allée un peu plus loin en attribuant une valeur économique à l'eau. Cet aspect est intrinsèquement délicat et interroge sur le « caractère commun » ; tout au moins, c'est une façon de la considérer pour lui attribuer des usages et des bénéfices. Introduire des impératifs de « répartition équitable » rencontre de nouveau une forme de contradiction qui est la conséquence de l'extrême diversité des populations de la planète.

À l'échelle européenne, nous disposons de la **directive-cadre sur l'eau** dont on connaît un certain nombre d'éléments, notamment les mesures, les normes, les limites réglementaires. Elle permet de réaliser que l'eau n'est pas un

bien marchand géré selon le critère économique, mais un patrimoine vulnérable qu'il faut protéger.

En France, **la première loi sur l'eau date de 1964**. Elle a permis d'associer, autour du fameux « Parlement de l'eau », les commissions locales de l'eau qui réunissent la diversité des acteurs d'un bassin versant², pour gérer l'eau ensemble, la préserver, garantir les usages et en assurer la continuité. Cela a été renouvelé pour la loi de 1992 sur l'eau qui a rétabli le statut de l'« **eau, patrimoine commun de la Nation** ». Cette disposition confirmait la logique de partage de cette ressource, en reconnaissant la valeur qu'elle pouvait avoir sans pour autant intégrer nécessairement les dimensions qualitatives de cette ressource. Elle n'insistait pas non plus sur le fait qu'elle pourrait devenir limitée, ou en tout cas vulnérable, selon la situation des prélèvements et au regard de sa capacité à se renouveler.

En 2006, dans le code de l'environnement, on voit là aussi la notion de patrimoine commun, la notion de cette eau commune. Cette valeur qu'on lui accorde s'ancre donc également dans les réglementations, ce qui implique un rapport spécifique à cette ressource et à sa gestion, au niveau de l'ensemble des acteurs, au niveau des grands ou des plus petits bassins, ou au niveau national.

La puissance des mécanismes réglementaires ou administratifs mis en place trouve sa vraie justification dans les **situations extrêmes de sécheresse, d'inondations**. Lorsqu'on a besoin de devoir partager l'eau, de devoir choisir entre un usage et un autre, un intérêt, un acteur, comment ce qu'on a mis en place peut-il finalement être appliqué ? La réponse à ces situations est collective ; elle nécessite de nouveau des réflexions et des actions « en se réunissant autour de la table », mais cette fois avec un souci plus fondamental du bien commun, de l'intérêt collectif, et pas seulement en voulant défendre son propre intérêt.

Bien sûr, ces questions sont excessivement difficiles à traiter : pour chacun, l'eau est le moyen de survivre, et chacun met sa communauté en priorité. Rien ne peut se faire sans une attitude de recul : au bénéfice de qui ? Pour combien de temps ? Au détriment de qui cette mesure est-elle décidée ? Cela pose réellement des enjeux de territoires, des enjeux socioéconomiques, des enjeux politiques, des enjeux pour la biodiversité, car, si je prends toute l'eau pour mon activité et qu'il n'en reste plus dans les rivières pour la biodiversité, cela aura un impact sur tous les partenaires... On dit bien que **la biodiversité, c'est l'assurance-vie**.

La gestion de l'eau est en fait **une question de santé publique**. Les problématiques d'inondation ou de sécheresse, tous les événements climatiques que l'on a pu rencontrer le mettent en évidence, de même que le Covid. On parle aussi de questions de sécurité

2. Bassin versant : zone géographique dans laquelle toutes les eaux de pluie ou de ruissellement convergent vers un même point, généralement un cours d'eau, un lac ou une mer (ex. : la Seine et ses affluents).

à une échelle plus large, pas si loin de chez nous, où détruire des infrastructures, même si c'est interdit à l'échelle internationale, peut avoir une incidence sur des populations, des territoires et des enjeux de paix. Vitale dans les socio-écosystèmes, l'eau est vraiment au cœur du développement des territoires et des sociétés. **Elle est, pour tous, cette valeur précieuse indispensable à protéger.**

Pour approvisionner en eau les populations, assurer les services essentiels, on fait référence au petit cycle de l'eau, à la préservation de la qualité de l'eau brute avant même de la traiter. On peut faire des économies si on n'a pas à la traiter. Maintenir les infrastructures, développer les réseaux et en assurer le meilleur rendement est aussi une façon d'assurer la sécurité des populations. Mais il est également nécessaire, à une plus grande échelle, de protéger les écosystèmes, le bon état écologique, et de limiter la dégradation des eaux brutes. Faire évoluer les pratiques, en mettant en place des dispositifs qui permettent de réduire les pollutions, implique un ensemble d'actions essentielles pour préserver la qualité de l'approvisionnement en eau au bénéfice de tous.

Cela justifie la nécessité de réfléchir collectivement aux réponses les plus adaptées : c'est un contexte qui évolue en permanence, pour favoriser une dimension plus appropriée, viable et durable. Il faut aller vers de nouveaux usages, s'interroger sur l'impact d'une nouvelle pratique, sur le territoire, sur les acteurs en aval,

les ressources au niveau des têtes de bassin, mais aussi celles qui sont invisibles. Il faut faire évoluer les modes de gouvernance de l'eau³, essayer d'avoir une meilleure gestion de cette ressource, et qui doit donc être prise en charge à toutes les échelles de décisions et de territoires.

Il s'agit de changer de paradigme⁴. Il ne faut plus considérer l'eau comme abondante, illimitée, comme une ressource dont on peut bénéficier, jouir, de façon infinie, mais nous mettre à son service. Cette nouvelle attitude change complètement notre rapport à l'environnement et la façon dont on peut améliorer nos coexistences. Cela peut être source de créations, de nouveaux process, de nouveaux systèmes de répartition des ressources, à partir des pratiques traditionnelles, des connaissances très fines des territoires par les acteurs qui peuvent s'y développer. **Considérer l'eau comme un bien commun, et donc la partager, est une des pistes pour assurer la continuité du vivant sur Terre.**

La **figure 9** représente le cycle de l'eau en mettant en relief les dynamiques du développement durable. Elle montre

3. Gouvernance de l'eau : l'ensemble des règles, institutions et processus mis en place pour gérer et partager les ressources en eau de manière durable et équitable.

4. Paradigme : en sciences, cadre théorique ou modèle dominant à une époque donnée, à partir duquel les scientifiques abordent leurs recherches. Un changement de paradigme survient lorsqu'une nouvelle théorie ou un nouveau modèle remplace l'ancien, car il explique mieux les phénomènes observés.

bien toutes les interconnexions entre les compartiments, les eaux de surface, les océans, l'atmosphère, les eaux souterraines, les eaux

qui ruissellent, les interactions avec l'ensemble des activités humaines. Elle pose comme une évidence tous les bénéfices associés à la bonne santé de



Figure 9

Interconnexion des Objectifs de développement durable au cœur du socio-hydrosystème.



Figure 10

Programme «OneWater – Eau bien commun».

l'environnement pour que les populations humaines vivent dans les meilleures conditions pour le bien-être de tous.

3 Le programme national de recherche «OneWater – Eau bien commun»

C'est cette transformation culturelle, théorique et pratique qui est la **mission du programme national de recherche «OneWater – Eau bien commun»**, que j'ai le plaisir de codiriger avec Alain Dupuy, pour le BRGM (qui a écrit le chapitre sur les eaux souterraines) et Thibault Datry pour l'INRAE. Ce programme, qui vise à réhabiliter l'eau comme un bien commun, va durer dix ans. Nous avons la chance de disposer d'un budget plutôt conséquent, mais, on l'aura compris, c'est pour répondre à des enjeux considérables.

Pour les scientifiques et les acteurs des territoires, «OneWater» est une grande chance : avoir à approfondir les connaissances pour promouvoir l'eau au niveau de «bien commun» demande de mettre à jour les connaissances existantes et de les compléter par de nouvelles. Harmoniser tout cet ensemble est une approche très pluridisciplinaire et très constructive. Tout ce travail accompagnera **les nécessaires évolutions des modes de gouvernance inspirées par l'évolution des réglementations initiales**, conséquence des progrès de la formation et des résultats de la science.

Nous avons organisé ce programme de recherche autour de six grands défis :

1. **Anticiper.** C'est mieux connaître la capacité du milieu à se renouveler en fonction de la variabilité des précipitations⁵ et des modes de pression. Par exemple, on mesure l'humidité des sols et les stocks d'eau selon différents niveaux et différents types de sols par des lysimètres⁶, puis on croise les résultats avec des modèles hydroclimatiques⁷. Ces liens avec des données plus globales dégagent des tendances, des trajectoires et des réalités de terrain sur la réaction du milieu à mettre en lien avec les usages.

2. **L'empreinte eau**⁸. On parle souvent de l'empreinte de l'eau à l'échelle internationale : l'eau qui va être utilisée pour élaborer le coton, par exemple. On suit son empreinte, ainsi que celle des activités humaines, qui est révélatrice de la qualité du milieu et de la façon dont il va rétroagir⁹. Ici, l'empreinte vise à croiser des questions quantitatives et qualitatives de l'eau.

3. **L'eau sentinelle.** À partir du moment où elle est en contact

5. Précipitations : toute forme d'eau qui tombe de l'atmosphère, comme la pluie, la neige ou la grêle.

6. Lysimètre : appareil qui permet de mesurer l'humidité du sol et l'évapotranspiration, c'est-à-dire la perte d'eau due à l'évaporation et à la transpiration des plantes.

7. Modèles hydroclimatiques : modèles qui combinent des données hydrologiques (eau) et climatiques (températures, précipitations).

8. Empreinte eau : mesure la quantité d'eau douce consommée pour produire un bien ou un service, directement ou indirectement.

9. Rétroagir : fait qu'un phénomène ou une action provoque une réponse ou une conséquence, qui, à son tour, influence le phénomène initial.

avec quelque chose, l'eau s'en imprègne et devient révélatrice d'un certain nombre d'usages, d'activités, mais aussi d'états de santé : elle prend alors le nom d'«eau sentinelle». Elle est porteuse de messages sur la santé de l'environnement et la santé humaine qu'il vaut mieux comprendre.

4. **Adaptation et résilience.**

L'ensemble des paramètres qui déterminent les différents états de l'eau présente sur Terre est marqué par une instabilité ou, en tout cas, un caractère dynamique dominant, conduisant à des situations d'accélération. Il serait présomptueux de vouloir tout maîtriser dans ces situations de changement global : il faut plutôt s'adapter, et cela revient à **actionner différents types de réponses, techniques, gouvernance**, solutions fondées sur la nature, et à apprécier si l'on peut en associer de nouvelles ou en imaginer d'autres en fonction de la diversité des territoires.

5. La question de la **transition socioécologique**¹⁰ est fondamentale pour construire un dialogue avec les différents acteurs, et exploiter les connaissances scientifiques, mais aussi plus empiriques, pour parvenir à une meilleure compréhension des processus, des phénomènes, et de notre capacité à les prendre en charge. Cela permet de **développer de nouveaux processus de gouvernance** qui mobilisent les efforts de chacun.

10. Transition socioécologique : processus de transformation visant à adapter les sociétés pour répondre aux défis écologiques, comme le changement climatique ou la gestion durable des ressources.

6. **Partage de données.** Pour déployer ces grands défis, on s'appuie sur un certain nombre de projets ciblés qui réunissent la base des connaissances nécessaires pour réussir. Il en est ainsi du projet ALIQUOT, qui a été présenté pour améliorer notre connaissance de l'évolution de la qualité de l'eau, notamment en utilisant l'ADNe.

Au démarrage, on s'appuie sur des dispositifs d'observation qui existent déjà, les zones à ateliers, observatoires hommes-milieus, observatoires de la zone critique..., pour certains, depuis 40 ou 50 ans, mais qu'il s'agit de remobiliser pour répondre aux questions actuelles. On conserve d'abord les points de vue disciplinaire, scientifique ou sectoriel, mais on veut aussi **implanter une approche systémique et intégrée rendue nécessaire par la diversité des enjeux et des impacts**. Dans ces actions, on met l'accent sur la formation par la recherche des jeunes pour les sensibiliser aux nouvelles approches de partage des connaissances.

Un **comité scientifique international**, ainsi qu'un «think tank», constitue une connexion permanente sur le déploiement des recherches conduites par les scientifiques avec les acteurs des territoires impliqués de plus ou moins près dans la gestion de l'eau. Il nous aide en favorisant des coopérations internationales, notamment à l'échelle européenne, dans le cadre d'un alignement entre des équipes scientifiques et des parties prenantes à toutes les échelles.

Conclusion

Ne soyons tout de même pas naïfs : **les enjeux scientifiques sont en connexion directe avec des enjeux de territoires**. Il s'agit de considérer les services et les usages de l'eau dans une approche interbassins¹¹, intersectorielle, d'avoir une approche holistique s'appuyant à la fois sur des réalités et des exemples en France métropolitaine et en contexte ultramarin. Tous les participants œuvrent en fonction de cette logique d'accompagner les transitions nécessaires (*Figure 11*).

Mais le fil conducteur doit être le changement de paradigme auquel tous adhèrent : **se mettre au service de l'eau**, la réhabiliter pour ce qu'elle est et **ne plus la considérer comme illimitée et abondante**.

Ceci est vraiment notre leitmotiv !

11. Interbassins : interactions ou échanges entre différents bassins versants, comme les transferts d'eau d'une région à une autre.



Figure 11

Partie 2

Eau et innovation

Les micropolluants organiques : méthodologies innovantes pour mieux les explorer dans les rejets et les milieux aquatiques

*Madame Miège est directrice de recherche en chimie environnementale à l'INRAE. Ses travaux contribuent à produire des connaissances sur **les sources, l'occurrence et le devenir des micropolluants organiques dans les milieux aquatiques**. Elle développe **des outils et des stratégies innovants** pour permettre, **sur le terrain**, un échantillonnage représentatif dans le temps et, **dans le laboratoire**, des analyses moléculaires ciblées et non ciblées par chromatographie et spectrométrie de masse.*

Monsieur Ducrocq est docteur en chimie environnementale. Ses travaux consistent à développer des méthodes d'analyses non ciblées par spectrométrie de masse à haute résolution, appliquées à des échantillons environnementaux pour explorer la diversité moléculaire des contaminations. Son expertise porte en particulier sur le développement de workflows pour le traitement de grands jeux de données avec des outils et logiciels en libre d'accès (transparents et évolutifs).

Introduction

Les micropolluants organiques : définition

Les micropolluants sont des molécules issues de la synthèse industrielle que l'on retrouve, malheureusement, dans l'environnement, dans les différents compartiments, comme l'eau, les sols et l'air. Ils ont une action polluante à des concentrations infimes, une action toxique ou écotoxique¹ pour tout ou partie des organismes ou écosystèmes.

On entend maintenant beaucoup parler de ces micropolluants dans les médias, en particulier de leur présence dans les milieux aquatiques. Il s'agit de tensioactifs² dans les lessives, de retardateurs de flamme³, comme les PCB sur nos tissus pour limiter les départs de feu, sur nos canapés..., ou encore de pesticides⁴ dans nos jardins. On consomme aussi des produits pharmaceutiques qui ne sont

pas parfaitement métabolisés et que l'on peut retrouver dans les eaux usées, on y retrouve également des hormones, des agents humectants, des filtres UV⁵, des cosmétiques, des colorants, des conservateurs issus des matrices alimentaires...

Notion de limites planétaires

En 2009, un groupe de chercheurs internationaux a mis en avant 9 domaines potentiellement dangereux pour l'environnement et dont il fallait suivre la progression en définissant des « limites planétaires » à ne pas franchir.

Le présent chapitre concerne la limite qui correspond à la pollution chimique, c'est-à-dire à l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère. Depuis 2022, elle correspond à la 5^e limite planétaire⁶ franchie sur les 9 limites définies (*Figure 1*). On peut d'ailleurs voir sur la *figure 1* que l'on a dépassé en la matière la limite verte (la limite d'espace de vie protégé et préservé), et que l'on est dans la zone orange, donc dans un risque accru pour la santé de l'environnement et des êtres humains.

La pollution chimique est difficile à quantifier, mais on évalue à 350 000 le nombre de produits chimiques qui sont mis sur le marché, dans le

1. Écotoxique : propriété d'une substance chimique qui cause des dommages aux écosystèmes, c'est-à-dire aux communautés d'êtres vivants et à leurs interactions avec leur environnement.

2. Tensioactifs : composés chimiques utilisés dans les produits comme les lessives, qui permettent de mélanger l'eau et les graisses pour nettoyer plus efficacement.

3. Retardateurs de flamme : substances chimiques appliquées sur des matériaux (comme les tissus) pour réduire leur inflammabilité. Exemple : les PCB (polychlorobiphényles), interdits depuis 1987.

4. Pesticides : produits chimiques utilisés pour tuer ou contrôler des organismes nuisibles comme les insectes, les mauvaises herbes ou les champignons.

5. Filtres UV : substances présentes dans les cosmétiques comme les crèmes solaires pour protéger la peau des rayons ultraviolets du soleil.

6. Limite planétaire : concept scientifique définissant les seuils à ne pas dépasser pour garantir la stabilité de l'environnement terrestre et la sécurité humaine.

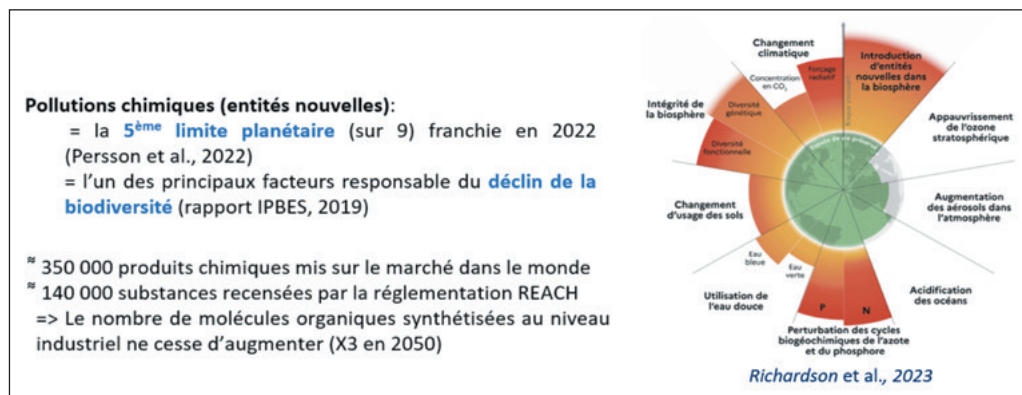


Figure 1

Illustration des 9 limites planétaires de protection de l'environnement. Sur sa partie verte, le diagramme montre les 9 domaines identifiés : leur évolution est marquée en couleur orange.

monde – un chiffre imprécis, mais sûrement très élevé. On évalue aussi à 140 000 le nombre de substances qui sont recensées par la réglementation REACH⁷ qui recense les molécules et les risques associés, et permet éventuellement d'en limiter les usages. Quoi qu'il en soit, ce nombre, même s'il est variable, et bien qu'il existe différentes méthodes pour l'évaluer, est grand. Il ne cesse d'augmenter et il est prévu qu'il soit encore triplé d'ici 2050.

Pour ce qui concerne les milieux aquatiques, une surveillance réglementaire est mise en œuvre avec la directive-cadre sur l'eau (DCE⁸).

7. Réglementation REACH : réglementation européenne sur les produits chimiques, qui impose aux entreprises d'évaluer et de gérer les risques liés aux substances qu'elles produisent ou importent.

8. Directrice-cadre sur l'eau (DCE) : règlement européen visant à protéger les ressources en eau (rivières, nappes phréatiques, lacs) et à surveiller les substances dangereuses présentes dans l'eau.

Elle est basée sur des listes de substances prioritaires⁹, ainsi que sur des listes de substances émergentes¹⁰ qui seront éventuellement priorisées si jamais on se rend compte qu'elles sont dangereuses.

Ces listes vont couvrir à peu près une centaine de substances, loin des chiffres énoncés juste avant. Et il y a aussi beaucoup de substances inconnues, parce qu'il y a des résidus de production industrielle, ou parce que, une fois dans les milieux, ces substances peuvent se dégrader, se transformer en d'autres

9. Substances prioritaires : substances chimiques identifiées comme particulièrement dangereuses pour l'environnement et la santé, et qui nécessitent une surveillance et une réglementation spécifiques.

10. Substances émergentes : nouvelles substances chimiques détectées dans l'environnement, pour lesquelles les risques ne sont pas encore totalement connus mais qui pourraient devenir pré-occupants.

substances. La directive-cadre sur l'eau est donc en constante évolution : les listes sont mises à jour en fonction des connaissances qui évoluent. Pour explorer ces contaminations, on développe des outils d'échantillonnage et d'analyse, lesquels sont également transférés, quand ils sont suffisamment mûrs, pour améliorer cette surveillance réglementaire.

1 L'échantillonnage sur le terrain : vers une représentativité temporelle améliorée

1.1. Les échantillonneurs intégratifs passifs (EIP)

Le premier outil, présenté ici, sert à améliorer l'échantillonnage des micropolluants dans les eaux. Un des défis à relever est d'être représentatif dans le temps. Une solution serait

de multiplier les échantillons, mais cela multiplierait les coûts. Des outils qui intègrent la contamination dans le temps ont été mis au point : **ce sont les échantillonneurs intégratifs passifs (EIP¹¹)**.

Le POCIS¹² est un exemple d'échantillonneur passif. Cet EIP comprend une phase réceptrice, maintenue en sandwich entre deux membranes poreuses et enserrée par deux anneaux métalliques (**Figure 2**). Le POCIS est placé dans l'eau où il est exposé

11. Échantillonneur intégratif passif (EIP) : dispositif utilisé pour capturer et concentrer les micropolluants présents dans l'eau sur une longue période, sans utiliser d'énergie active comme des pompes.

12. POCIS : Polar Organic Chemical Integrative sampler. Type d'échantillonneur passif conçu pour collecter les micropolluants hydrophiles (qui aiment l'eau), comme certains pesticides et médicaments.



Figure 2

Schéma et photographie d'un EIP (échantillonneur passif intégratif) : le POCIS.

jusqu'à quatorze jours. Les micropolluants présents dans l'eau migrent et s'accumulent à l'intérieur de l'EIP par diffusion chimique passive. Pas besoin de pompe, pas besoin d'énergie : cela se fait tout seul via un phénomène de gradient de concentration et d'affinité pour la phase réceptrice.

Après quatorze jours dans les rivières (durée classique d'exposition), le POCIS est ramené au laboratoire, où l'on analyse les molécules qu'il contient. Au préalable, le POCIS a été calibré par des expérimentations en laboratoire, pour déterminer des cinétiques d'accumulation pour chaque micropolluant et des taux d'échantillonnage. Au final, à partir des concentrations mesurées dans le POCIS, il est possible de recalculer des concentrations moyennées

sur la durée d'exposition dans l'eau. On arrive donc à des résultats comme : « Sur les quatorze jours d'exposition, il y a 10 ng/L dans l'eau en moyenne pour telle substance, etc. »

Il y a une multitude de variantes de ces dispositifs (**Figure 3**) pour capter le large panel de molécules qui existent. Ainsi, pour les molécules hydrophiles¹³, à gauche, on utilise par exemple les POCIS, qui sont bien adaptés pour capter des produits pharmaceutiques et des pesticides polaires ; pour les molécules les plus

13. Hydrophile : qualité des substances qui ont une affinité avec l'eau, c'est-à-dire qui s'y dissolvent ou s'y mélangent facilement. Elles sont caractérisées par un coefficient de partage entre octanol et eau (K_{ow}) qui est faible ($\log K_{ow} < 3$).

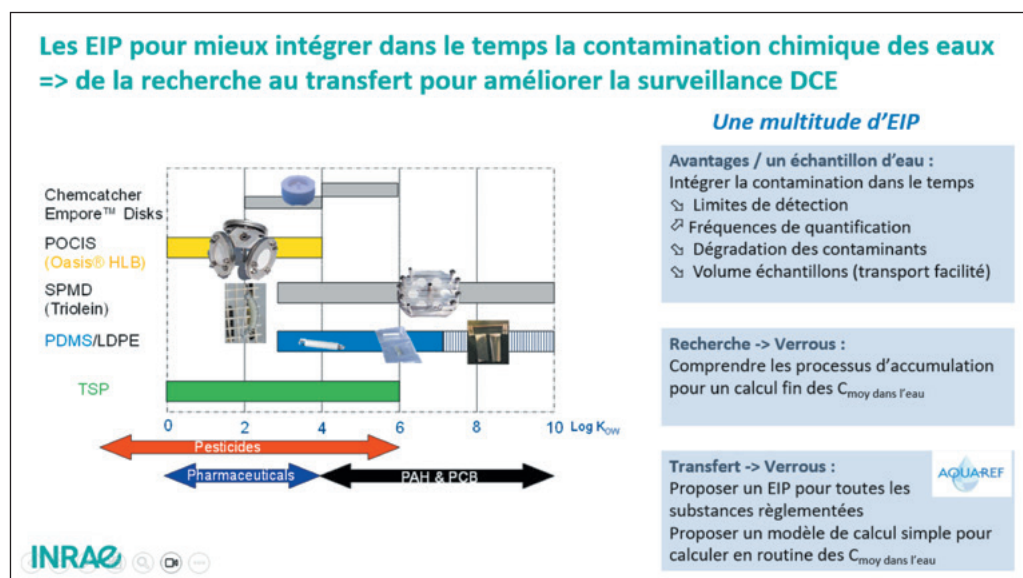


Figure 3
La diversité des EIP pour capter le large panel de micropolluants en fonction de leur hydrophilie ou hydrophobie (mesurée par leur K_{ow} : coefficient de partage entre octanol et eau).

hydrophobes¹⁴, à droite, comme les PCB, les PAH¹⁵, on utilise par exemple des membranes en silicone. Dans les eaux souterraines prélevées *via* des piézomètres, les EIP utilisés sont nécessairement de tailles plus petites, comme les Chemcatcher ou les TSP (tiges en silicone polaire).

Les EIP permettent non seulement d'intégrer la contamination dans le temps, mais aussi d'abaisser les limites de détection, et donc d'augmenter les fréquences de quantification de tous ces contaminants. Comme les mesures ne se font pas dans l'eau mais dans les EIP, cela limite la dégradation des molécules piégées, ainsi que le volume et le poids des échantillons. Incidemment, cela facilite le transport pour des campagnes de prélèvement éloignées.

Les EIP ont été étudiés en recherche et développement depuis plus d'une vingtaine d'années. Le défi en recherche consiste à comprendre les processus d'accumulation de façon « fine », et à proposer des modèles mathématiques pour expliquer tous ces processus et recalculer de la façon la plus précise possible la concentration moyennée dans l'eau sur la durée d'exposition.

14. Hydrophobe : qualité des substances qui n'ont pas d'affinité avec l'eau, c'est-à-dire qui ne s'y dissolvent pas ou très peu (exemple : huiles). Elles sont caractérisées par un coefficient de partage entre octanol et eau (Kow) qui est élevé ($\log Kow > 3$).

15. PAH : composés chimiques formés lors de la combustion de matières organiques (charbon, pétrole) et souvent toxiques pour l'environnement.

Après une vingtaine d'années de recherche sur ces outils, ils ont pu être transférés pour la surveillance réglementaire. Cela a été organisé avec Aquaref, le laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques. Il s'agissait de proposer un EIP pour chaque substance réglementée, et de simplifier les modèles de calcul de la concentration moyenne dans l'eau pour que ces EIP soient utilisables en routine par tous les acteurs de la surveillance.

1.2. Démonstration de la pertinence des EIP pour la surveillance réglementaire des eaux – exemple du POCIS

Un avantage des POCIS est d'abaisser les limites de quantification des substances. Le défi est plus difficile avec des substances hydrophiles qu'avec des substances hydrophobes ; il s'agit de trouver des phases qui permettent de les piéger et de les concentrer *in situ* pour, *in fine*, améliorer les seuils de quantification au laboratoire.

La **figure 4** montre que, pour les substances réglementées, le facteur d'abaissement des seuils de quantification entre échantillonnage par POCIS *versus* échantillonnage ponctuel d'eau varie entre 1,5 et 25, ce qui permet de beaucoup mieux voir la contamination.

À titre d'exemple, le graphe de la **figure 5** illustre le suivi du Tébuconazole, un pesticide, dans la rivière du Gier (Rhône), au sud de Lyon. Pendant une année, nous avons mené en continu des campagnes successives d'échantillonnage de

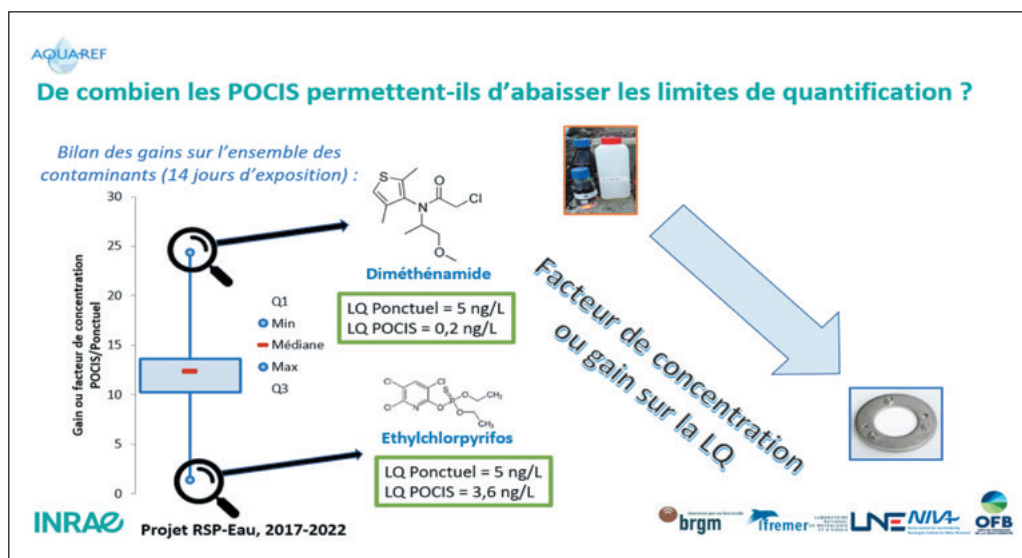


Figure 4

Échantillonnage par POCIS versus échantillonnage ponctuel d'eau : amélioration des limites de quantification (LQ) des micropolluants.

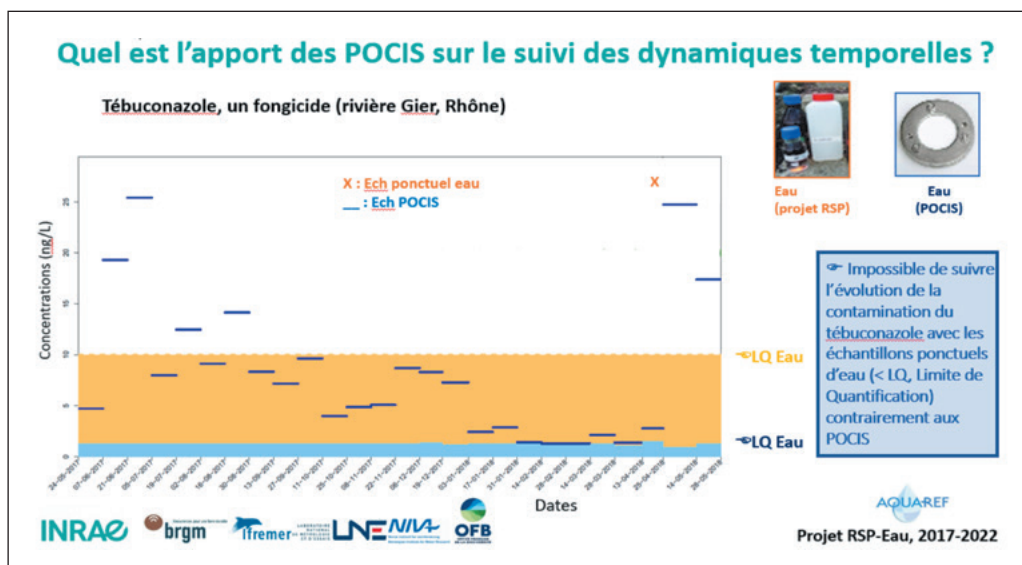


Figure 5

Graphique montrant la mesure du Tébuconazole dans l'eau du Gier (Rhône) pendant un an.

quatorze jours. Les résultats avec l'échantillonnage par POCIS sont figurés par les traits bleus. La limite de quantification dans l'eau obtenue pour le Tébucanazole avec les POCIS se situe aux alentours d'un nanogramme par litre, alors qu'avec les échantillonnages ponctuels d'eau, elle est 10 fois plus élevée (10 ng/L).

Au final, avec les échantillons d'eau, on ne peut absolument pas suivre la dynamique temporelle de contamination par le Tébucanazole, puisqu'il n'est quantifié qu'une seule fois (dans l'échantillon ponctuel d'eau du 25 avril 2018). Dans tous les autres échantillons ponctuels d'eau, soit on est en dessous de la limite de quantification de 10 ng/L, soit on a prélevé à un moment où la contamination n'était pas suffisamment élevée pour être détectée.

Pour en savoir plus, le site web d'Aquaref (*Figure 6*) rassemble divers documents afin de faciliter le transfert de ces outils : avec des guides

pour les utiliser sur le terrain, des guides pour les analyser dans les laboratoires, des calculateurs pour évaluer les concentrations moyennes des micropolluants dans l'eau¹⁶. Sur ce site web sont aussi disponibles des supports de formation, ainsi qu'un rapport de synthèse sur l'étude menée au niveau national pour démontrer leur pertinence pour la surveillance réglementaire¹⁷.

Ces outils sont maintenant inscrits dans la réglementation française, plus précisément dans l'arrêté de surveillance des rivières et des eaux côtières (en date du 26 avril 2022). Les POCIS sont donc conseillés pour les molécules polaires, et les membranes en silicone pour les molécules apolaires.

16. <https://www.aquaref.fr/chimie/eip-echantillonnage-integratif-passif>

17. <https://www.aquaref.fr/surveillance-prospective-evaluation-pertinence-echantillonneurs-integratifs-passifs-eip-surveillance-0>



Figure 6

Présentation de la plateforme web Aquaref.

2 Méthodologies d'analyses moléculaires pour explorer les rejets et les milieux aquatiques

Les méthodologies présentées dans ce paragraphe concernent les analyses moléculaires en laboratoire. Les échantillons collectés sur le terrain (e.g. des échantillons passifs, des eaux, des sédiments, des poissons...) sont rapportés au laboratoire, où ils sont analysés pour déterminer les molécules qu'ils contiennent.

Dans ce paragraphe, nous présentons les stratégies d'analyses « non ciblées » qui utilisent des techniques de chromatographie couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (HRMS) (**Figure 7**). Le but de ces stratégies est d'élargir la liste des molécules étudiées par rapport à des stratégies « ciblées », en explorant les échantillons sans *a priori*, c'est-à-dire en prenant en compte toute l'information produite par les instruments d'analyse et en essayant de comprendre à quelles molécules elle correspond.

Ces travaux ne sont pas encore au stade du transfert pour la surveillance réglementaire, mais ils sont au stade de recherche et développement. Le verrou à lever est le développement de *workflows*¹⁸, c'est-à-dire des étapes successives pour trier et interpréter l'énorme quantité d'informations générées, avec

utilisation d'outils informatiques et statistiques. Il ne suffit plus d'être chimiste : il faut désormais être chimio-statisticien ou chimio-informaticien pour arriver à comprendre les données issues des appareils de spectrométrie de masse à haute résolution.

Les trois approches possibles pour des analyses moléculaires de contaminations dans les échantillons environnementaux sont décrites ci-après (**Figure 8**).

La première approche, l'**analyse ciblée** classique, utilise la spectrométrie de masse à basse résolution. Pour cette stratégie, il faut disposer des étalons (i.e. solution de concentration connue préparée par dilution de la molécule pure) pour chaque molécule, et il est alors possible d'affecter un nom à chaque composé, ainsi qu'une concentration précise. Par exemple, nous avons des méthodes qui ont été développées en laboratoire pour une vingtaine de composés



Figure 7

Photo d'un instrument d'analyse moléculaire : appareil de chromatographie et de spectrométrie de masse haute résolution (temps de vol).

18. *Workflow* : ensemble des étapes et des méthodes utilisées pour traiter et analyser des données scientifiques, souvent à l'aide d'outils informatiques.

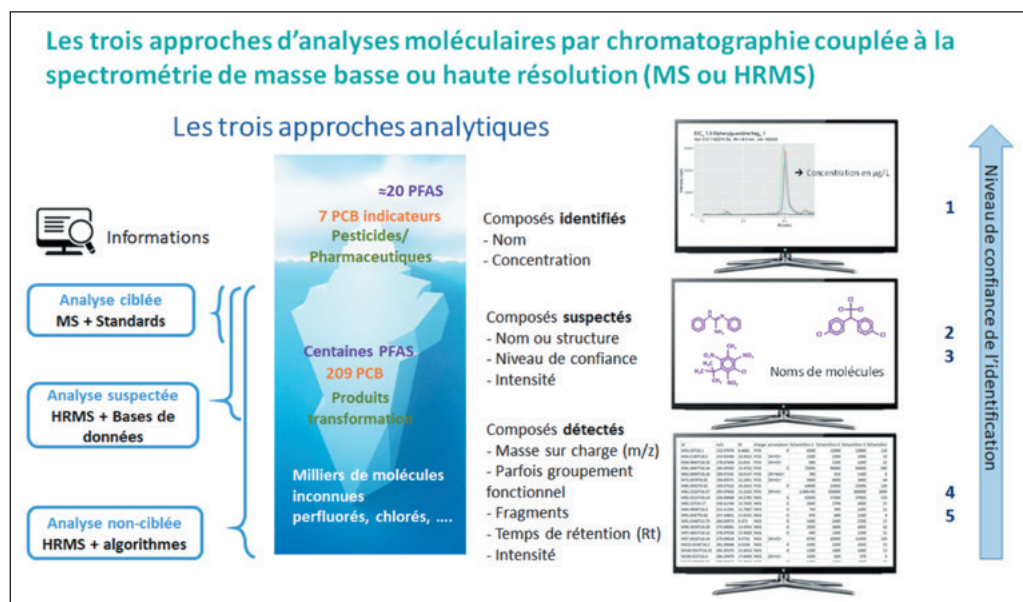


Figure 8

Les trois approches analytiques pour caractériser les micropolluants organiques dans les échantillons environnementaux.

perfluorés¹⁹ (PFAS), pour une trentaine de pesticides ou une quarantaine de produits pharmaceutiques. Cela permet de prédéfinir ce que l'on cherche, et éventuellement de le trouver dans les échantillons.

Pour élargir ce panel de molécules, la deuxième approche, dite d'**analyse suspectée**, n'a pas besoin d'étalon, mais utilise des bases de données moléculaires et la spectrométrie de masse à haute résolution. Cela va permettre de rechercher un plus grand nombre de molécules. Ainsi, pour les PFAS, cela permet d'étudier plusieurs

centaines de composés. Pour les PCB, il est possible de couvrir les 209 congénères. Les produits de transformation, que l'on ne connaît pas *a priori*, peuvent aussi être explorés. D'ailleurs, ceux-ci peuvent être plus toxiques et plus dangereux que leurs produits parents. Les informations que l'on obtient sur ces molécules sont leurs noms ou une structure chimique. Sans étalon analytique, l'identité du composé n'est pas certaine à 100 % et sa concentration n'est pas disponible, mais seulement une intensité relative, beaucoup moins précise que la concentration.

La troisième stratégie est l'**analyse non ciblée**. Elle utilise aussi la spectrométrie de masse à haute résolution mais, cette fois, les stratégies à développer nécessitent

19. Perfluorés : catégorie de molécules chimiques résistantes à la dégradation, souvent toxiques et persistantes, utilisées notamment dans des produits comme les poêles antiadhésives ou les vêtements imperméables.

d'utiliser des algorithmes pour trier la donnée, qui correspond à des milliers d'informations sur des molécules inconnues. Avec l'analyse non ciblée, l'information est moins précise, mais elle permet de couvrir un plus grand nombre de composés. L'information moléculaire que l'on obtient est une masse très précise, l'identification de fragments²⁰, des temps de rétention chromatographique²¹ et une intensité. Parfois, il est possible de mettre en

évidence un atome caractéristique (chlore, brome...) ou un groupement fonctionnel dans la molécule.

À partir de toutes ces informations sur la nature et/ou l'identité des composés, on définit un niveau de confiance²². Pour l'analyse ciblée, le niveau de confiance est le meilleur, soit 1 ; pour l'analyse suspectée, il est de 2 ou 3 ; et pour l'analyse non ciblée, il est de 4 ou 5.

Les techniques utilisées pour identifier les molécules sont d'abord la chromatographie, puis, dans un deuxième temps, la spectrométrie de masse (**Figure 9**).

20. Fragments : petites portions de molécules générées lorsque les molécules originales sont brisées en morceaux lors de l'analyse, ce qui aide à identifier leur structure chimique.

21. Temps de rétention chromatographique : temps que met une substance pour traverser la colonne chromatographique et atteindre le spectromètre de masse.

22. Indice de confiance : échelle utilisée pour indiquer la fiabilité de l'identification d'une molécule en spectrométrie de masse, le niveau 1 étant le meilleur niveau et 5 le moins bon.

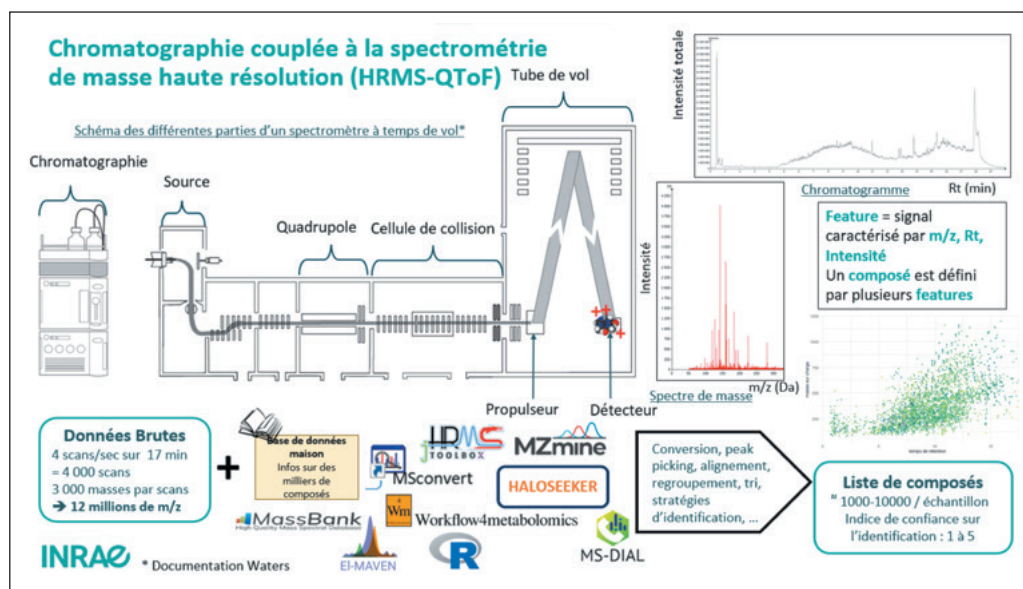


Figure 9

Illustration de l'analyse non ciblée : instruments, étapes et logiciels de traitement des données et type de résultats.

Quand les échantillons arrivent au laboratoire, ils sont soumis à une extraction par solvants des micropolluants qu'ils contiennent ; puis l'extrait est injecté dans le chromatographe pour séparer les molécules et permettre leur transfert dans le spectromètre de masse. Là, elles s'ionisent avant de se fragmenter. Elles passent dans un tube à temps de vol où leur vitesse de passage permet de déterminer une masse très précise, une information précieuse sur leur identité.

En sortie de chromatographie et de spectrométrie de masse, on obtient un chromatogramme et un ensemble de spectres de masse. On appelle un « *feature* » : un signal caractérisé par une masse très précise, un temps de rétention et une intensité. Chaque composé est défini par plusieurs « *features* ».

En fin d'analyse, on obtient, pour chaque échantillon, une quantité de données brutes très impressionnante, jusqu'à 12 millions d'ions avec une masse sur charge. Le challenge est donc là : le traitement statistique et informatique de ces données, et, en mode recherche, la contrainte d'utiliser des logiciels libres (car transparents et évolutifs). Il s'agit de convertir la donnée qui sort de ces appareils sous un format libre, puis de trouver une façon de redessiner les pics, de les aligner, de regrouper ceux qui correspondent à un même composé, de trier ceux qui n'ont pas d'intérêt et de trouver des stratégies pour identifier tous ces composés pour les faire passer d'un

niveau 5 à un niveau 4, puis à un niveau 3, 2, et jusqu'à 1 si confirmation avec un étalon analytique (par analyse ciblée).

Au final, en fonction des échantillons environnementaux, on trouve entre 1000 et 10000 composés par échantillon, avec un niveau de confiance sur leur nature et identité qui varie entre 1 et 5.

3 Exemples de travaux de recherches actuels

3.1. La dégradation des pesticides

Dans son travail de recherche réalisé lors de sa thèse, Kévin Rocco travaillait sur la dégradation des pesticides (*Figure 10*). Il a pris comme molécule d'étude le Tébuconazole, qui est un fongicide retrouvé dans les sols agricoles.

La première étape a été de développer une base de données avec les informations sur les produits de dégradation²³ potentiels du Tébuconazole. Pour cela, il a dû faire une recherche bibliographique, puis il a utilisé des outils de prédiction pour modéliser tous les processus de dégradation possibles afin de dresser une liste des produits de dégradation potentiels, ce qui représentait jusqu'à presque 300 molécules possibles. Puis il a dû utiliser des outils pour prédire les informations

23. Produits de dégradation : substances chimiques résultant de la décomposition d'un composé initial (par des processus naturels ou artificiels comme la lumière, les bactéries ou la chaleur).

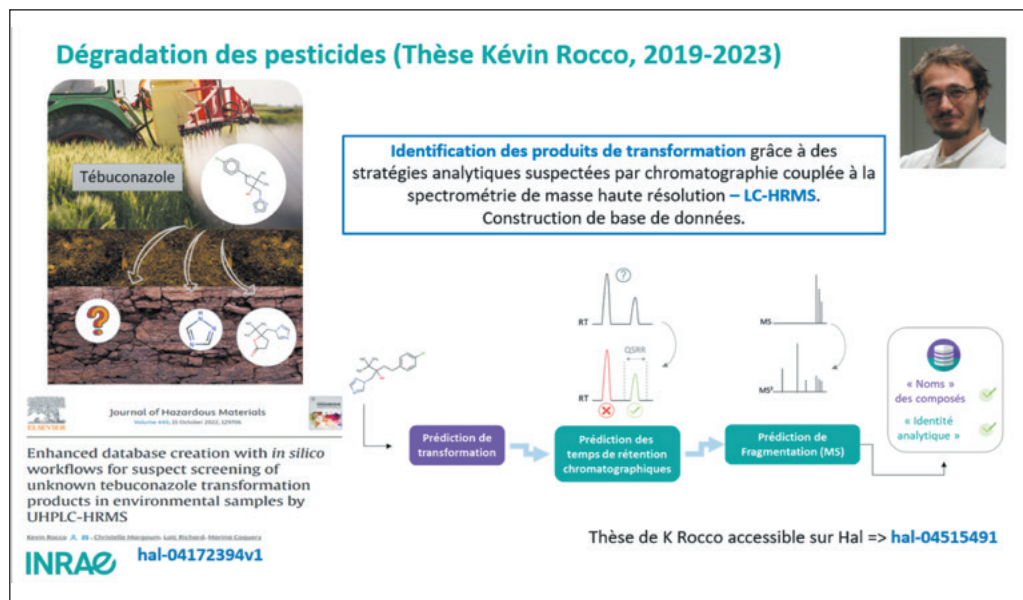


Figure 10

Sujet de thèse sur l'identification des produits issus de la dégradation des pesticides par analyse suspectée.

nécessaires à l'analyse suspectée de ces molécules, comme leurs temps de rétention chromatographique, leurs fragments... Il a appliqué cette base de données et son *workflow* à des échantillons réels collectés sur des sols agricoles, sur lesquels il savait qu'il y avait eu un épandage de Tébuconazole. Il a ainsi mis en évidence six produits de dégradation en quantité significative, qui n'avaient encore jamais été mesurés dans les sols agricoles. Ces six nouvelles molécules doivent maintenant être étudiées plus finement, notamment leurs fréquence et niveau de quantification dans l'environnement et leur toxicité, pour évaluer la pertinence de les surveiller dans l'environnement (sols et eaux), voire d'interdire leur utilisation.

3.2. Exploration de la diversité des contaminations dans les sédiments

Dans le cadre de sa thèse, Tom Ducrocq²⁴ a développé une méthodologie pour explorer la diversité des micropolluants organiques archivés dans les sédiments de rivières.

Dans une première partie, il a développé un *workflow* ; le défi était d'identifier le maximum de micropolluants organiques d'intérêt émergent (*i.e.* peu connus), voire aussi des micropolluants inconnus, dans les empreintes HRMS générées par les analyses non ciblées de divers sédiments (Figure 11). Dans une deuxième partie,

24. Tom Ducrocq (2025), *Exploration des micropolluants organiques dans les sédiments du Rhône par analyse non-ciblée*, thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard Lyon 1.

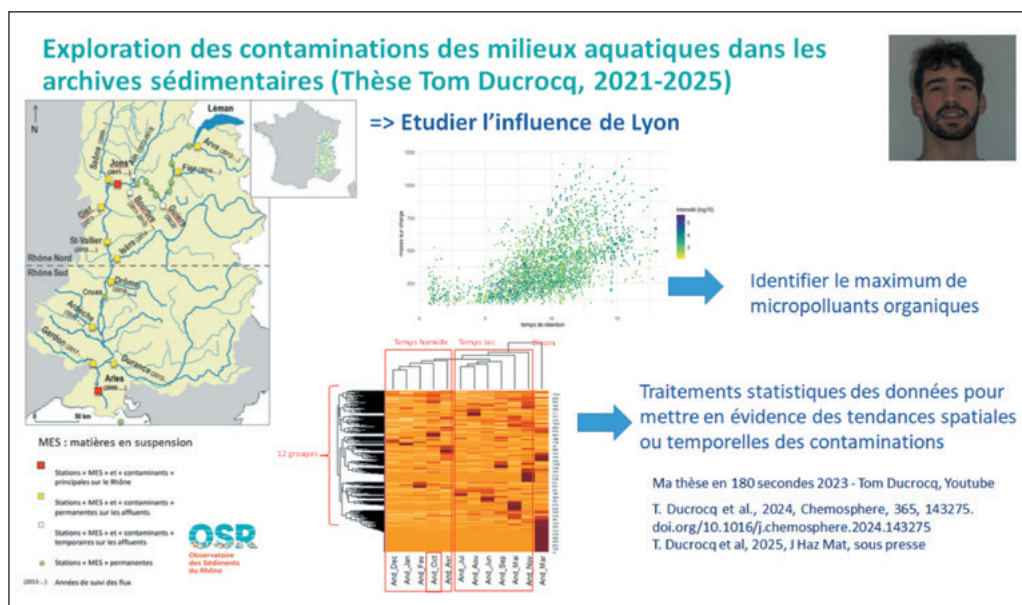


Figure 11

Sujet de thèse sur l'exploration de la diversité des micropolluants dans les sédiments par analyses non ciblées.

Tom a développé des stratégies de traitements statistiques des données pour mettre en évidence des tendances spatiales ou temporelles des contaminations.

Sur une sélection de plusieurs échantillons de sédiments collectés dans le Rhône et la Saône, en amont et en aval de Lyon, Tom a d'abord procédé par **analyse ciblée** avec les molécules et les méthodes que nous avons au laboratoire. Cela couvrait une centaine de molécules (pesticides et pharmaceutiques) à rechercher dans ces échantillons. Il a ainsi mis en évidence la présence de 42 micropolluants qu'il a pu quantifier (identification avec un niveau de confiance 1 ; voir **figures 9 et 13**).

Il a ensuite mis en œuvre une **analyse suspectée** en utilisant une base de données qu'il

a alimentée avec 3 000 molécules potentiellement archivées dans les sédiments. Cela lui a permis de mettre en lumière 114 nouvelles molécules (avec un niveau de confiance 2 ; voir **figures 9 et 13**) : des pharmaceutiques, des cosmétiques, des pesticides, ainsi que quelques produits industriels, dont des perfluorés, des plastifiants, et aussi des produits naturels issus de la dégradation de la matière organique végétale et animale. En étudiant les séries de composés avec plus ou moins de groupements CF_2^{25} , il a pu identifier de nouveaux composés perfluorés. Et en procédant de même avec les séries de

25. CF_2 : groupe chimique – constitué d'un atome de carbone lié à deux atomes de fluor – caractéristique des composés perfluorés.

composés contenant plus ou moins de groupements CH_2 ²⁶, il a identifié de nouveaux bis-phénols (avec un niveau de confiance 3 ; voir **figures 9 et 13**).

Puis il a complété son exploration, cette fois par **analyse non ciblée**. Tom a recherché les

molécules halogénées²⁷ avec l'étude des profils isotopiques en utilisant un logiciel en libre accès (HaloSeeker). Il s'est focalisé sur la recherche des molécules avec des atomes de fluor ou de chlore. Cela lui a permis de mettre en évidence la présence de 954 composés chlorés et 109 composés

26. CH_2 : groupe chimique – constitué d'un atome de carbone lié à deux hydrogènes.

27. Avec au moins un atome d'halogène, *i.e.* soit le fluor F, soit le chlore Cl, soit le brome Br, soit l'iode I.

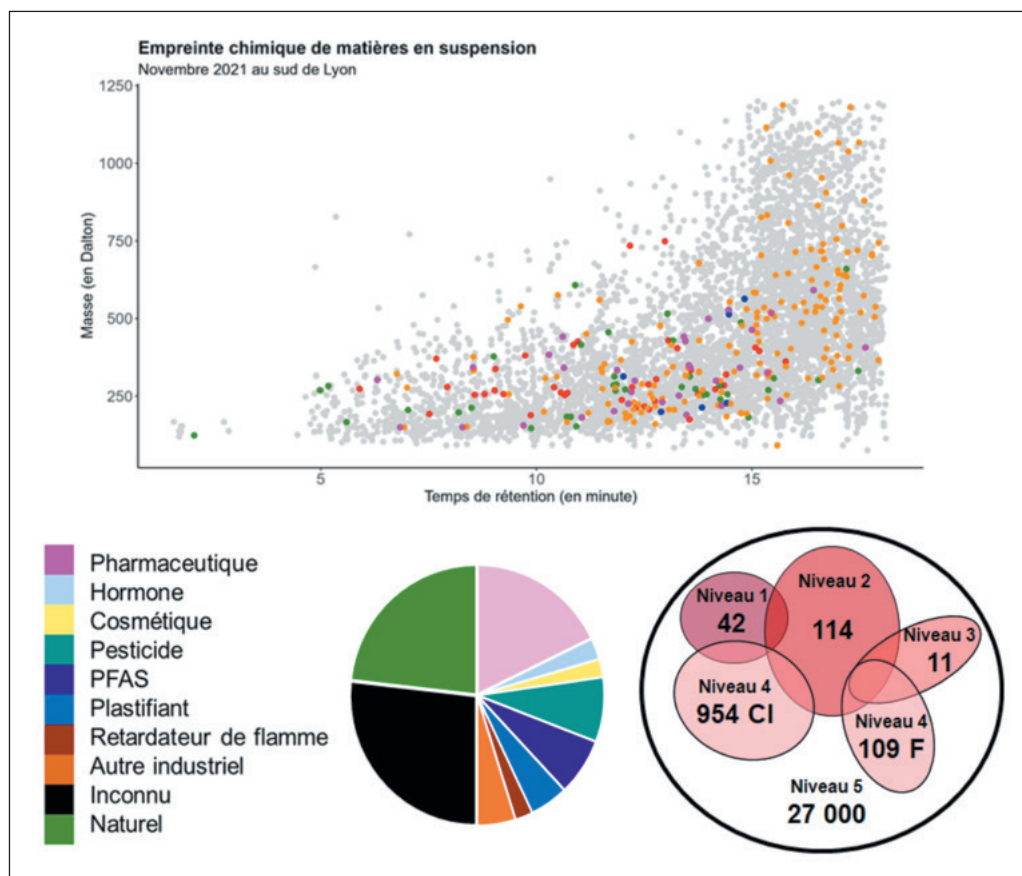


Figure 12

Identification des composés sur une sélection de plusieurs échantillons collectés dans le Rhône et la Saône, en amont et en aval de Lyon. En haut : l'empreinte HRMS (avec les couleurs représentant les niveaux de confiance). En bas, à gauche : la diversité des familles de molécules et leur proportion. En bas, à droite : le nombre de molécules mises en évidence (selon le niveau de confiance).

fluorés, sans l'information précise sur leur nom (avec un indice de confiance de 4 ; voir [figures 9 et 13](#)). La [figure 12](#) permet d'illustrer le nombre de molécules mises en évidence par Tom, avec les niveaux de confiance associés. Au final, sur ces échantillons de sédiments collectés autour de Lyon, Tom a identifié 1230 molécules environ (niveaux de confiance de 1 à 4). Cela représente environ 5 % de l'information contenue dans l'empreinte HRMS (1230 molécules identifiées sur les 27 000 détectées). Ce résultat est assez classique. Il reste encore des recherches à mener pour identifier un plus

grand nombre de molécules dans ces empreintes HRMS et améliorer les niveaux de confiance. L'enjeu est de développer des *workflows*, si possible avec des logiciels libres et transparents, pour faciliter leur évolution. Il y a aussi un enjeu d'automatisation, pour faciliter ce travail d'exploration des gros jeux de données générées par HRMS.

Cette empreinte HRMS contient une multitude d'informations sous-exploitées. Une perspective dans nos recherches est de « bancariser » ces empreintes HRMS en complément des banques d'échantillons environnementaux (*i.e.* mettre en place des banques d'échantillons électroniques, en plus des physiques). De cette façon, il sera possible, dans dix ans, d'étudier des échantillons collectés aujourd'hui (*i.e.* faire des analyses rétrospectives), et ainsi de mettre en évidence la présence de micropolluants que l'on ne connaît pas encore dans des échantillons actuels.

En appliquant sa stratégie d'analyse à des échantillons collectés en amont et en aval de Lyon, Tom a aussi pu faire ressortir des tendances spatiales de contamination ([Figure 13](#)), avec, par exemple, des pesticides spécifiques dans la Saône en amont de Lyon, des bisphénols spécifiques dans le Rhône en amont de Lyon (probablement issus de l'Ain et de la « Plastics Vallée »), des perfluorés spécifiques en aval du couloir de la chimie, au sud de Lyon.

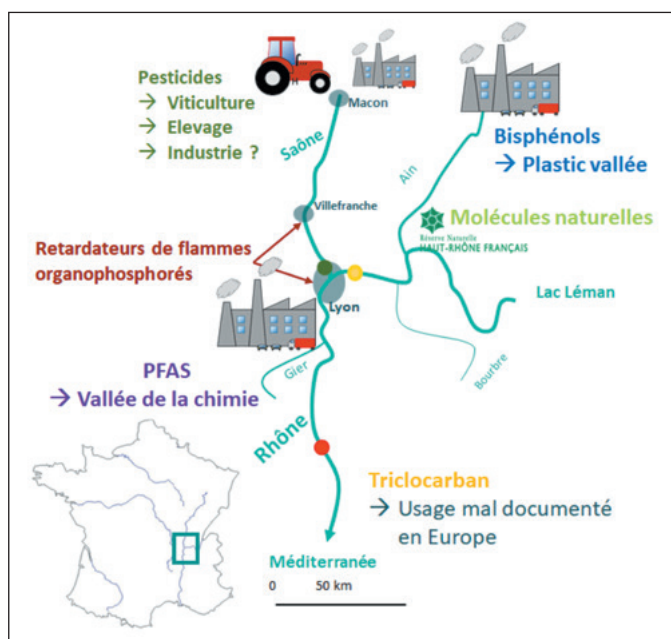


Figure 13

Mise en évidence de tendances de contamination autour de Lyon.

Conclusion

Il y a trois décennies, on ne s'intéressait pas à la nature des micropolluants, d'origine anthropique, présents dans les rivières et autres zones aquatiques. L'amélioration des instruments et stratégies d'analyses moléculaires a permis d'améliorer les connaissances sur ces polluants invisibles (sources, niveaux de contamination et devenir dans l'environnement). Finalement, plus on en cherche, plus on en trouve...

Ces recherches scientifiques sont là pour répondre à une demande sociale actuelle et permettre de réfléchir à des solutions pour mieux gérer les pollutions liées aux activités humaines (industrielles et domestiques). La santé environnementale conditionne très directement la santé humaine : on parle maintenant de « Santé unique » (concept OneHealth). Pour permettre d'agir et d'empêcher la dégradation de l'environnement et de la santé, l'enjeu est maintenant une meilleure diffusion et utilisation des connaissances produites par les chercheurs vers les citoyens et les politiques.

Traitement des contaminants dans les usines de potabilisation

D'après la conférence de Laurent Moulin, docteur en microbiologie, responsable du département Recherche et Développement à Eau de Paris, un établissement public en charge de l'eau à Paris.

1 Introduction : contexte historique

1.1. L'épidémiologie de l'eau au XIX^e siècle

Commençons par un peu d'histoire en rappelant les noms de personnalités importantes dans le monde de l'eau, notamment John Snow. C'est en quelque sorte le premier épidémiologiste, le premier à relier une épidémie de choléra à Londres, en 1854, à la distribution d'eau. Nous sommes encore dans les balbutiements de la théorie microbienne, nous ne sommes pas encore sûrs que les maladies viennent des microbes. Mais il ne va pas se baser sur cela et va établir une carte de la population (**Figure 1**) pour localiser les



Figure 1

Carte des cas de choléra à Londres en 1854 (en rouge) et des points d'eau (en bleu).

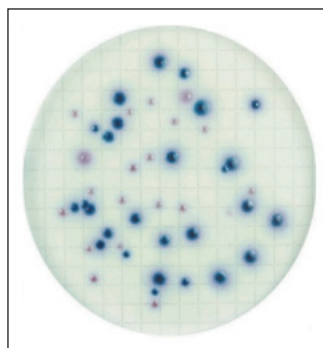


Figure 2

Dénombrement des bactéries sur un échantillon.

endroits où les gens meurent. Il se rend compte qu'ils sont tous à proximité d'une pompe, et il fait le lien : c'est en buvant cette eau que les gens tombent malades. C'est la première fois qu'on réalise que l'eau potable, l'eau qu'on ingère, est un risque sanitaire important. Beaucoup de travaux vont suivre. Robert Koch¹ va montrer que la filtration sur sable est très importante pour réduire maladies et épidémies. En même temps, les Anglais, avec Grace et Percy Frankland², observent qu'on peut suivre l'efficacité des filtres à sable en mesurant la quantité de bactéries retenues.

1.2. La surveillance de la qualité de l'eau ingérée

Tout cela montre qu'il est important sur un plan sanitaire de surveiller la qualité de l'eau, mais, très vite, on se heurte à une difficulté : il existe énormément de maladies différentes et suivre chacune, individuellement, dans le domaine de la microbiologie est compliqué. Comme les bactéries issues des maladies proviennent pour la plupart de matières fécales, l'idée est de se dire que s'il n'y a pas de matières fécales dans l'eau, il est plus probable qu'il n'y ait pas de micro-organismes pathogènes, et donc que l'eau

soit potable. Pour vérifier la présence de matières fécales, on suit des indicateurs fécaux, principalement, au début de ce type d'études, l'*Escherichia coli*³ (qu'on appelait à l'époque *Bacterium coli*). Ensuite, d'autres indicateurs ont été ajoutés, notamment les entérocoques⁴. Ces deux bactéries ne sont pas dangereuses en elles-mêmes ; elles sont juste représentatives de la présence de matières fécales et montrent un défaut de traitement ou la présence d'une pollution.

L'analyse de la présence de ces traceurs est très simple : on prélève l'eau à analyser, on la filtre sur une membrane dont les pores mesurent 0,45 micromètre. Les bactéries, qui mesurent 1 micromètre, ne peuvent pas passer à travers. Ainsi, les bactéries restent piégées sur la membrane. On place alors cette membrane sur un milieu de culture spécifique, qui permet la croissance des *Escherichia coli* ou des entérocoques, et on peut ensuite dénombrer les bactéries présentes dans l'échantillon d'eau (**Figure 2**). Cette méthodologie (en fait un peu plus complexe dans les détails), mise au point il y a un siècle, reste globalement la même aujourd'hui. On l'utilise pour suivre *E. coli* et les entérocoques, mais aussi d'autres indicateurs comme

1. Médecin allemand, pionnier en microbiologie, connu pour avoir identifié les bactéries responsables de la tuberculose et du choléra.

2. Chimistes britanniques ayant étudié les micro-organismes dans l'eau potable et contribué aux débuts de la microbiologie environnementale.

3. Bactérie intestinale présente chez l'homme et les animaux, parfois responsable d'intoxications alimentaires graves.

4. Bactéries intestinales indicatrices de contamination fécale dans l'eau ou les aliments.

les légionelles⁵ ou la flore totale dans l'eau.

2 Les ressources en eau de Paris

2.1. Les captages des eaux brutes

À Eau de Paris, nous utilisons deux types de ressources en eau.

– D'abord, les captages des eaux souterraines, qui viennent d'assez loin de Paris, jusqu'à 100 kilomètres (**Figure 3**). Elles proviennent des sources de la Vigne, vers Dreux, et des sources du Sud,

5. Bactéries hydriques pouvant causer la légionellose, une maladie pulmonaire souvent liée aux systèmes d'eau chaude mal entretenus.

en Bourgogne-Franche-Comté (les sources de Cochebis). Ces eaux sont transportées à Paris via de grands aqueducs.

– Ensuite, 50 % de l'eau provient des usines de traitement des eaux de surface, situées sur la Seine et la Marne, où l'eau est traitée pour atteindre une qualité optimale car, malheureusement, ces ressources en eau de surface sont relativement contaminées.

2.2. Suivi de la qualité des eaux de surface

Les indicateurs microbiologiques fécaux

Le laboratoire de la Ville de Paris, et donc d'Eau de Paris, existe depuis très longtemps. Anciennement Observatoire de

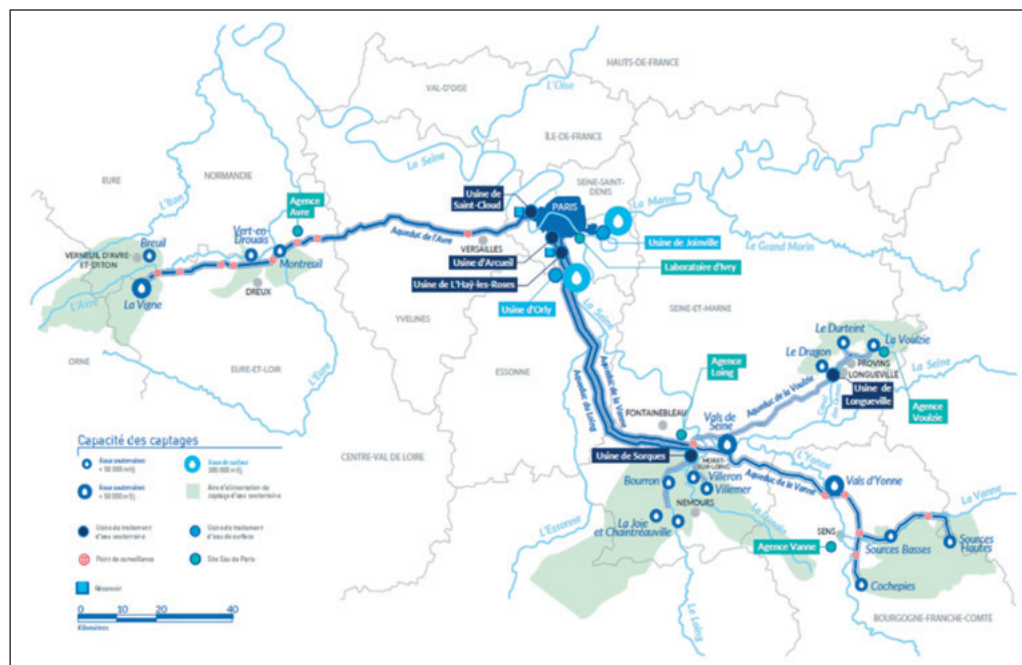


Figure 3

Carte des captages d'Eau de Paris.

Montsouris, il dispose de données sur la qualité de la Seine depuis 1914.

La **figure 4** montre l'évolution du nombre d'*Escherichia coli*. Attention, c'est une échelle logarithmique : chaque augmentation correspond à une multiplication par 10. L'évolution peut sembler relativement plate ; en réalité, les variations sont considérables. Sur ce graphique, les études commencent en 1914 et vont jusqu'à nos jours. On peut observer la lente dégradation de la qualité de l'eau aux points de prélèvement sur la Seine, atteignant presque 1 million d'*E. coli* par 100 ml d'eau à la fin des années 1980.

C'est à ce moment-là que les responsables de l'assainissement, notamment au SIAAP⁶

et à la Ville de Paris, responsables du réseau des égouts, ont entrepris de redimensionner les infrastructures et d'améliorer les traitements. À partir de cette période, la qualité de l'eau de la Seine s'est progressivement améliorée, pour atteindre aujourd'hui un niveau d'environ 1 000 unités formant colonies⁷ (UFC) par 100 ml d'eau. Cela démontre néanmoins que la Seine reste fortement contaminée par nos rejets. **Il est important de noter que cette pollution ne provient pas des industries, mais de nos propres rejets domestiques.**

Les virus et les parasites

Par ailleurs, les avancées scientifiques ont mis en évidence la présence d'autres pathogènes importants au-delà

6. Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne.

7. Mesure du nombre de bactéries vivantes capables de se multiplier et de former des colonies visibles.

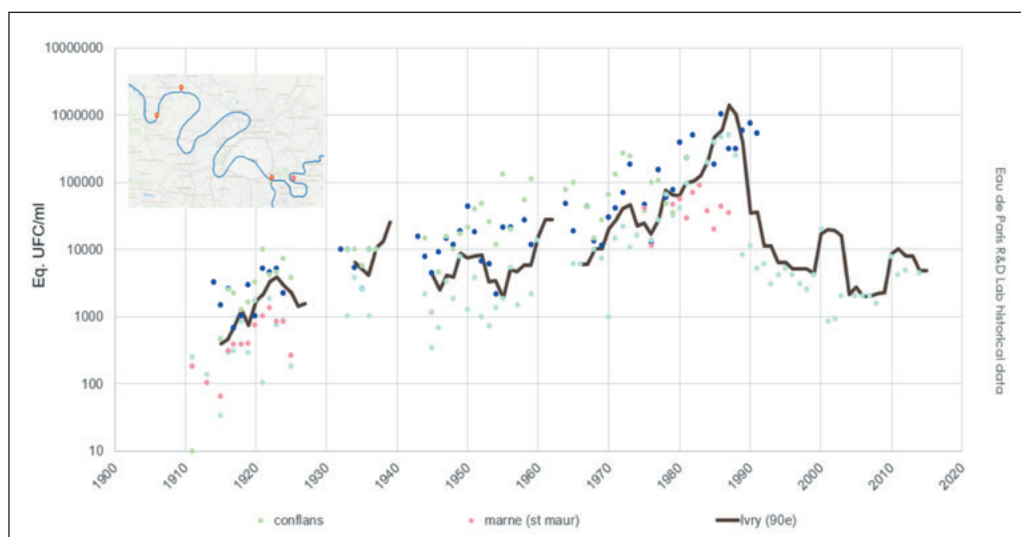


Figure 4

Carte des captages d'Eau de Paris.

des bactéries, responsables de maladies comme le choléra. Ces éléments pathogènes incluent notamment des virus et des parasites. Les virus sont des entités extrêmement petites, mesurant entre 20 et 100 nanomètres, soit 10 à 100 fois plus petits qu'une bactérie, qui mesure en général autour d'un micromètre.

Quant aux parasites, il s'agit de protozoaires⁸, des cellules dotées d'un noyau, bien plus grandes que les virus. Ces organismes, d'une taille d'environ 10 à 15 micromètres, sont responsables de gastroentérites et peuvent être transmis des animaux à l'homme. Les *Giardia*⁹ et les *Cryptosporidium*¹⁰ (souvent appelés « crypto ») en sont des exemples notables (Figure 5). Ces parasites ont beaucoup fait parler d'eux ces dernières années, notamment à cause d'épisodes de contamination de l'eau potable ayant provoqué des épidémies de gastroentérites.

Lorsque l'on a commencé à s'intéresser à ces micro-organismes, la question s'est posée de savoir si on pouvait les détecter efficacement. Les évolutions technologiques, comme l'apparition de la biologie moléculaire, ont révolutionné ce domaine. Au lieu de simplement chercher les

bactéries capables de se développer sur des milieux spécifiques, on peut désormais détecter directement la présence de leur génome, c'est-à-dire de leur ADN ou de leur ARN. Cela permet de quantifier les virus présents dans l'environnement.

Depuis 2015, des études ont été menées pour vérifier si la Seine était contaminée par des virus entériques humains, transmis par voie oro-fécale¹¹ et infectant principalement les humains. Pour cela, des échantillons de 20 litres d'eau ont été prélevés afin de mesurer les concentrations virales. Les résultats ont révélé la présence de deux familles importantes de virus dans les eaux de surface de la Seine et de la Marne : les adénovirus et les norovirus¹² (Figure 6). Ces virus proviennent principalement

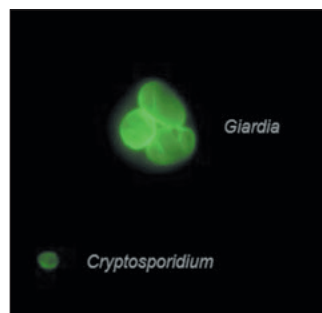


Figure 5

Giardia et Cryptosporidium.

11. Transmission d'agents pathogènes par ingestion d'eau ou d'aliments contaminés par des matières fécales.

12. Virus très contagieux causant des gastroentérites aiguës, souvent associés à des épidémies alimentaires.

8. Micro-organismes unicellulaires eucaryotes souvent présents dans l'eau, dont certains peuvent causer des maladies.

9. Protozoaire parasite provoquant des troubles digestifs après ingestion d'eau ou d'aliments contaminés.

10. Protozoaire responsable de diarrhées, transmis par l'eau ou les aliments contaminés.

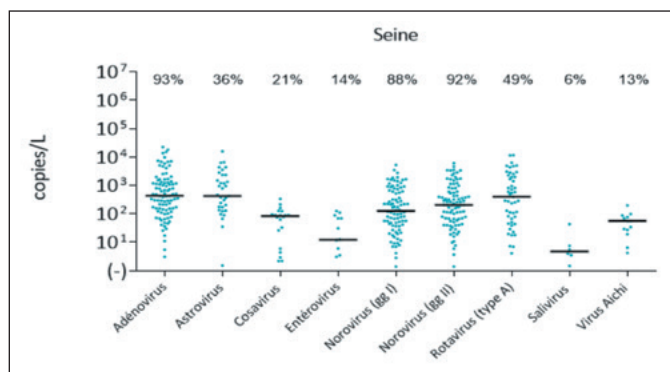


Figure 6

Mesure de la présence de virus dans l'eau de la Seine et de la Marne.

des eaux usées, ce qui était attendu, mais il était essentiel de confirmer leur présence pour adapter les méthodes d'élimination.

*Les polluants organiques :
molécules anthropiques
et métabolites*

Par-delà des recherches sur les agents pathogènes microbiologiques, dès les années 1970, les scientifiques ont commencé à identifier des molécules anthropiques (issues des activités humaines et industrielles) dans l'environnement. Ces molécules, souvent issues de traitements ou de rejets industriels, ont fait l'objet de nombreuses analyses grâce aux progrès des méthodes analytiques.

Plus récemment, ce sont surtout les métabolites (produits de dégradation de ces molécules) qui ont attiré l'attention des médias. Deux exemples récents sont les métabolites

du métolachlore¹³ et, surtout, ceux du chlorothalonil¹⁴, comme les R471811¹⁵. Ces composés ont été largement médiatisés en raison de leur capacité à contaminer certaines ressources en eau.

La recherche et le suivi de ces molécules sont complexes en raison de leur volatilité¹⁶, de leur polarité¹⁷ et autres caractéristiques physicochimiques variées (**Figure 7**). Les techniques couramment utilisées incluent la chromatographie liquide¹⁸, la chromatographie gazeuse¹⁹ et, plus récemment, la chromatographie ionique²⁰ couplée à des spectromètres de masse²¹. Ces outils permettent d'analyser un large éventail d'échantillons. Cependant, il est impossible de rechercher toutes les molécules présentes dans l'environnement. Une sélection est donc réalisée, en fonction de

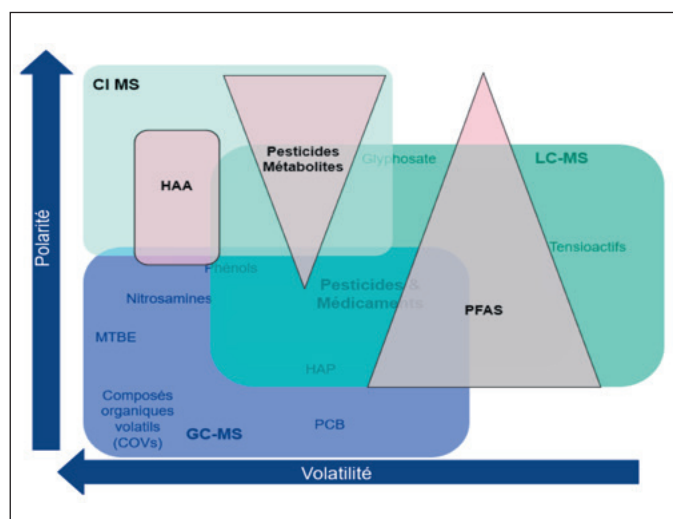


Figure 7

Les polluants organiques présents dans les ressources en eau.

13. Herbicide utilisé pour protéger les cultures des mauvaises herbes, potentiellement polluant pour l'eau.

14. Fongicide utilisé en agriculture pour lutter contre les champignons pathogènes.

15. Métabolite dérivé du chlorothalonil, souvent étudié pour sa persistance dans l'environnement.

16. Capacité d'une substance à passer de l'état liquide ou solide à l'état gazeux.

17. Propriété chimique influençant la solubilité d'une molécule dans l'eau ou les solvants organiques.

18. Technique séparant les composants d'un mélange en les faisant passer dans une colonne liquide.

19. Technique utilisant un gaz pour séparer et analyser les composants volatils d'un mélange.

20. Technique pour séparer les ions dans un échantillon liquide, utilisée pour analyser les eaux.

21. Appareil identifiant les molécules en mesurant leur masse et leur structure chimique.

leur pertinence sanitaire ou médiatique.

Par exemple, les métabolites du chlorothalonil R471811 montrent une concentration constante d'environ 600 nanogrammes par litre dans la Seine depuis le début des relevés en 2022, correspondant à une dégradation et donc à une présence constante du chlorothalonil (**Figure 8**). D'autres molécules, comme le **flufénacét**²², présentent des variations

22. Herbicide utilisé pour contrôler les mauvaises herbes dans les cultures, notamment de céréales.

saisonnnières (**Figure 9**). Leur présence est souvent plus marquée en hiver, en raison de leur usage ou des phénomènes de ruissellement.

Prenons l'exemple de l'**AMPA**²³, un **métabolite du glyphosate**²⁴. Il y a quelques années, ce composé faisait beaucoup parler de lui. L'AMPA est une très petite

23. Produit de dégradation dans l'environnement du glyphosate.

24. Herbicide très utilisé pour éliminer les mauvaises herbes, controversé pour son impact environnemental.

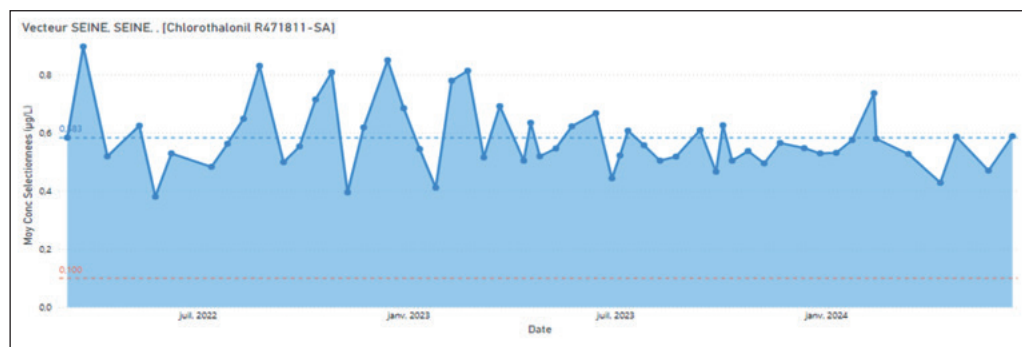


Figure 8

Suivi de la concentration du métabolite R471811 du chlorothalonil au cours du temps.

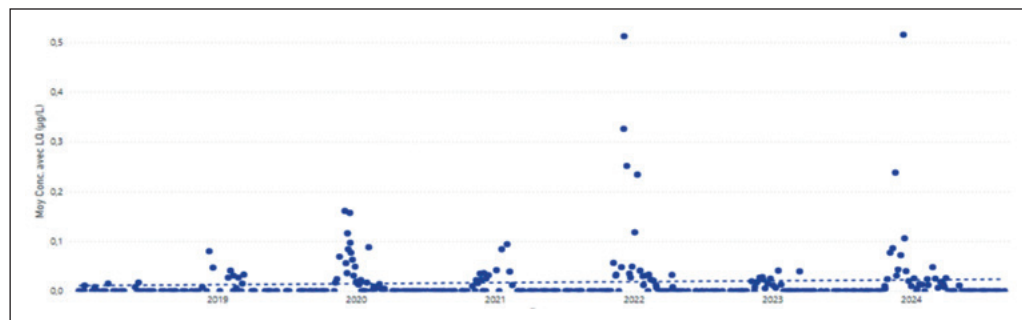


Figure 9

Suivi de la concentration du flufénacét au cours du temps.

molécule et, au départ, on avait l'impression de percevoir des variations saisonnières dans sa présence. Cependant, des travaux récents, dont une publication comparant les situations en Europe et aux États-Unis, ont montré que, si l'on observe les flux d'AMPA (quantités transportées sur une période donnée) plutôt que les simples concentrations, on détecte un flux bien plus constant (Figure 10). Cela suggère que l'origine de l'AMPA n'est pas seulement agricole, mais qu'il pourrait aussi provenir d'autres sources, comme des produits d'usage courant, par exemple des produits cosmétiques ou d'entretien.

En parallèle, d'autres substances, comme les médicaments, sont également surveillées dans les cours d'eau.

3 L'eau potable : traitement des ressources et suivi de la qualité de l'eau

On a une ressource qui est contaminée par des micro-

organismes et des molécules organiques. Il faut donc la traiter, pour que les gens ne soient pas malades à court ou à long terme, et donc respecter la réglementation – comme le rappelle le début du Code de la santé publique, qui explique que «*les eaux qui sont destinées à la consommation humaine ne doivent pas contenir un nombre, une concentration de micro-organismes, parasites ou de substances constituant un danger pour la santé des personnes*». Il faudra donc suivre la qualité de cette eau pour qu'elle respecte cette réglementation. Pour cela, il faudra étudier un certain nombre de paramètres :

- paramètres chimiques ;
- polluants minéraux et métalliques ;
- paramètres physicochimiques (turbidité, COT, conductivité...);
- polluants organiques (pesticides, résidus de pesticides...) avec des méthodes d'analyse de plus en plus sensibles et précises (LC/MS2, LC QTOF, CI/MS2...);

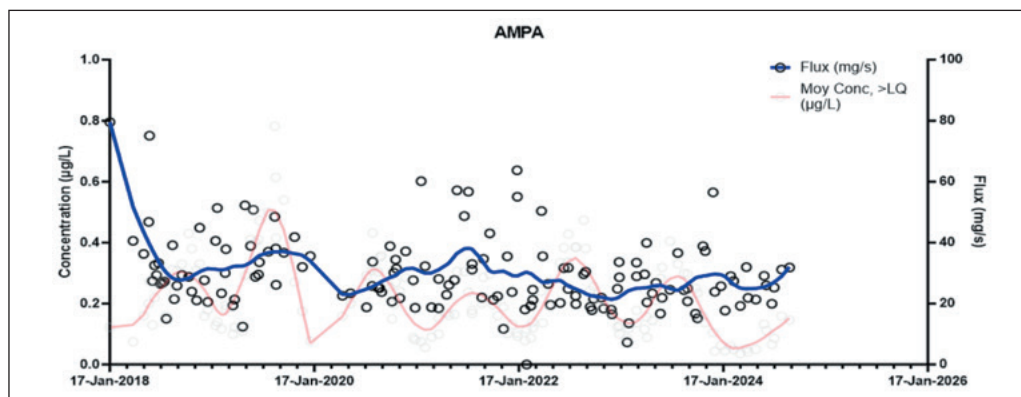


Figure 10

Suivi de la concentration de l'AMPA au cours du temps (concentration moyenne en rose, flux en bleu).

– paramètres microbiologiques : avec des références de qualité (coliforme, flore totale, SBASR), et des limites de qualité (*Escherichia coli* et entérocoques intestinaux);

Le schéma de la **figure 11** montre que le traitement de l'eau de surface est une opération complexe. Schématiquement, à Eau de Paris, sur nos ressources de surface, cela se passe en deux parties :

La première partie est la clarification, c'est-à-dire qu'on va faire **coaguler** tous les composés qui sont en suspension dans l'eau en ajoutant du chlorure ferrique²⁵, qui va leur permettre de s'agglomérer, d'être plus denses et de précipiter plus rapidement lors de l'étape de la décantation. Ensuite, on va faire une **filtration** de l'eau à travers un tamis de sable. On obtient une eau clarifiée, dans laquelle on n'a encore que peu de composé organique et de micro-organismes pathogènes.

La seconde partie permet à la fois **d'éliminer** les composés

organiques et de la **désinfecter** des micro-organismes.

Traitement des polluants organiques

L'utilisation des charbons actifs en grains (CAG) est très importante dans le domaine de l'eau potable, puisqu'ils permettent de traiter de nombreuses molécules différentes. Le charbon actif en grains est, depuis plus d'une vingtaine d'années, peut-être même trente ans, un traitement de base pour éliminer les composés organiques présents dans l'eau.

Le CAG est une matière organique activée en la chauffant très fortement avec de la vapeur d'eau ou en utilisant des composés chimiques. Le charbon obtenu possède de nombreux trous, de tailles variées (mésopores, micropores), qui peuvent entrer en contact avec les molécules organiques et les adsorber (**Figure 12**) lors de leur traversée. Ces molécules ne restent alors plus dans l'eau : elles se fixent au charbon.

25. Substance utilisée pour traiter l'eau en éliminant les impuretés et les phosphates.

Il existe trois types de charbons :

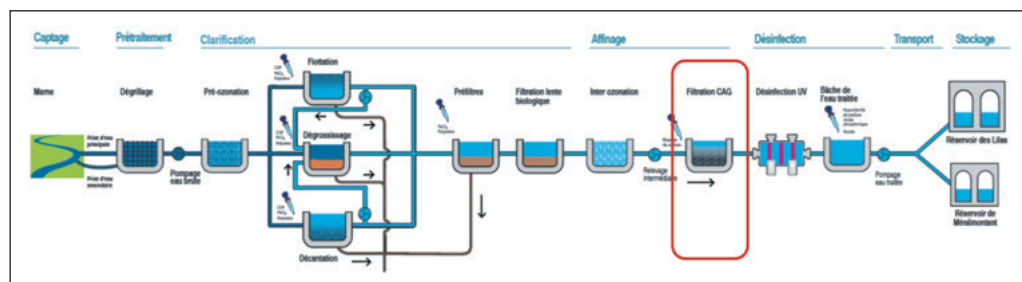


Figure 11

Étapes du traitement de l'eau de surface.

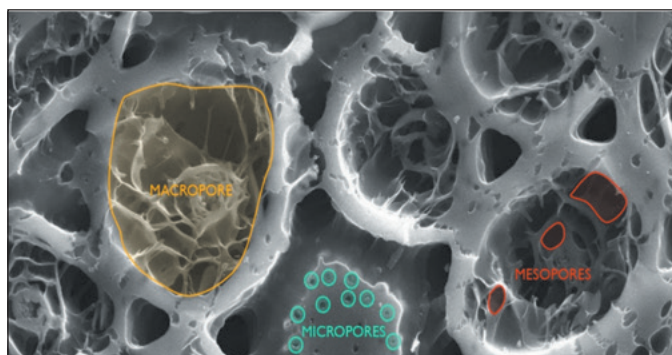


Figure 12

Différentes tailles de pores sur les charbons actifs.

- des gros grains (0,5 à 5 mm) : on parle de « charbon en grains » (CAG) ;
- des grains plus petits (0,3 à 0,8 mm) : on parle de « micro-grains » ;
- de la poudre (grains de taille inférieure à 0,15 mm).

À Eau de Paris, on utilise ces trois types de charbons en fonction des filières et de la qualité de l'eau. On fait passer l'eau à travers ces filtres, et ils retiennent les molécules organiques.

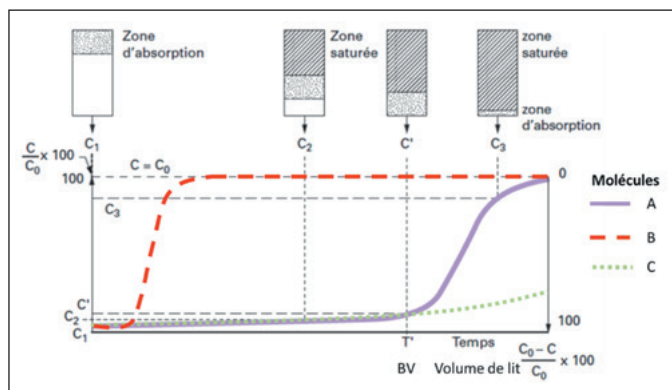


Figure 13

Caractérisation de la performance des charbons actifs.

Pour choisir le bon CAG, il faut comparer ces charbons actifs et mesurer leur capacité à éliminer un polluant (Figure 13) à partir de ce qu'on appelle le « temps de percement », c'est-à-dire le moment où les polluants organiques peuvent commencer à traverser le charbon. Ici, vous avez le temps sur l'axe des abscisses, et, sur l'axe des ordonnées, le rapport C/C_0 , c'est-à-dire la concentration des molécules A, B et C dans l'eau à la sortie par rapport à celle dans l'eau à l'entrée (Figure 13). Si l'on est à 100 % (cas de la molécule B), cela signifie que toutes les molécules B entrées sont ressorties. Donc, ce n'est pas bon : le charbon n'a rien retenu. À l'inverse, si l'on est à 0 %, cela signifie que le charbon a tout retenu (cas de la molécule C).

Au bout d'un moment, le charbon est saturé et il va laisser passer les molécules organiques au temps T' pour les molécules A.

Il faut donc tester toutes les molécules que l'on veut éliminer vis-à-vis des charbons actifs utilisés.

À Eau de Paris, comme dans d'autres centres de traitement de des eaux, nous avons décidé de tester les performances des CAG pour éliminer les métabolites de la chloridazone ou du chlorothalonil (Figure 14).

De nombreuses études ont été menées dans des usines pilotes et dans de vraies usines, pour vérifier l'efficacité des CAG et examiner beaucoup de paramètres.

Par exemple, on regarde la représentation temps-efficacité (en C/C_0) et on peut aussi

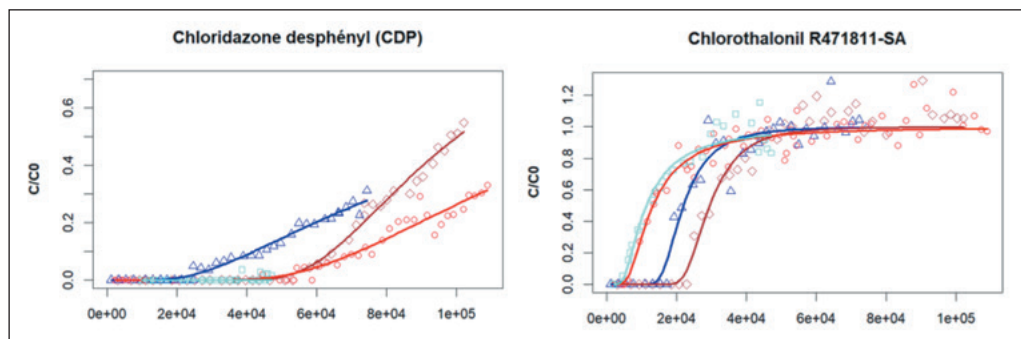


Figure 14

Performance des charbons actifs face à la chloridazone et au chlorothalonil.

se demander si la qualité initiale de l'eau joue un rôle. Effectivement, les eaux souterraines contiennent moins de matière organique que les eaux de surface. Elles ont donc tendance à saturer les filtres plus lentement.

De même, la qualité des charbons est un paramètre important. On a différents types de charbons, ce qui explique les différentes courbes obtenues. Ces courbes permettent d'identifier les charbons les plus efficaces pour éliminer ce métabolite dans nos usines et de prévoir leurs remplacements. Ce qu'on observe, c'est que certains charbons perdent leur efficacité très rapidement. On arrive donc vite à un point où ils ne retiennent plus les molécules organiques. D'autres charbons, en revanche, se montrent un peu meilleurs.

Par exemple, le chlorothalonil R466811 est une molécule qui pose beaucoup de problèmes. Elle traverse le charbon très rapidement, ce qui rend son élimination très compliquée et nécessite beaucoup

de travail pour trouver le bon CAG (Figure 15).

Traitement des eaux souterraines : élimination des polluants microbiologiques par ultrafiltration membranaire

Le deuxième exemple concerne les usines de traitement des eaux souterraines. Ces dernières, souvent de meilleure qualité que les eaux de surface, présentent une

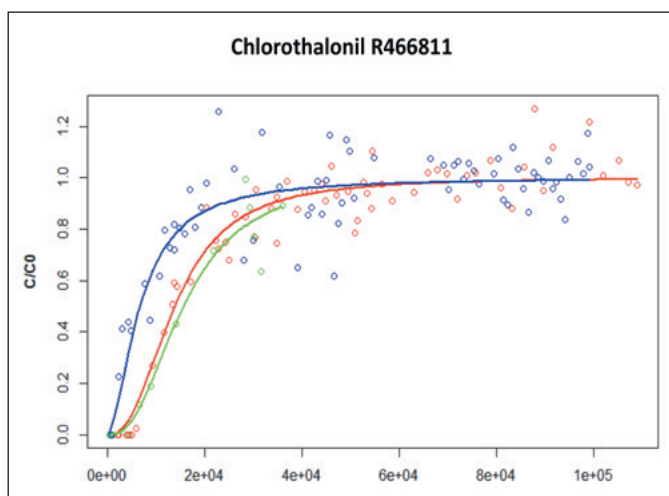


Figure 15

Performance d'autres charbons actifs sur le chlorothalonil.

pollution différente : moins de pollutions d'origine humaine et davantage de pollutions agricoles, liées à l'usage de nitrates²⁶ et de pesticides. Pour traiter ces pollutions, on dispose de deux types de filtration (**Figure 16**) : on utilise, d'une part, du charbon actif en poudre (semblable au charbon en grains, mais sous forme pulvérisée), et, d'autre part, une filtration membranaire. Comme ces eaux peuvent contenir des parasites issus des activités agricoles, tels que les cryptosporidies et les *Giardia*, on utilise également de l'ultrafiltration pour éliminer ces pathogènes.

Les membranes d'ultrafiltration se déclinent en trois types selon la taille des pores dans la membrane. Les membranes que nous utilisons sont conçues pour bloquer les

particules comprises entre 10 et 200 nanomètres environ. Ces membranes sont très efficaces contre les cryptosporidies et les *Giardia*, qui mesurent environ 14 micromètres. Cependant, une question importante concerne leur efficacité contre les virus, encore mal décrite par la communauté scientifique.

Nous avons développé des outils permettant d'analyser les virus, et nous avons lancé une étude avec d'autres équipes de recherche à Marseille pour évaluer l'efficacité des membranes ultrafiltration.

Les fournisseurs de membranes affirment qu'elles sont efficaces contre les virus, car ceux-ci sont plus gros que les pores. Mais nous avons observé que ces affirmations étaient basées sur des tests avec des concentrations très élevées de virus. Or, ces conditions de laboratoire ne reflètent pas les concentrations réelles. Nous

26. Composés azotés présents dans l'eau, souvent issus des engrais ou des déchets organiques.

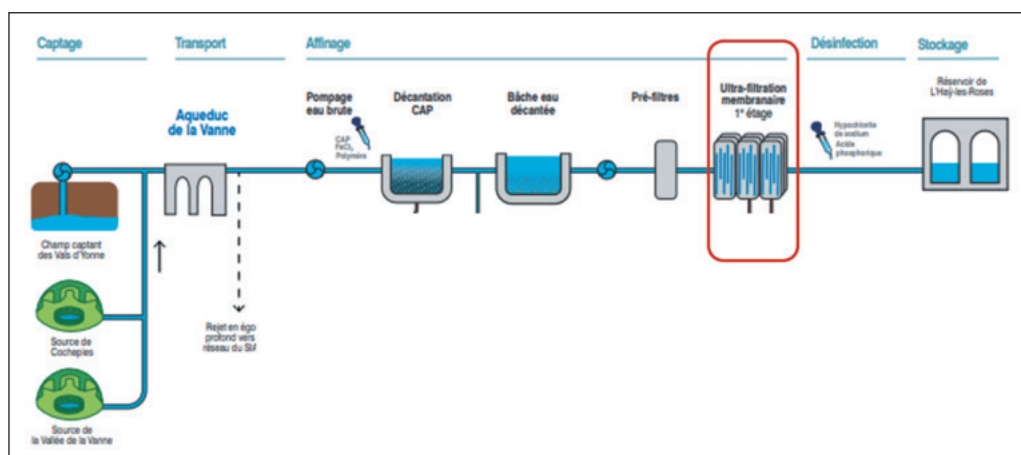


Figure 16

Étapes de traitement des eaux souterraines.

avons donc travaillé avec des concentrations de virus plus faibles et plus proches de la réalité.

Les résultats sont reportés sur la [figure 17](#) et l'on voit que l'efficacité des membranes n'était pas aussi bonne que prévu. Le LRV (taux d'abattement logarithmique²⁷) représente l'efficacité des membranes, de manière comparable au C/C_0 . Quand le LRV est bas, cela signifie que la membrane fonctionne mal. Quand il est haut, cela indique une bonne rétention des virus. Pour de faibles concentrations de virus en entrée, l'efficacité des membranes diminue : cela montre que la théorie selon laquelle les pores retiennent tout ce qui est plus gros qu'eux est un peu simpliste. En réalité, la

charge²⁸ et la déformabilité des virus jouent un rôle important. Il reste donc encore du travail à accomplir pour mieux comprendre l'élimination des virus avec ce type de traitement.

28. Quantité totale de virus présents dans un échantillon, souvent mesurée pour évaluer un risque sanitaire.

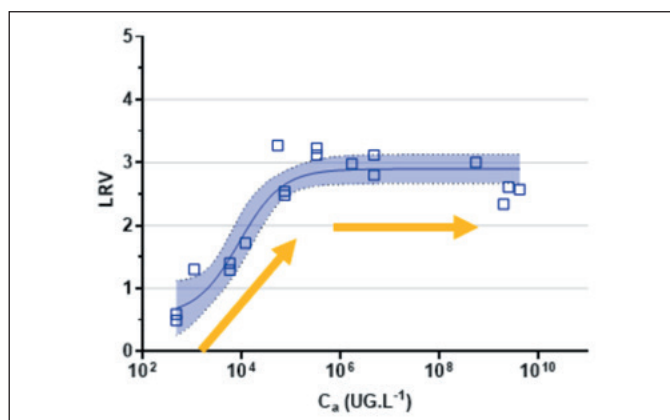


Figure 17

Efficacité des membranes face aux virus.

27. Réduction d'un contaminant exprimée en puissance de dix, utilisée pour évaluer l'efficacité des traitements.

Conclusion

Pour conclure, la production d'eau potable repose avant tout sur un contrôle rigoureux des ressources. On doit connaître précisément leur composition avant traitement pour mettre en œuvre un traitement efficace. Ensuite, une fois l'eau traitée, elle est soumise à des analyses de suivi très performantes et à une réglementation stricte. Les évolutions technologiques en chimie et biologie, notamment en biologie moléculaire, ont permis de mieux suivre les polluants et les micro-organismes potentiellement pathogènes.

Néanmoins, il faut continuer à mener des études pour mieux comprendre certaines étapes. De même, il peut toujours y avoir des dysfonctionnements, c'est pourquoi on suit régulièrement les productions d'eau. Il y a aussi de nouveaux usages de l'eau : la REUT²⁹, par exemple, et d'autres usages alternatifs qui doivent eux aussi permettre de garantir la qualité de l'eau pour ne pas produire de nouvelles épidémies. Grâce à plus d'un siècle de recherche et d'évolution technologique, aujourd'hui, quasiment plus personne n'est malade en buvant de l'eau, et il est important de rester sur cette lancée.

Les techniques analytiques pour évaluer la santé des populations par les eaux usées

Thomas Thiebault est géochimiste et maître de conférences à l'École pratique des hautes études-Paris Sciences & Lettres à Paris. Il s'intéresse au devenir des micropolluants organiques¹, notamment aux techniques analytiques pour évaluer la santé des populations à partir des eaux usées.

Introduction

Les eaux usées collectrices d'informations

Aujourd'hui, les eaux usées ne sont plus seulement

considérées comme un déchet à traiter, mais également comme une ressource, notamment en eau, en nutriments et en énergie. La composition géochimique des eaux usées est également riche d'informations sur l'état de santé et éventuellement même du bien-être des populations qui les excrètent.

1. Substances chimiques à faibles concentrations dans l'environnement, souvent issues de médicaments, pesticides ou produits ménagers.



Figure 1

Visite du réseau d'égouts parisien par la bourgeoisie au XIX^e siècle.

Source : Getty - Whitemay.

Cette idée n'est pas nouvelle : au milieu du XIX^e siècle, Victor Hugo écrivait, dans *Les Misérables* : « L'égout, c'est la conscience de la ville. Tout y converge et s'y confronte. Dans ce lieu livide, il y a des ténèbres mais il n'y a plus de secrets. » C'est également le début d'une prise de conscience, les égouts comme l'intestin de la ville.

La construction du réseau des égouts parisiens date du XIX^e siècle. Long de 16 kilomètres après la Révolution, il est de 2 600 kilomètres aujourd'hui. Quelques images sont présentées sur la **figure 1**. Le réseau d'assainissement parisien a la particularité d'être visitable, à hauteur d'homme. À une époque, c'était le nec plus ultra pour la haute bourgeoisie de visiter ce réseau ultra-moderne qui est un réseau unitaire².

Développement des réseaux d'assainissement

La progression de la collecte des eaux a été fortement améliorée dans un objectif de

2. Système transportant dans les mêmes canalisations eaux usées domestiques et eaux pluviales, parfois débordant lors de fortes pluies.

protection de la qualité des milieux aquatiques. La composition des eaux usées dépend de ce qui est excrété par la ville et ses résidents, c'est un cycle de « consommation-excrétion³ » (**Figure 2**).

Par exemple, un produit pharmaceutique est consommé, métabolisé⁴, puis excrété en partie et transféré par les eaux usées dans les stations de traitement des eaux usées (STEU). Après un traitement plus ou moins marqué, il peut contaminer le milieu naturel. L'amélioration de la gestion des eaux usées a donc eu longtemps pour but de protéger le milieu naturel, avant un point de bascule dans les années 1970.

La **figure 3** montre, en rouge, l'évolution du volume d'eau usée collectée dans l'agglomération parisienne et, en vert, l'évolution du volume d'eau usée traitée avec, notamment, la mise en place de différentes tranches de stations

3. Processus où une substance consommée est absorbée, utilisée, transformée, puis excrétée par l'organisme.

4. Désigne une substance modifiée chimiquement par l'organisme pour faciliter son élimination.

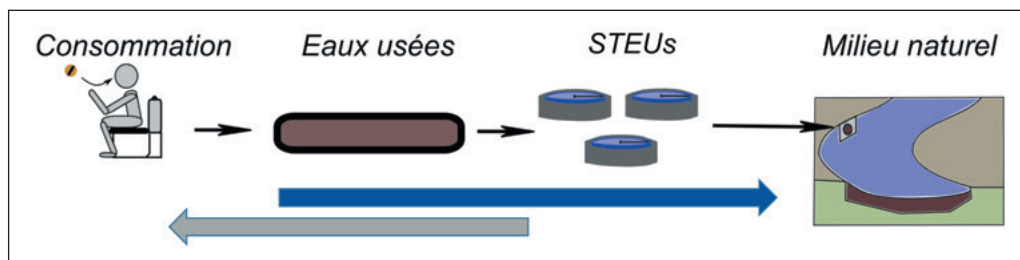


Figure 2

Cycle de consommation-excrétion.

d'épuration par le syndicat d'assainissement parisien depuis les années 1970. Cela a finalement permis d'avoir une collecte presque totale des eaux usées produites et, surtout, de protéger l'environnement. C'est le premier enjeu, notamment autour des pollutions de type nutriments et carbone pour éviter l'eutrophisation, mais évidemment aussi autour des micropolluants.

Depuis une vingtaine d'années, on essaie également de définir quels types d'informations sur les usages et pratiques des résidents obtenir à partir de l'analyse de ces eaux usées.

1 Typologie et collecte des eaux usées

1.1. Composition des eaux usées

En fonction des sources qui contribuent à l'eau usée brute analysée, on a la capacité d'obtenir des informations sur les différents usages. Une eau usée dans un réseau unitaire, comme c'est le cas pour l'agglomération parisienne aujourd'hui, collecte différents types d'eau telles les eaux-vannes⁵ (principalement les eaux des toilettes) mais également les eaux grises⁶, qui sont toutes les eaux sanitaires utilisées au domicile, et qui représentent autour de 20-25 % de l'eau usée, selon que l'on est en temps sec ou en temps de pluie.

5. Eaux usées provenant principalement des toilettes, contenant matières fécales et urines.

6. Eaux usées provenant des évier, douches, lave-linge, mais sans déchets organiques solides.

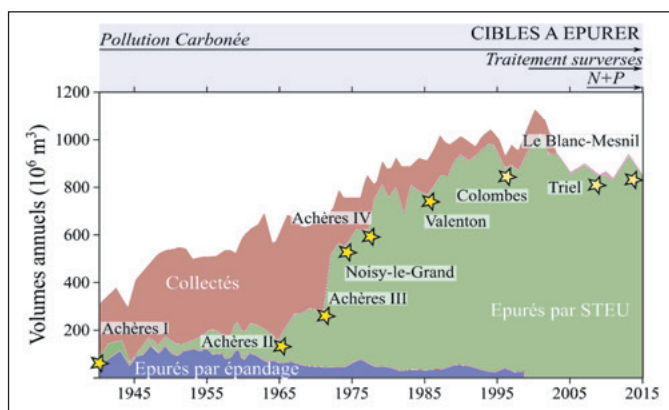


Figure 3

Évolution du volume de l'eau usée collectée (en rouge), épurée (en bleu) et épurée en station (en vert) de 1940 à nos jours.

Dans le cas d'un réseau unitaire, lorsqu'il pleut, les effluents industriels, qui vont aussi avoir une typologie de la contamination et de la composition organique et microbologique distincte, et les eaux de lessivage urbain⁷ vont être mélangés avec ce que l'on a longtemps appelé les «eaux brunes⁸» pour former les eaux usées. Tous ces types d'eau sont collectés puis envoyés en station de traitement des eaux usées.

1.2. Traitement en stations d'épuration

Pour donner une idée de l'échelle, la station Seine-Aval, qui est située sur le site d'Achères⁹, et gérée par le SIAAP, fait quasiment un

7. Eaux de pluie entraînant les polluants accumulés sur les surfaces urbaines (routes, trottoirs).

8. Mélange d'eaux grises et d'eaux-vannes, souvent très polluées.

9. Grande station d'épuration traitant une partie des eaux usées de la région parisienne.



Figure 4

Station d'épuration d'Achères (Yvelines).

Source : Google Maps.

kilomètre de long (**Figure 4**) : c'est certes une très grosse station d'épuration, mais cela illustre que le traitement des eaux usées nécessite des systèmes très concentrés et industrialisés pour gérer de très grands volumes d'eau usée. Quand on se situe à l'amont de cette station d'épuration, un chimiste pourrait dire que l'on peut essentiellement observer toute la chimie utilisée dans la ville. Mais, dans l'absolu, un autre corps de métier pourrait dire la même chose pour d'autres aspects : l'eau usée est vraiment le vecteur collecteur de toutes les informations, de tous les rejets possibles de la ville.

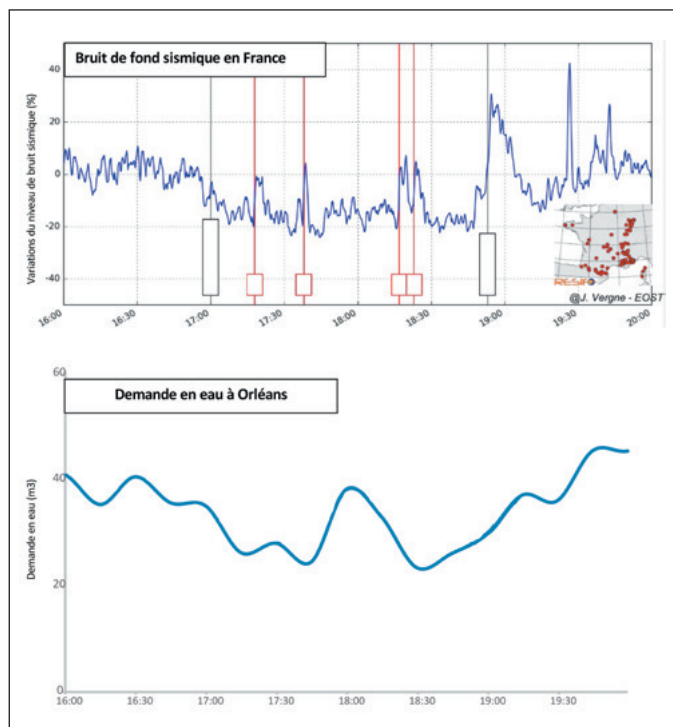


Figure 5

Corrélation, lors de la finale de la Coupe du monde 2018, entre le bruit de fond sismique en France et la demande en eau à Orléans.

2 Types d'informations issues des eaux usées

2.1. Informations anecdotiques sur les usages et pratiques

Certaines informations sont un peu anecdotiques, telle la corrélation observée à Orléans, en juillet 2018, lors d'un événement que certains d'entre vous ont peut-être vécu, la finale de la Coupe du monde de football entre la France et la Croatie, entre le bruit de fond sismique et la demande en eau (**Figure 5**) : on repère quatre moments forts au niveau du bruit sismique¹⁰, ainsi que quatre petits pics de la demande en eau potable, qui va devenir ensuite de l'eau usée, et qui correspondent en

10. Vibrations naturelles de faible intensité enregistrées en permanence par les sismographes.

fait aux quatre buts que nous avons mis. Lors des quatre buts de l'équipe de France, on observe une augmentation du bruit sismique. On note aussi que l'on consomme beaucoup plus d'eau avant et après le match, et lors de la mi-temps (**Figure 5**).

D'une certaine manière, pour des pratiques liées à un usage événementiel, ici, la demande en eau, on va avoir la capacité de retrouver les usages d'un point de vue quantitatif.

2.2. Informations spécifiques : l'exemple des substances illicites

Mais l'analyse des eaux usées révèle également des pratiques moins connues. Si on veut connaître la consommation de café, il suffit d'aller demander aux magasins combien ils ont vendu de café (ce qui n'est pas si simple, mais possible), mais il y a des produits pour lesquels les données des ventes n'existent pas, notamment les substances illicites. C'est notamment sur ces molécules que le rôle des eaux usées dans l'évaluation des usages dans la population s'est développé d'après l'idée d'un éminent chimiste américain en 2001, Christian Daughton¹¹ : il s'est demandé si le contenu en drogues illicites des eaux usées pouvait nous renseigner sur les usages qui en sont faits par la population. C'était le lancement de l'épidémiologie basée sur les eaux usées.

Puis, d'autres approches ont été utilisées, par exemple pour connaître l'exposition à la contamination atmosphérique. On a du mal à la caractériser d'un point de vue spatiotemporel, mais on y est exposé, on métabolise ces contaminations, puis on les excrète, notamment *via* les urines : l'idée est de regarder dans les eaux usées si l'on est en mesure d'estimer cette exposition.

2.3. La surveillance épidémiologique

Enfin, on est capable de faire de la surveillance épidémiologique, de détecter du matériel génétique dérivé d'agents pathogènes dans les eaux usées, ce qui nous permet d'estimer la circulation de l'épidémie dans la population, notamment durant la pandémie de SARS-Cov-2.

Évidemment, il y a des types d'eau qui ne vont pas nous intéresser pour certains usages. Typiquement, les eaux de lessivage urbain vont avoir tendance à plutôt charrier des métaux et des macrodéchets, qui ne présentent pas forcément d'intérêt pour évaluer la santé et le bien-être des populations.

Les rejets industriels permettent l'étude d'autres types de produits, comme certains biocides¹², mais ils ne sont pas au cœur de l'épidémiologie basée sur les eaux usées, car n'étant souvent pas excrétés par les résidents ou les

11. Chercheur américain ayant exploré l'impact environnemental des médicaments et des substances chimiques dans l'eau.

12. Substances chimiques utilisées pour tuer ou contrôler les organismes nuisibles (bactéries, insectes, champignons).

travailleurs mais étant des résidus de processus industriels. Celle-ci s'est en effet principalement concentrée sur les eaux domestiques à travers l'étude des agents pathogènes, virus, micro-organismes, mais aussi des produits pharmaceutiques, des résidus de drogue ou encore du bol alimentaire.

3 Méthodologies analytiques et défis

3.1. Approches quantitatives : la recherche de traceurs

La grande force des données issues des eaux usées est qu'elles peuvent être considérées comme quantitatives et objectives. Il y a une vingtaine d'années, quand on voulait savoir quels étaient les usages des drogues dans une ville, on faisait des enquêtes, sujettes à des réponses pouvant être plus ou moins objectives en fonction

de la population enquêtée, de la véracité ou de l'honnêteté des réponses fournies.

L'eau usée a cet avantage : elle ne ment pas si on arrive à analyser son contenu de manière robuste. L'autre gros point fort de l'eau usée, si l'on s'intéresse de manière générale au bien-être des populations, est que l'on est très proche des sources d'excrétion et que, heureusement, la majorité des molécules présentes dans les eaux usées brutes ne sont plus retrouvées dans le milieu naturel. Être dans les eaux usées brutes permet d'avoir des signaux beaucoup plus variés et à des concentrations beaucoup plus élevées, donc *a priori* plus faciles à détecter.

Le principe de l'épidémiologie basée sur les eaux usées est très simple (**Figure 6**) puisque l'on utilise une molécule à laquelle on est exposé : on la métabolise dans notre organisme, on l'excrète *via* les urines ou les excréments en fonction de ses propriétés physicochimiques, puis la molécule est collectée en station d'épuration et de traitement des eaux usées. On mesure une concentration de l'analyte¹³ qui nous intéresse, dans cette eau usée brute, puis on la normalise, par rapport au débit¹⁴, par rapport à la dose consommée, par rapport à la population pour obtenir, par exemple, le nombre de doses consommées par jour et par

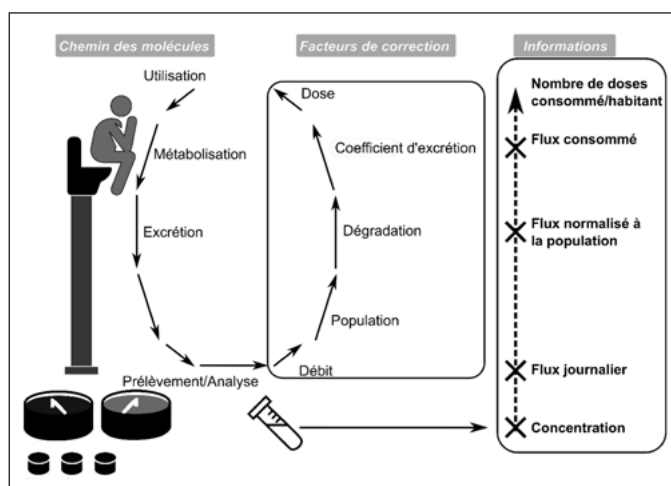


Figure 6

Principe de l'épidémiologie basée sur les eaux usées : remonter le cycle de vie du produit afin de déterminer sa consommation.

13. Substance spécifique recherchée ou mesurée dans un échantillon lors d'une analyse.

14. Ajustement des mesures en tenant compte de la quantité d'eau circulant dans un système.

1 000 habitants pour la molécule ciblée.

Le cas idéal de l'épidémiologie basée sur les eaux usées est d'avoir cette vision quantitative d'un usage, ou d'une pratique effectuée dans une zone de collecte. Évidemment, associé à cela, il y a une marge d'erreur : il faut avoir beaucoup d'humilité par rapport aux résultats que l'on produit, quand bien même on est assez confiant sur le fait qu'ils ont un sens.

Une étude bibliométrique montre que l'épidémiologie basée sur les eaux usées est restée assez confidentielle pendant une dizaine d'années (**Figure 7**). La première étude publiée sur les drogues illicites remonte à 2008. Ensuite, des études se sont intéressées aux produits pharmaceutiques, puis d'autres dérivés : le bol alimentaire, le stress oxydatif¹⁵...

C'est réellement la pandémie de Covid-19, avec l'analyse des matériels génétiques de SARS-CoV-2¹⁶ dans les eaux usées, qui a fait exploser cette discipline. À un moment donné, l'action publique avait besoin aussi de s'armer, d'être outillée différemment qu'avec les tests, pour obtenir de l'information sur la population, aussi l'eau usée est-elle apparue comme particulièrement

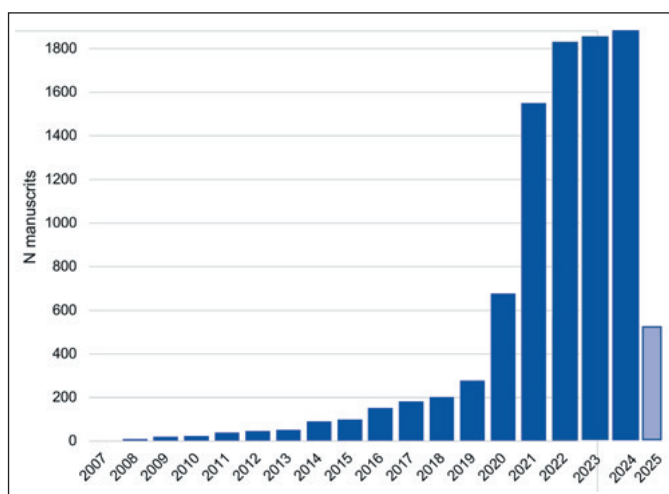


Figure 7

Étude bibliométrique du nombre de manuscrits portant sur l'épidémiologie basée sur les eaux usées.

prometteuse de ce point de vue. Il existe donc une expansion progressive dans les thématiques en démarrant sur les substances illicites, avec l'objectif de faire le lien avec des pratiques, puis une diversification des traceurs¹⁷ que l'on suit dans les eaux usées pour arriver à une liste d'applications qui est de plus en plus large.

3.2. Application à la connaissance de la dynamique temporelle des usages : exemple d'un médicament et d'une drogue récréative

Dans le cas des contaminants organiques, la première étape consiste à mesurer la concentration d'une molécule

15. Déséquilibre entre radicaux libres (les radicaux libres sont des molécules instables provoquant des dommages cellulaires, neutralisés par les antioxydants pour limiter leurs effets) et mécanismes de défense, pouvant endommager les cellules.

16. Virus responsable de la pandémie de Covid-19, transmis par l'air ou les surfaces contaminées.

17. Substances indicatrices (médicaments, drogues) permettant de surveiller l'activité humaine ou sanitaire dans une population.

dans de l'eau usée. La **figure 8** présente l'exemple d'une équipe belge qui a mesuré la méthadone¹⁸, pendant un an, à l'entrée d'une station d'épuration à Bruxelles. On voit que la variation temporelle de la concentration exprimée en milligrammes par jour par 1 000 équivalents habitants est un peu erratique et n'a pas de valeur ajoutée très nette au-delà d'une variation autour d'une moyenne pour ce médicament.

L'autre exemple est celui de la MDMA¹⁹, le produit que l'on excrète quand on consomme de l'ecstasy²⁰. On observe une dynamique qui apparaît plus cyclique. Cette cyclicité est liée à son usage récréatif avec une dynamique semaine/week-end et notamment un très grand pic de contamination à la

nouvelle année. Quand bien même on savait *ab initio*²¹ que la MDMA était principalement consommée les week-ends du fait de son usage récréatif, la valeur ajoutée de l'épidémiologie basée sur les eaux usées est de permettre d'obtenir des données en temps quasi réel et de quantifier cette variabilité d'usage semaine/week-end ou liée à des événements particuliers.

Le premier défi est de trouver des traceurs spécifiques des usages.

Tous les usages ne sont pas pour autant simples à suivre dans les eaux usées, et l'un des premiers objectifs est d'identifier dans les eaux usées une molécule que l'on peut relier de manière spécifique à un traceur. Prenons le cas des opiacés²² (**Figure 9**).

18. Médicament utilisé pour traiter la dépendance aux opiacés, limitant les symptômes de manque.

19. Drogue psychoactive provoquant euphorie et modification de la perception.

20. Forme synthétique de la MDMA, souvent consommée en soirée ou lors de festivals.

21. Terme latin signifiant « depuis le début », souvent utilisé en sciences pour désigner des calculs ou théories fondamentaux.

22. Substances dérivées de l'opium (naturelles ou synthétiques), souvent utilisées comme analgésiques puissants.

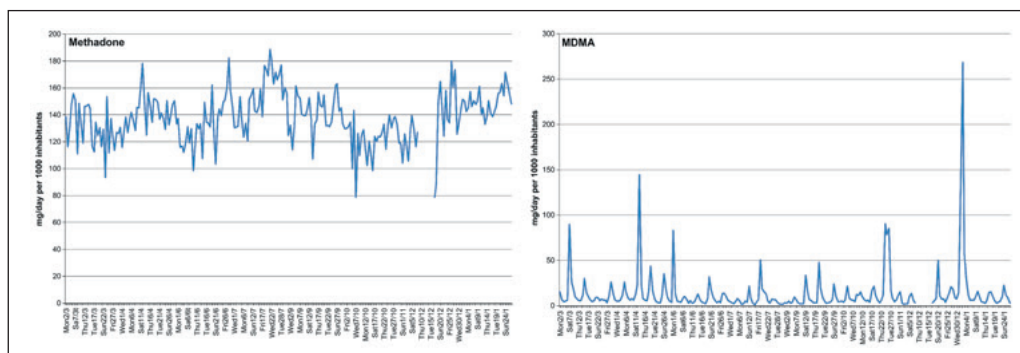


Figure 8

Évolution du taux de méthadone (à gauche) et de MDMA (à droite) dans les eaux usées de Bruxelles sur un an.

Adapté de Van Nuijs *et al.*, 2011 (Environment International, Elsevier).

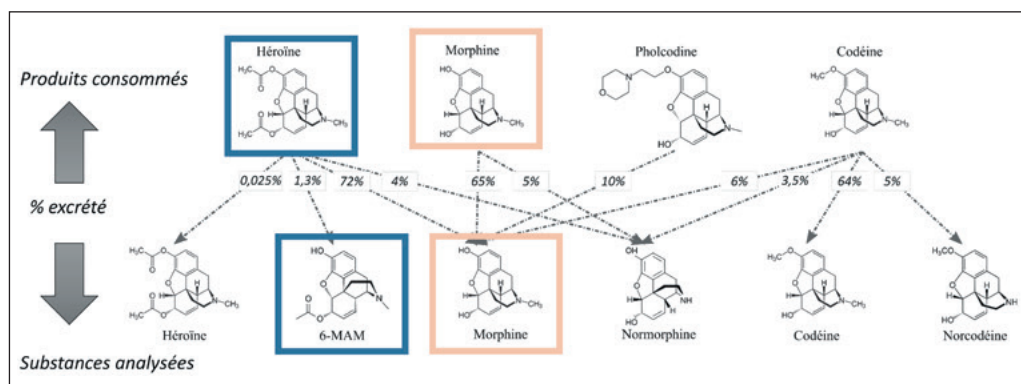


Figure 9

Produits opiacés consommés et métabolites finalement analysés.

Les opiacés sont un mélange entre des produits licites et illégitimes, par exemple l'héroïne²³, qui est un produit illégitime, et la morphine²⁴, la pholcodine²⁵ et la codéine²⁶, trois produits licites consommés comme antalgiques. Chacun de ces produits est métabolisé, notamment par voie rénale²⁷, en différents sous-produits qui s'entrecroisent. Si l'on souhaite recalculer la consommation d'héroïne, il n'y a que deux traceurs spécifiques : soit l'héroïne directement, soit la 6-monoacétylmorphine (6-MAM²⁸), mais l'héroïne étant excrétée à 0,025 % de la dose

consommée, nous sommes clairement en dessous des limites de détection. On préfère donc analyser la 6-monoacétylmorphine pour estimer les consommations d'héroïne.

Cependant, si l'on souhaite estimer l'usage de la morphine, il n'y a aucun sous-produit qui soit spécifique de sa consommation. Il faut donc déconvoluer des signaux²⁹ entre diverses sources possibles, et ce sont des travaux qui sont toujours difficiles parce que l'on rajoute un facteur d'erreur.

Le deuxième défi est d'évaluer la stabilité des traceurs dans les eaux usées.

Un autre élément important à prendre en compte pour valider le traceur que l'on mesure est que les eaux usées sont un milieu très réactif dans lequel certaines molécules se dégradent très rapidement. Prenons trois molécules

23. Opiacé illégitime dérivé de la morphine, provoquant une dépendance grave et des effets euphorisants.

24. Analgésique, puissant opiacé utilisé pour traiter des douleurs intenses.

25. Médicament opiacé utilisé pour soulager la toux sèche.

26. Opiacé utilisé comme analgésique ou antitussif, présent dans de nombreux médicaments.

27. Chemin d'élimination des substances par les reins, *via* l'urine.

28. Métabolite intermédiaire de l'héroïne dans l'organisme, détecté dans des analyses toxicologiques.

29. Processus mathématique permettant de séparer des informations superposées dans un signal complexe.

comme exemple pour évaluer l'évolution de leur concentration relative dans une eau usée après 2 à 48 heures pour différents types d'eau usée (**Figure 10**).

Pour un édulcorant comme l'acésulfame³⁰, et pour les durées testées, autour de 12 heures dans ce cas, la variabilité de la concentration de cette molécule dans l'eau usée est presque inexistante. On considère donc que c'est un bon traceur, un traceur robuste pour lequel la stabilité ne va pas impacter notre lecture des usages, c'est-à-dire que, pendant l'excrétion et le prélèvement pour analyse, la concentration varie peu.

À l'inverse, la méthadone va subir des dégradations très importantes, notamment par la biodégradation, à partir de 24 heures de temps de séjour dans l'eau usée. Il est donc nécessaire de prendre en compte un facteur de stabilité : si j'excrète un milligramme, mais que, 12 heures après,

il n'en reste que 0,1 milligramme et que je veux estimer l'usage initial fidèlement, il faut prendre en compte cette perte d'information qui est due à l'eau usée.

Le dernier cas est la benzoylecgonine³¹, qui est un produit de dégradation de la cocaïne³² dans les eaux usées : sa concentration relative augmente avec le temps de séjour dans l'eau usée. Il est dans ce cas nécessaire d'utiliser un facteur de stabilité négatif, c'est-à-dire de diminuer la concentration observée car supérieure à la concentration excrétée, parce que cette molécule est métabolisée dans l'eau usée par dégradation du composé. Ce sont trois cas de figure différents qui démontrent qu'il est indispensable d'évaluer la stabilité des molécules qui nous intéressent avant d'espérer évaluer quantitativement les usages.

31. Principal métabolite de la cocaïne, utilisé comme indicateur dans les analyses d'eaux usées.

32. Stimulant puissant et drogue illégale dérivée des feuilles de coca, provoquant une dépendance rapide.

30. Édulcorant artificiel utilisé dans de nombreux produits alimentaires, parfois retrouvé dans les eaux usées.

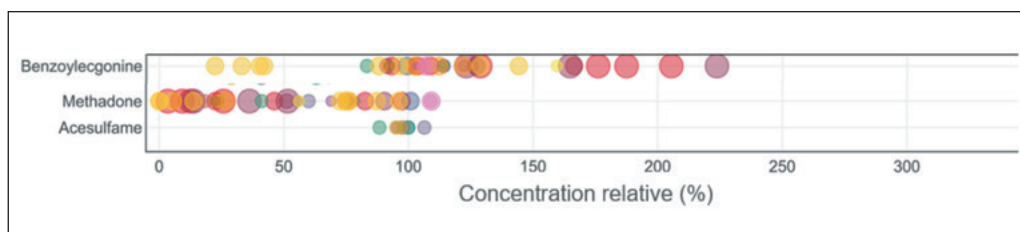


Figure 10

Stabilité de différentes espèces analysées en eau usée au cours du temps. Plus les bulles sont décalées vers la gauche par rapport au trait vertical des 100 %, plus ce produit va disparaître avec le temps, et inversement. Plus la bulle est grosse, plus le temps de résidence est long (entre 2 et 48 heures).

Adapté de Lin et al., 2021 (Environmental Science & Technology, American Chemical Society).

Le troisième défi est de pouvoir analyser les traceurs de manière robuste et répliquable.

La **figure 11** illustre les résultats d'une étude à l'échelle internationale. Chaque point représente l'analyse d'une substance illicite par un laboratoire, dans le cadre d'un réseau européen très développé aujourd'hui.

En représentant la concentration fixée pour chacun des échantillons en unité log³³ et la déviation standard³⁴ qui a été observée en tripliquant l'analyse au sein de chaque laboratoire, on remarque que moins la concentration est grande, plus le facteur d'erreur est élevé. En chimie, c'est relativement logique, mais même pour des concentrations très significatives pour certains composés et des matrices relativement simples comme l'eau du robinet, on peut avoir des facteurs d'erreur allant jusqu'à 40-50 % sur la concentration mesurée. Il faut donc éviter de discuter d'augmentations de 10 % sur des tendances quand l'erreur analytique est significative, surtout dans le cadre de comparaisons entre laboratoires utilisant des méthodologies différentes. L'humilité est donc toujours nécessaire et il faut s'assurer ne donner une conclusion que quand elle est significative, et avec beaucoup de précautions. Ce travail

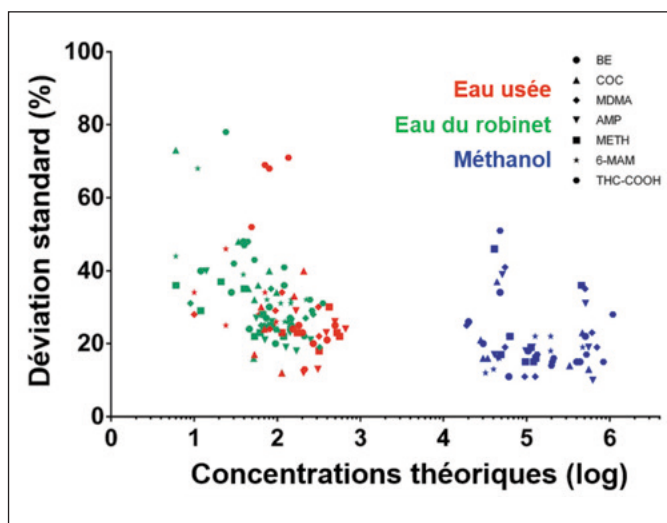


Figure 11

Graphique représentant le pourcentage d'erreur en fonction de la concentration en différentes drogues illicites pour un réseau de laboratoires européens.

Adapté de Van Nuijs *et al.*, 2018 (Trends in Analytical Chemistry, Elsevier).

de validation est de longue haleine.

4 Applications et perspectives

Une fois ce travail de validation réalisé sur les molécules, on peut raisonnablement considérer que la mesure effectuée en eau usée reflète l'excrétion par les populations, et donc les usages de celle-ci. L'un des enjeux est également de montrer la complémentarité entre les mesures effectuées dans les eaux usées et les besoins d'évaluation de la santé des populations.

4.1. Santé publique et réglementation : suivi de l'évolution des pratiques

Le premier exemple concerne le suivi de la consommation de

33. Mesure logarithmique utilisée pour exprimer des réductions importantes (par exemple, en traitement des eaux).

34. Indicateur statistique mesurant la dispersion des données autour de leur moyenne.

drogues illicites. La **figure 12** concerne le cas d'une zone de collecte en Australie où la consommation de la méthamphétamine³⁵ a été suivie pendant six années et où, sur cette période, le flux en eau usée – et donc la consommation – a été multiplié par quatre. Il est impossible de dire si les consommateurs en consomment plus ou si davantage de consommateurs en font usage. Mais le constat est là : l'usage augmente. Et cela représente clairement une alerte pour les autorités de régulation et aussi, évidemment, pour les autorités de santé publique.

Concernant la santé publique aux États-Unis, le nombre d'overdoses³⁶ liées aux opiacés est actuellement en

augmentation constante : il a été multiplié par deux en quelques années (**Figure 13, à gauche**).

Sur la base de ces résultats, les zones à risque ont été cartographiées afin de comparer les usages et de sensibiliser spécifiquement certaines pharmacies sur leur latitude à délivrer des opiacés. On voit que le nombre d'overdoses reportées par quartier correspond à l'exposition aux opiacés déterminée dans les eaux usées (**Figure 13, à droite**). L'idée était de spatialiser un message de sensibilisation aux pharmacies et aux officines : « Attention, vous êtes dans une zone à risque, ne vendez vos opiacés qu'aux gens qui en ont réellement besoin. »

Une seconde possibilité permise par les eaux concerne la triangulation des informations³⁷

35. Stimulant synthétique souvent consommé illégalement, connu pour ses effets addictifs puissants.

36. Consommation excessive d'une substance, souvent dangereuse voire mortelle.

37. Fait de croiser plusieurs sources de données pour obtenir des résultats plus fiables et complets.

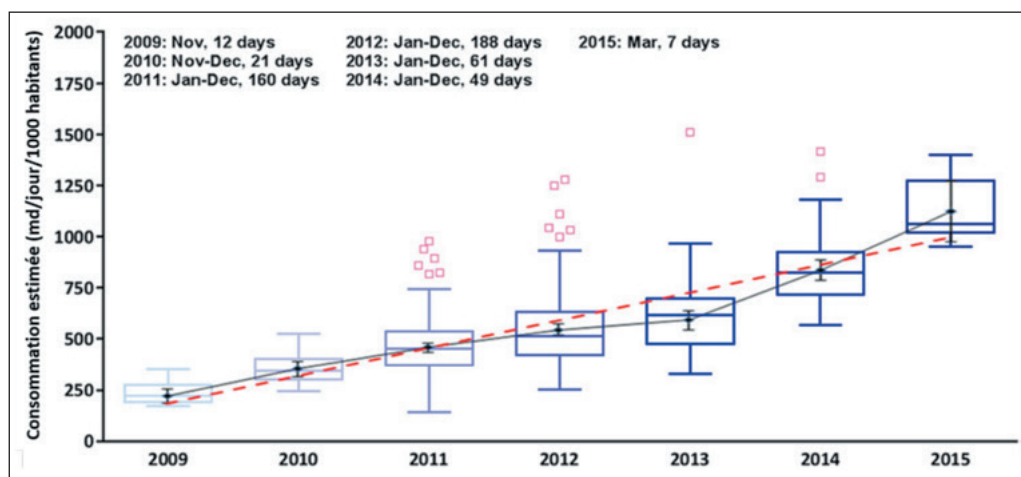


Figure 12

Évolution de la consommation de méthamphétamine dans une aire urbaine.

Adapté de Bruno *et al.*, 2018 (Science of the Total Environment, Elsevier).

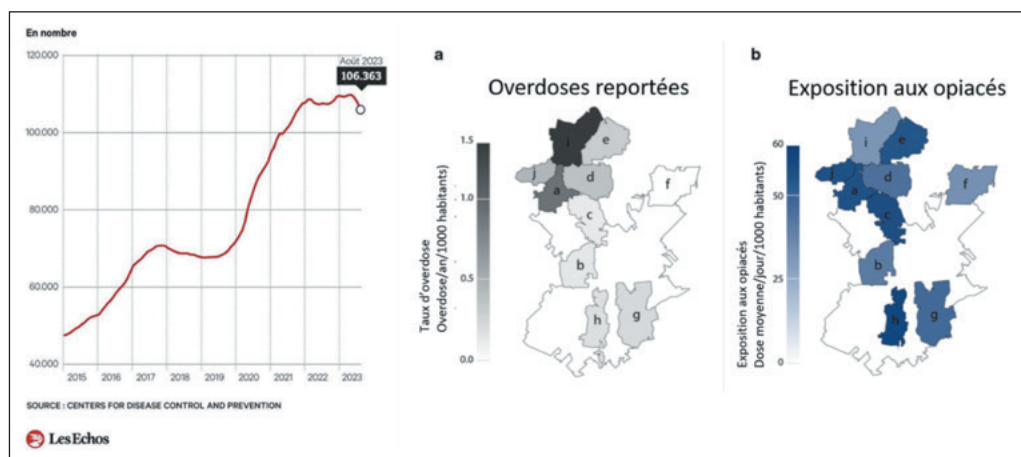


Figure 13

Nombre d'overdoses par an aux États-Unis (à gauche) et corrélation entre overdoses et exposition aux opiacés déterminées par les eaux usées (à droite).

Adapté de Endo et al., 2020 (Journal of Medical Toxicology, Springer-Nature).

pour assurer un suivi des usages hors prescription, difficilement accessible par d'autres biais.

En France, nous disposons d'une base de données des usages des produits pharmaceutiques, Open Medic, qui concerne les usages de produits pharmaceutiques délivrés sur prescription en officine. Il en est de même en Espagne. On peut comparer ces données avec celles issues des eaux usées.

Des molécules ont été mesurées dans les eaux usées de deux villes, à Barcelone et à Gérone³⁸ (Figure 14). Pour certaines molécules (encadrées en orange), on constate une différence entre ce qui est mesuré dans les eaux usées et ce qui est prescrit. Cela permet de qualifier et de quantifier des usages hors

prescription, ce que nous n'aurions pas la capacité de faire autrement. Sur cet exemple, on retrouve le paracétamol³⁹ (ACE), ainsi que l'ibuprofène⁴⁰ (IBU), l'érythromycine⁴¹ (ERY) et la codéine (COD) – sachant que les mésusages de paracétamol, par exemple, sont absolument dramatiques en France.

Quand la pandémie de Covid est arrivée, l'État a eu besoin de disposer d'un outil pour évaluer sa circulation. En France, le réseau Obépine⁴² a alors été

39. Médicament couramment utilisé pour traiter la douleur et la fièvre, sans effet anti-inflammatoire.

40. Médicament anti-inflammatoire et analgésique utilisé pour traiter douleur, fièvre et inflammations.

41. Antibiotique utilisé pour traiter diverses infections bactériennes.

42. Réseau français, créé en 2020, surveillant la circulation de l'épidémie de Covid-19 dans les eaux usées pour suivre son évolution.

38. Ville située dans le nord-est de l'Espagne, en Catalogne.

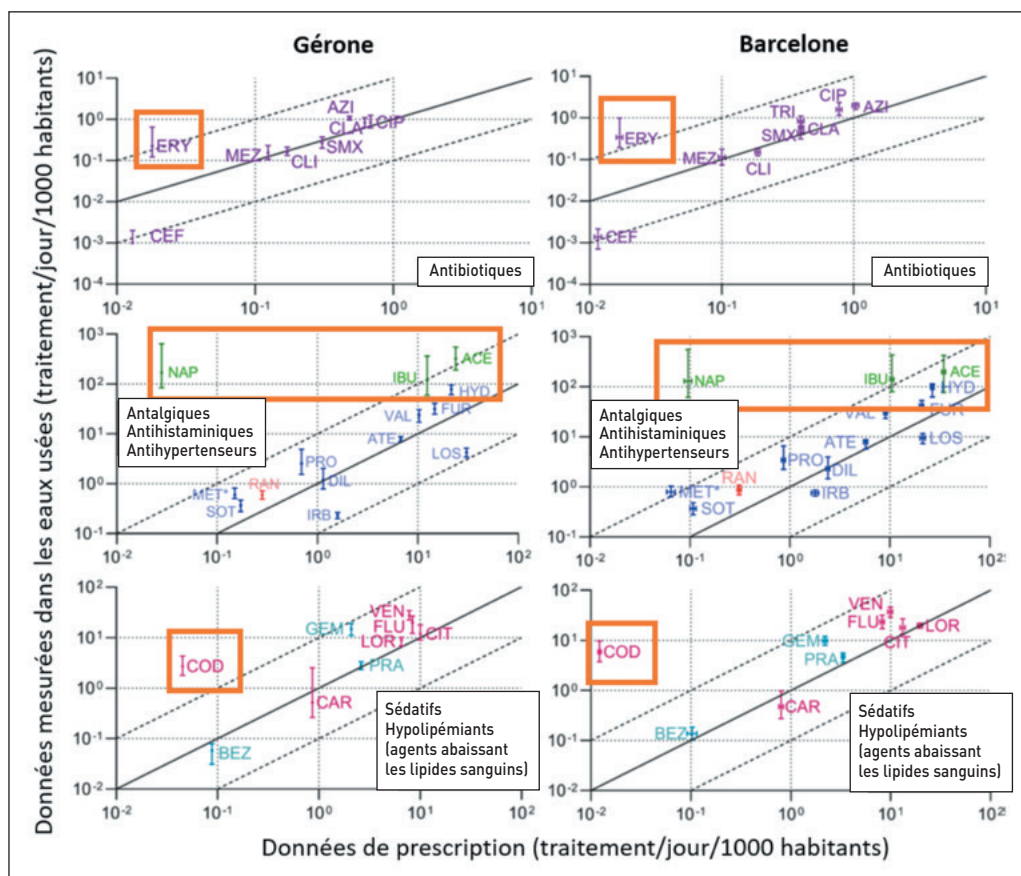


Figure 14

Comparaison entre la consommation de médicaments mesurée par les eaux usées et les doses prescrites en officine.
Adapté de Escolà-Casas *et al.*, 2021 [Environment International, Elsevier].

initié par plusieurs équipes de recherche, notamment de Sorbonne Université, de l'université de Lorraine et Eau de Paris. Ce réseau avait pour ambition de suivre 40 % de la population française, à travers un prélèvement bihebdomadaire effectué dans 150 stations de traitement des eaux usées. La carte de ce réseau de surveillance (Figure 15) a permis de proposer un indicateur de la contamination en matériel génétique de SARS-CoV-2 dans les eaux usées,

avec des mises à jour hebdomadaires des tendances en accès libre.

Pour le cas d'Orléans, on peut voir sur la figure 16 qu'il y avait une bonne correspondance entre l'évolution de cet indicateur de présence de SARS-CoV-2 dans les eaux usées et le taux d'hospitalisations ou le taux d'incidence dans la population. La force de cet outil était qu'il permettait de manière peu onéreuse d'anticiper les tendances parfois latentes : une réémergence

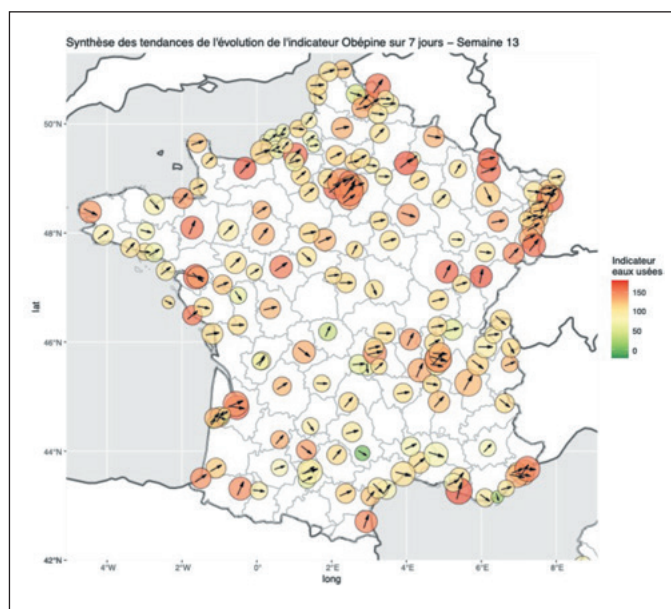


Figure 15

Carte représentant le réseau d'analyse Obépine (reseau-obepine.fr).

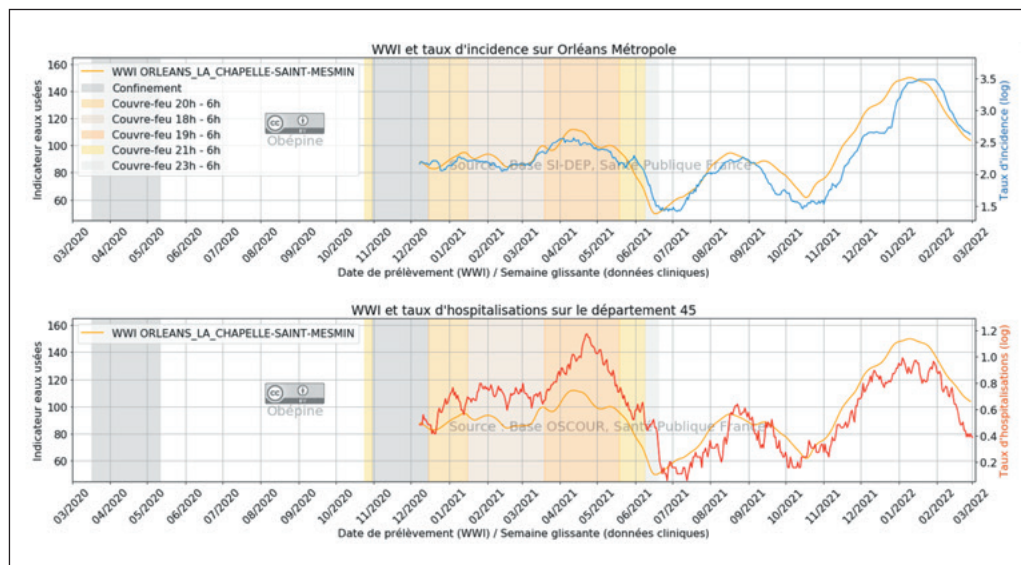


Figure 16

Corrélation entre le taux d'incidence (en bleu), le taux d'hospitalisations (en rouge) et les relevés de présence du virus SARS-CoV-2 dans les eaux usées (en jaune).

Données issues du réseau Obépine.

dans les eaux usées permettait de se préparer à prendre des décisions du point de vue de la santé publique.

4.2. Autres utilisations potentielles de l'analyse des eaux usées

Pour sortir un peu des drogues et des agents pathogènes, quand bien même c'est extrêmement intéressant et très utile d'un point de vue social et public, des chercheurs australiens ont essayé de développer une approche de type « dites-moi ce que vous excrétez et je vous donnerai votre profil socio-économique et votre âge ».

Le résultat statistique de la synthèse de ces études est présenté sur la **figure 17**.

L'axe vertical indique une corrélation avec le statut socioéconomique. Plus une molécule est vers le bas, plus elle est corrélée avec un statut socioéconomique désavantagé. C'est l'inverse vers le haut, plus avantage d'un point de vue socioéconomique, et pour des profils plus jeunes et des profils plus âgés selon l'axe horizontal, respectivement vers la gauche et vers la droite.

Cette étude a démontré que les personnes moins jeunes consomment plus de morphine

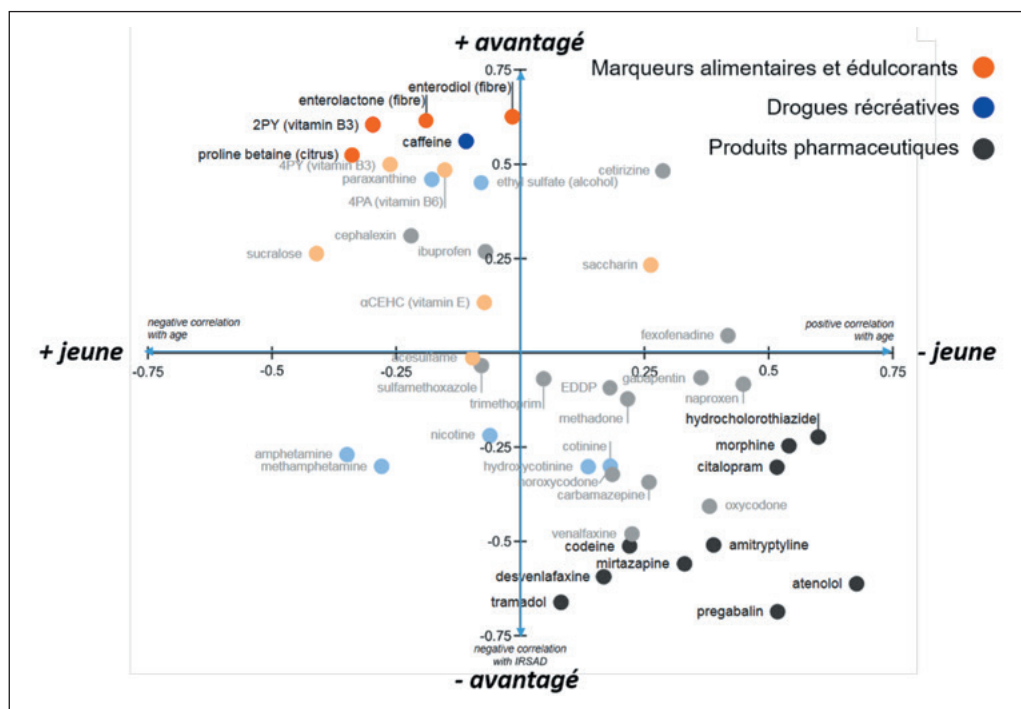


Figure 17

Impact de l'âge et du profil socioéconomique sur la présence de molécules dans les eaux usées.

Adapté de Choi et al., 2019 [Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, National Academy of Sciences].

et plus d'antihypertenseurs⁴³, ce qui, jusqu'à preuve du contraire, est assez logique du point de vue des pathologies que l'on développe lorsqu'on avance dans l'âge. Ensuite, on retrouve, pour ceux ayant un niveau socioéconomique plus désavantagé, des usages de molécules spécifiques, notamment des opiacés, que l'on peut relier avec des mésusages de certains produits. Ils ont aussi pu relier le fait d'être plutôt avantagé d'un point de vue socioéconomique avec

un bol alimentaire contenant beaucoup de produits non carnés comme des dérivés de fibres⁴⁴ et également d'autres types de produits. Cette première approche démontre à la fois des tendances préalablement identifiées, mais propose également une grille de lecture nouvelle montrant la dépendance de la composition des eaux usées avec la composition socioéconomique des zones urbaines qui les produisent.

43. Médicaments utilisés pour réduire la pression artérielle élevée.

44. Composants végétaux non digestibles favorisant le transit intestinal et la santé digestive.

Conclusion

Ces travaux sur l'utilisation de l'analyse des eaux usées pour évaluer la santé des résidents forment un ensemble cohérent mais à des degrés de maturité différents en fonction des usages que l'on souhaite suivre.

Si l'on revient à Victor Hugo, qui disait qu'un égoïste est cynique et qu'il dit tout, on peut considérer aujourd'hui que le quoi et le pourquoi d'aller mesurer la composition des eaux usées sont assez bien clarifiés. Les analyses des eaux usées sont un outil en soutien à des actions de santé publique, à de la sensibilisation, et fournissent des données quantitatives objectives permettant notamment de suivre en temps réel différentes pratiques pour lesquelles d'autres données sont difficiles à mobiliser, surtout à cette échelle spatiotemporelle.

Cependant, le comment pose problème : il y a des choses que l'on sait bien mesurer, à l'instar des produits pharmaceutiques et des drogues illicites. Mais on a besoin d'autres types de données à mobiliser pour comparer

des charges virales⁴⁵ ou pour les études du bol alimentaire et des micro-organismes, voire du bien-être.

Certains sujets sont encore à l'étape de la preuve de concept, comme l'évaluation du système immunitaire dans les eaux usées, l'évaluation du microbiote intestinal⁴⁶ des résidents dans les eaux usées ou encore leur stress oxydatif. Le potentiel des études possibles reste très important pour sortir de la seule analyse des drogues illicites qui a longtemps été l'apanage de l'épidémiologie basée sur les eaux usées pour aller vers des usages moins clivants et moins discriminants dans la population, et aussi augmenter la portée de ces analyses pour permettre une évaluation plus globale de la santé des populations.

45. Quantité de virus présente dans un échantillon biologique, indicateur de l'intensité d'une infection.

46. Ensemble des micro-organismes vivant dans l'intestin, jouant un rôle clé dans la digestion et l'immunité.

Chimie et eaux souterraines

D'après la conférence d'Alain Dupuy, professeur des universités en hydrogéologie, détaché au BRGM¹, à Orléans, en tant que directeur du programme EAU sur les ressources en eaux souterraines et le changement global, également codirecteur du Programme et Équipement Prioritaire de Recherche (PEPR) sur l'eau : « One Water – Eau, bien commun », et de Christophe Poinssot, directeur général délégué du BRGM. Ancien élève de l'École normale supérieure, docteur en sciences des matériaux, titulaire d'une HDR en chimie, il est membre de l'Académie des technologies.

Introduction

La **figure 1** donne une vision volumique de l'eau présente sur Terre : 97 % d'eau salée et seulement 3 % d'eau douce. Sur le volume total d'eau douce, 30 % sont des eaux souterraines. À noter que ce sont des ordres de grandeur.

Pour mieux se représenter les volumes disponibles, regardons la **figure 2** qui représente

notre planète : elle est bleue, l'atmosphère est remplie de vapeur d'eau et il y a des

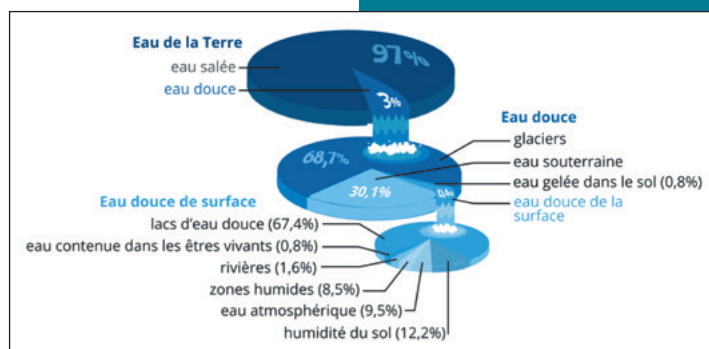


Figure 1

Répartition de l'eau sur Terre.

© OIEau, 2017.

1. BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières. Établissement public français de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. C'est le service géologique national français.

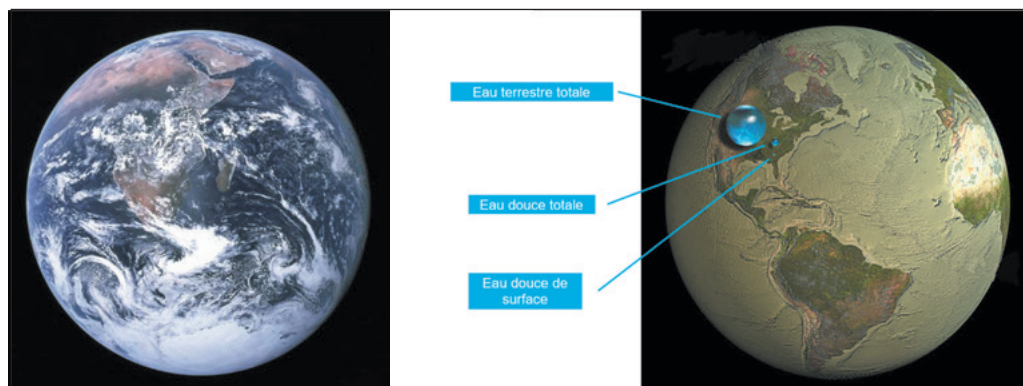


Figure 2

L'eau sur la Terre.

D'après © Howard Perlman, USGS ; Jack Cook, Woods Hole Oceanographic Institution ; Adam Nieman.

nuages. Tout ce qui est noir, c'est aussi de l'eau : ce sont les océans. Imaginons maintenant notre planète à la même échelle, mais avec les eaux retirées et rassemblées dans ces trois sphères à l'échelle. La plus grande, représente la totalité des eaux disponibles (eaux douces et salées) sur Terre, atmosphère comprise : cela représente une sphère de 1400 kilomètres de diamètre. La sphère moyenne représente le volume des eaux douces. Elle a environ 272,8 kilomètres de diamètre : elle contient les inlandsis², les calottes glaciaires, les glaciers, les eaux souterraines, toutes les eaux de surface, les marais, les cours d'eau. La plus petite des sphères est celle de l'eau douce dite « de surface » facilement accessible : ce sont les lacs, les cours d'eau, les rivières, les fleuves, les zones humides et les nappes

phréatiques (la première nappe qu'on peut atteindre depuis la surface). Cette sphère ne fait que 56,2 kilomètres de diamètre.

On ne crée pas d'eau sur Terre, il n'y a que des échanges. La Terre perd de l'eau par la haute atmosphère, mais elle en reçoit aussi par le cœur, par les roches qu'on appelle « ignées³ ». C'est de l'eau qui « remonte » des roches internes. Le bilan est à peu près constant : la **figure 3** représente le grand cycle de l'eau avec les flux, les stockages et les temps de résidence. Les flux sont intéressants, même si les chiffres, des milliers de kilomètres cubes par an, sont des ordres de grandeur compliqués à imaginer.

Ce qui est intéressant dans cette représentation, c'est qu'on y retrouve les volumes échangés ainsi que les stocks

2. Inlandsis : très grande étendue de glace recouvrant un continent et pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur.

3. Les roches ignées (ou magmatiques) se forment quand un magma se refroidit et se solidifie.

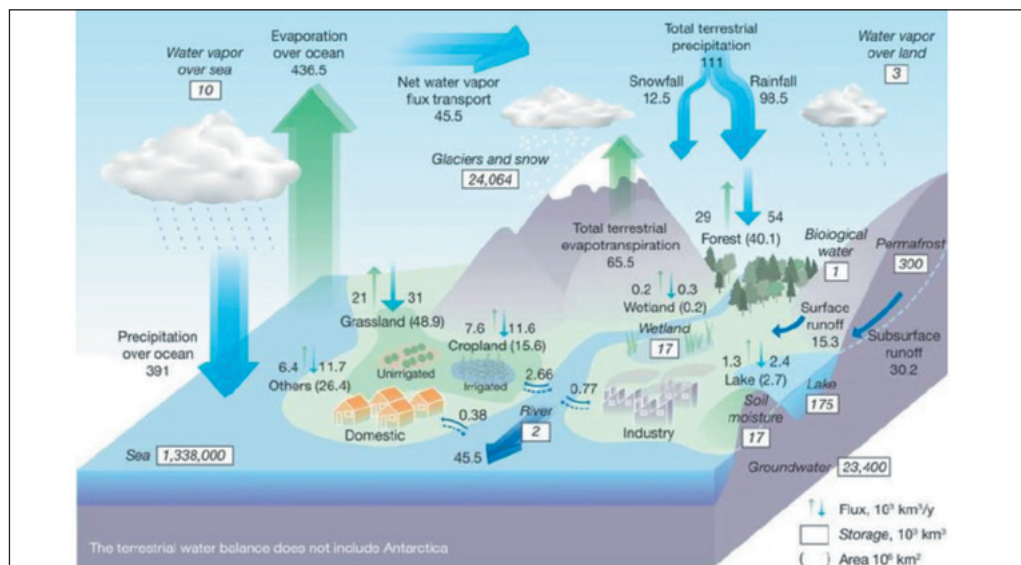


Figure 3

Le grand cycle de l'eau.

© Taikan Oki et Shinjiro Kanae, Science, 2008.

avec les chiffres encadrés : c'est le modèle qu'il faut garder en tête pour conceptualiser le grand cycle de l'eau avec des flux et des stocks.

Ainsi représenté, le grand cycle de l'eau permet de visualiser que les eaux souterraines représentent le plus gros volume d'eau douce disponible et le plus gros stock facilement accessible. Comme déjà dit, le grand cycle de l'eau fonctionne avec des volumes totaux finis, des flux importants et des temps de renouvellement très variables dans les différents compartiments, autrement dit des vitesses de circulation radicalement différentes entre les grands ensembles qui constituent le cycle de l'eau. La **figure 4** représente le cycle terrestre de l'eau de manière différente avec la notion d'aire de ruissellement.

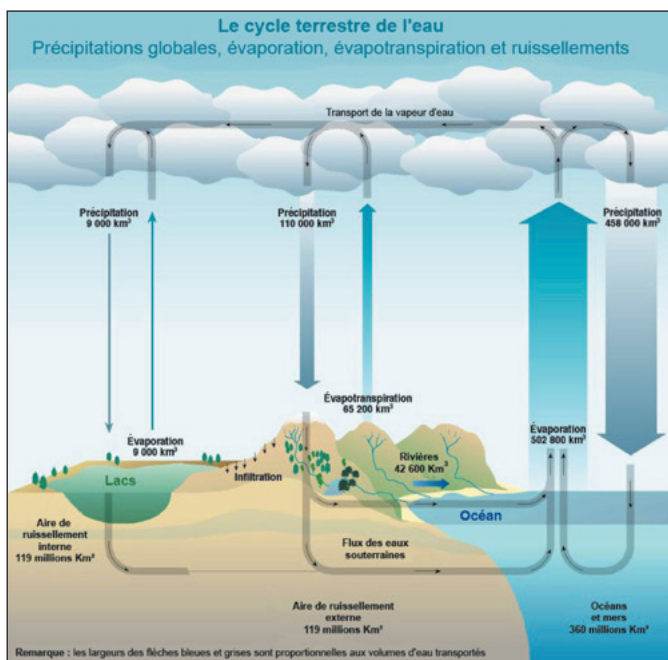


Figure 4

Le cycle terrestre de l'eau.

© UVED.

La **figure 5** est une autre représentation du cycle de l'eau souvent utilisée, qui permet de voir les stocks et les flux. Nous pouvons voir que les eaux souterraines représentent le plus gros stock, alors que le stock d'eau atmosphérique est beaucoup plus faible. Par contre, le flux de l'eau atmosphérique est énorme alors que le flux dans le souterrain est beaucoup plus petit. Cela se traduit par un taux de renouvellement ou un temps de résidence très court pour les eaux atmosphériques et beaucoup plus grand pour les eaux souterraines. Pour les eaux du sol, le temps de résidence est d'une année en moyenne, de vingt ans pour les eaux de surface telles que les lacs, alors que, pour les

eaux souterraines, il atteint facilement des centaines, voire des milliers d'années. Ces différences importantes changent beaucoup de choses parce qu'on ne gère pas un flux comme on gère un stock.

1 Hydrogéochimie

L'hydrogéochimie est la connaissance des caractéristiques chimiques et physicochimiques des eaux souterraines, des processus d'acquisition de leur composition et des lois qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous-sol.

En hydrogéologie, elle permet de gérer qualitativement le stock des eaux souterraines qui représentent, en France, environ 67 % de l'alimentation en eau potable. Cette science de l'hydrogéochimie est donc essentielle car, au-delà des schémas de circulation hydrodynamique dans le sous-sol, elle permet de calculer la composition de l'eau tout au long de sa circulation souterraine.

Le **concept de faciès hydrochimique** repose sur l'hypothèse selon laquelle la composition chimique de l'eau souterraine reflète un équilibre chimique des eaux avec les roches dans lesquelles elles circulent. On peut ainsi classer les eaux et établir leur carte d'identité en fonction de leur faciès. Les chimistes, hydrochimistes ou hydrogéochimistes ont ainsi cette capacité de dire, de simuler, de calculer l'évolution de la teneur en sels d'une eau, dans certaines concentrations, et l'évolution dans l'espace et dans le temps. Parmi les représentations d'analyses

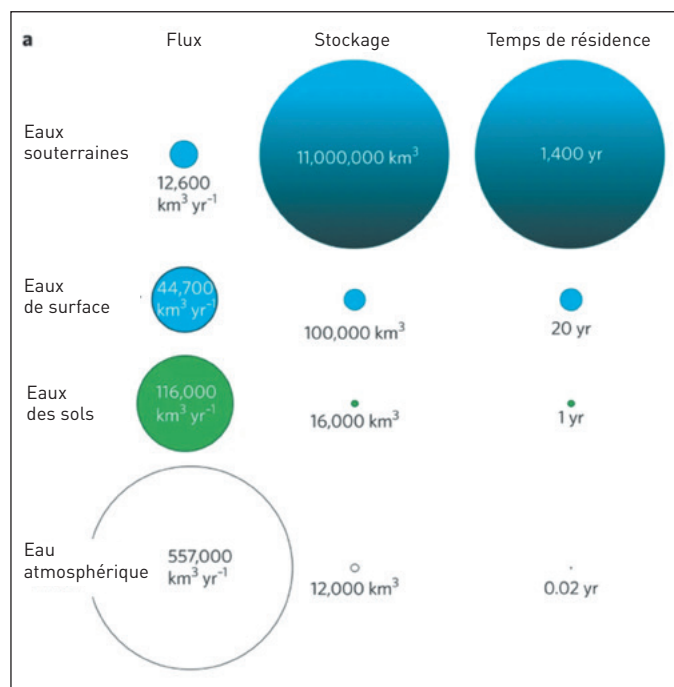


Figure 5

Flux, stockage et temps de résidence de l'eau dans les différents milieux.
D'après Aeschbach-Hertig et Gleeson, Nature Geoscience, 2012.

les plus célèbres (**Figure 6**), le diagramme de Schoëller-Berkaloff et celui de Piper sont actuellement parmi les plus utilisés pour les classes de qualité d'eau. On classe les eaux en bicarbonatée, calcique et magnésienne; les eaux souterraines appartiennent le plus souvent à cet ensemble.

Prenons l'exemple du Bassin parisien et examinons sa carte géologique (**Figure 7**). Sous la carte, on trouve la coupe géologique du bassin, qui correspond à la ligne qui part des Vosges et va jusqu'au pays d'Auge. C'est donc un bassin fermé qui se poursuit au-delà de la Manche et qui va jusqu'en Angleterre. En regardant le log stratigraphique (à droite de la carte géologique), tout ce qui est coloré représente les aquifères, c'est-à-dire les roches qui contiennent l'eau, dans lesquelles l'eau souterraine circule et que l'on peut puiser

à l'aide de forages. Ailleurs, quand ce n'est pas coloré, cela correspond à un aquitard ou semi-perméable. Ces horizons sont toujours saturés (remplis) d'eau, mais l'eau y circule moins vite et moins bien que dans un aquifère. Mais, surtout, dans l'aquitard, on ne sait pas sortir de l'eau, on ne sait pas l'exploiter. **On ne peut donc exploiter l'eau que dans les parties colorées, soit les aquifères.** Avant d'exploiter l'eau, la qualité de cette eau doit être considérée. On commence par regarder les interactions entre la roche et l'eau qui y circule. L'eau qui circule vient forcément d'un lieu donné de la surface : ce sont des eaux des précipitations avec la composition d'une eau de pluie. Au fur et à mesure du lent cheminement, à travers le sol puis le sous-sol dans l'aquifère, la composition de cette eau peut changer.

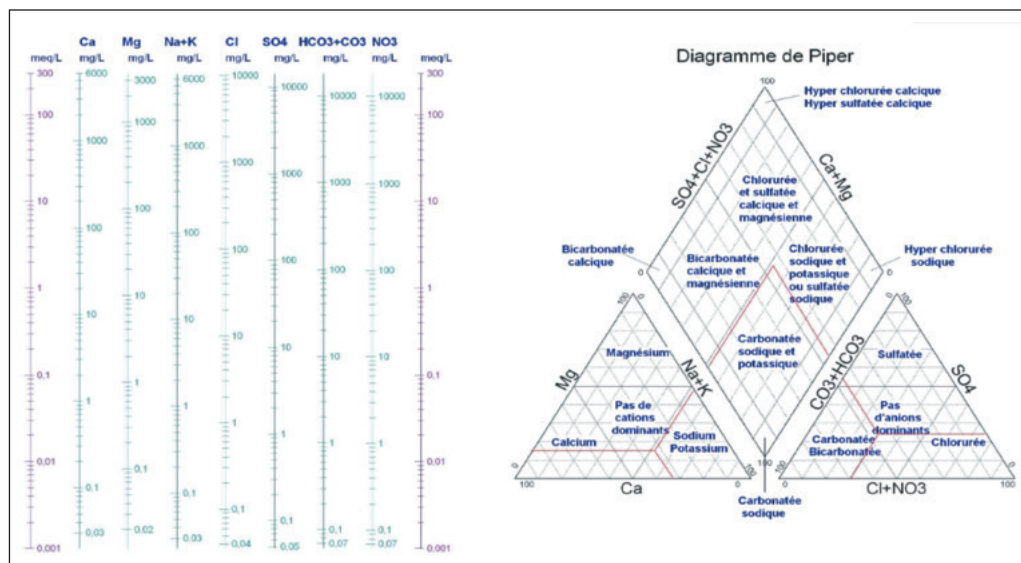


Figure 6

Diagramme de Schoëller-Berkaloff et diagramme de Piper.

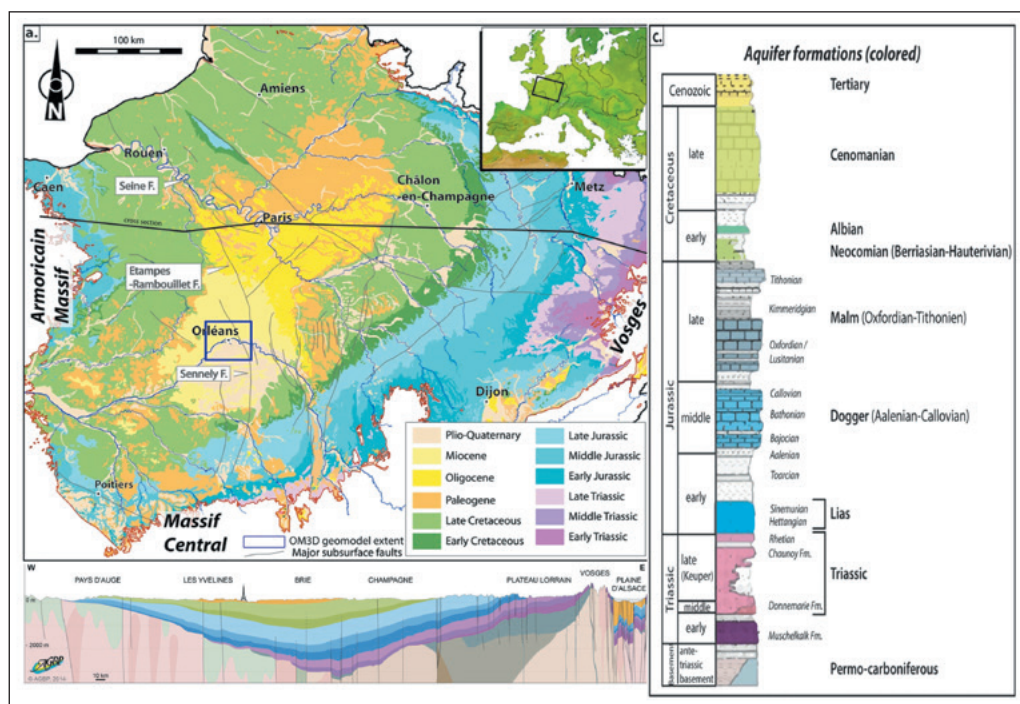


Figure 7

Carte et coupe géologique du Bassin parisien.

D'après P. Mas *et al.*, 2022.

Regardons l'exemple de la **figure 8**, qui représente la nappe stratégique de l'Albien située sous Paris, qui était connue pour être artésienne il y a longtemps. «Artésienne» signifie que l'on pouvait creuser un puits jusqu'à cette couche géologique située à peu près à 600 mètres de profondeur sous Paris, et que l'eau jaillissait par surpression.

À partir de la carte de la **figure 8**, on arrive maintenant à identifier, en fonction du lieu, les eaux selon leur composition. Du point de vue du fonctionnement hydrodynamique, lorsque la nappe est « libre », elle reçoit directement l'eau des précipitations.

L'eau s'infiltré à travers le sol, percole⁴ dans le sous-sol, rejoint la nappe libre de l'aquifère et se charge en éléments qui sont contenus dans le sol et la roche. Du point de vue de la qualité, tout va bien si le sol ou la roche ne contiennent pas ou peu d'éléments indésirés. Malheureusement, nous produisons de nombreux polluants que nous diffusons sur le sol, polluants qui peuvent ainsi contaminer les eaux qui s'infiltrent et percolent vers les nappes. De même, la roche aquifère, qui peut avoir des millions d'années, s'est

4. Percoler : pour un liquide, passer à travers des matériaux poreux.

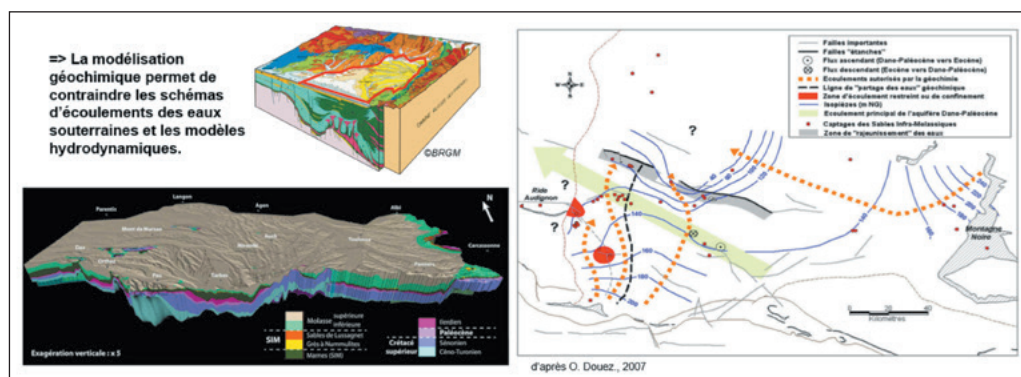


Figure 9

Modélisation hydrogéochimique du bassin du Sud-Ouest.

sédimentée avec une teneur en un élément x ou y , comme le sélénium ou le fluor. Cela pourra se traduire par une eau riche en ces éléments. C'est le cas de La Roche-Posay, qui est une eau thermique parce qu'elle contient du sélénium. Lorsque la présence d'éléments est induite par la géologie, on parle de « fond géochimique ». Pour qualifier une ressource en eau, il faut composer avec toutes ces données.

La [figure 8](#) montre également la cartographie des types d'eaux, qui sont très différents. Cela traduit une évolution de la qualité de l'eau en fonction du lieu où l'on se trouve, en fonction de la géologie que l'on a rencontrée et en fonction des contraintes d'écoulement que l'on a pu avoir.

L'hydrochimie et la géochimie ne servent pas qu'à caractériser le faciès de l'eau : la modélisation géochimique permet de contraindre les schémas d'écoulement des eaux souterraines et les modèles hydrodynamiques.

Les hydrochimistes modélisateurs ont la capacité de calculer comment cette eau va évoluer en fonction des variations de lithologie de la roche encaissante et de sa nature géologique. Ils sont également capables de dire, comme on peut le voir sur la [figure 9](#) avec l'exemple du Bassin aquitain, les écoulements chimiquement autorisés qui ont été déterminés par modélisation. Ils figurent en pointillés une limite interne dans l'écoulement, limite qui s'est mise en place naturellement avec des chimies d'eau incompatibles. Les connaissances hydrochimiques qui figurent sur cette carte ont été appréhendées dans les modélisations numériques : on a donc tenu compte de cette évolution et de ces contraintes pour revisiter le modèle de fonctionnement des ressources en eaux souterraines. Les modélisations hydrodynamiques et hydrochimiques ont ainsi pu donner des éléments de réponse aux décideurs pour dire comment gérer leurs ressources, où les exploiter, où ne pas les

exploiter, où c'était possible, où cela ne l'était pas. On est donc sur des champs disciplinaires complémentaires qui viennent se renseigner mutuellement.

Au niveau européen, la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE) fixe des objectifs et des méthodes pour atteindre le bon état des eaux. L'évaluation de l'état des ressources d'eau prend en compte des paramètres différents (biologiques, chimiques et quantitatifs) selon qu'il s'agit d'eaux de surface ou d'eaux souterraines. Leur qualité est contrôlée avec des critères qui sont donnés (Figure 10). Pour la DCE, on utilise la notion de « masse d'eau » : on ne parle pas de « nappes » ni d'« aquifères ». Ce sont des ensembles plus importants qui peuvent rassembler plusieurs aquifères. Concernant les eaux souterraines, les critères qui permettent de dire si la masse d'eau est de bonne ou de

mauvaise qualité, c'est-à-dire en bon ou en mauvais état, sont donnés sur la **figure 10**.

L'objectif de la DCE est de permettre d'atteindre un « bon état » systématique pour toutes les masses d'eau. Pour cela, des efforts doivent être faits par rapport aux intrants et par rapport à l'hydrochimie pour dire si des améliorations sont possibles par rapport à telles substances ou tels éléments. Ainsi, la présence en excès du sélénium à La Roche-Posay est un critère dégradant, mais c'est un élément géogénique qui fait partie du fond géochimique naturel – qui n'est pas introduit par l'homme et pour lequel on ne peut rien faire préventivement. Par contre, pour une substance qualitativement dégradante, comme la présence de nitrates, qui est plutôt d'origine anthropique, on a l'obligation d'engager des actions. Ces problèmes sont gérés par les Agences de l'eau. Des actions peuvent ainsi être

=> Etat chimique d'une masse d'eau de surface : respect des normes de qualité environnementales (NQE) via des valeurs seuils.

Deux classes sont définies : bon (respect) et pas bon (non-respect).

41 substances sont contrôlées : 8 substances dites dangereuses (annexe IX de la DCE) et 33 substances prioritaires (annexe X de la DCE).

=> Etat chimique d'une masse d'eau souterraine : substances surveillées pour évaluer la qualité chimique sont, en particulier, les pesticides, les métaux lourds, les hydrocarbures, les polychlorobiphényles (PCB), etc.

=> les contaminants microbiologiques (par exemple, les bactéries pathogènes) sont également considérés.

En 2019, en France, parmi les 689 masses d'eau souterraine, 70,7 % sont en bon état chimique

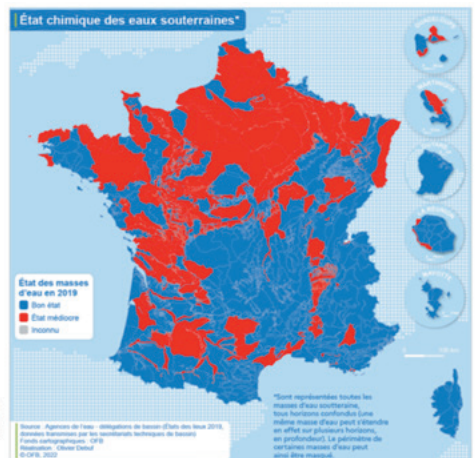


Figure 10

Qualité des eaux souterraines en France.

engagées pour limiter et pour abaisser les concentrations de ces éléments polluants, ou perturbants, qui dégradent la qualité des ressources en eau. En 2019, sur les 689 masses d'eaux souterraines, 70 % étaient en bon état (**Figure 10**). Il y a donc encore quelques efforts à faire.

Toutes ces données sont ouvertes au public et rassemblées dans des bases de données, telles que le Sandre⁵ ou ADES⁶, mais elles ne sont pas si facilement accessibles en termes de compréhension des données.

2 Hydrologie isotopique

La chimie a également beaucoup aidé dans un autre domaine : l'**hydrologie isotopique**. Les eaux de différents

endroits ont une signature isotopique différente. Cette empreinte est utilisée pour retracer le parcours de l'eau tout au long de son cycle hydrologique, de l'évaporation au retour dans les océans ou dans l'atmosphère en passant par les différentes étapes de précipitation, d'infiltration, de ruissellement, etc. (**Figure 11**). Pour ce faire, on se réfère à un référentiel fixé dans le cycle : il s'agit de l'océan qui sert de source par évaporation en termes d'isotopes naturels⁷. Des appauvrissements ont lieu en fonction de la distance par rapport à la source, par rapport à l'altitude, mais, surtout, également par rapport à la température. Par exemple, lors d'une évaporation, la vapeur d'eau est moins concentrée en $H_2^{18}O$ que le liquide dont elle est issue, et inversement lors d'une précipitation.

5. Sandre : référentiel des stations de mesure du niveau et de la qualité des eaux souterraines.

6. ADES : base de données relative aux eaux souterraines (> 4 000 points de mesure).

7. Les isotopes sont des atomes qui possèdent le même nombre d'électrons – et donc de protons, pour rester neutre –, mais un nombre différent de neutrons.

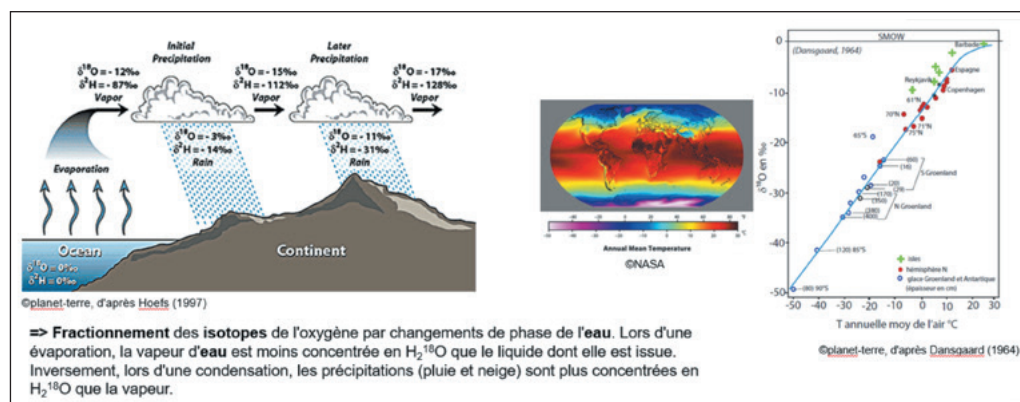


Figure 11

L'hydrologie isotopique pour retracer le parcours de l'eau tout au long du cycle hydrologique.

La référence eau standard de l'océan est le SMOW⁸. Plus les mesures s'éloignent de cette référence, plus on va vers une droite mondiale météoritique qui permet de caractériser et de positionner le type de précipitation que l'on a. Dans le cycle de l'eau, les précipitations sont la fonction d'entrée. Puis il se passe quelques jours, quelques semaines, jusqu'à l'infiltration qui va sceller l'empreinte, et l'empreinte va se conserver dans le domaine souterrain. Donc, si l'on arrive à connaître cette isotopie dans l'analyse d'une eau que l'on peut faire en profondeur, on saura dire depuis combien de temps elle circule, où elle s'est infiltrée et quelles évolutions elle a suivies. C'est tout l'enjeu d'une gestion quantitative de nos ressources.

8. SMOW (Standard Mean Ocean Water : «eau standard de l'océan moyen») : référence pour l'oxygène et l'hydrogène dans l'étude du cycle de l'eau.

Les isotopes radioactifs naturellement présents dans l'eau sont utilisés pour estimer l'âge des eaux souterraines (Figure 12). Cela a été fait, entre autres, sur des aquifères profonds dans le sud-ouest de la France, dans le Bassin parisien etc. Grâce aux analyses isotopiques, on arrive à reconstituer l'historique des précipitations et de leurs températures originelles que l'on cale avec la courbe de référence issue d'une carotte glaciaire⁹ (courbe en bleu ciel dans la figure 12). Grâce à la reconstitution des températures paléoclimatiques, on arrive ainsi à situer l'origine des eaux par rapport à la fonction d'entrée de notre

9. Carotte glaciaire : échantillon, retiré de calottes glaciaires, formé par compression de couches de neige successives, année après année. Une découpe verticale de glace contient donc des couches de plus en plus anciennes à mesure qu'on s'enfonce vers le centre de la Terre.

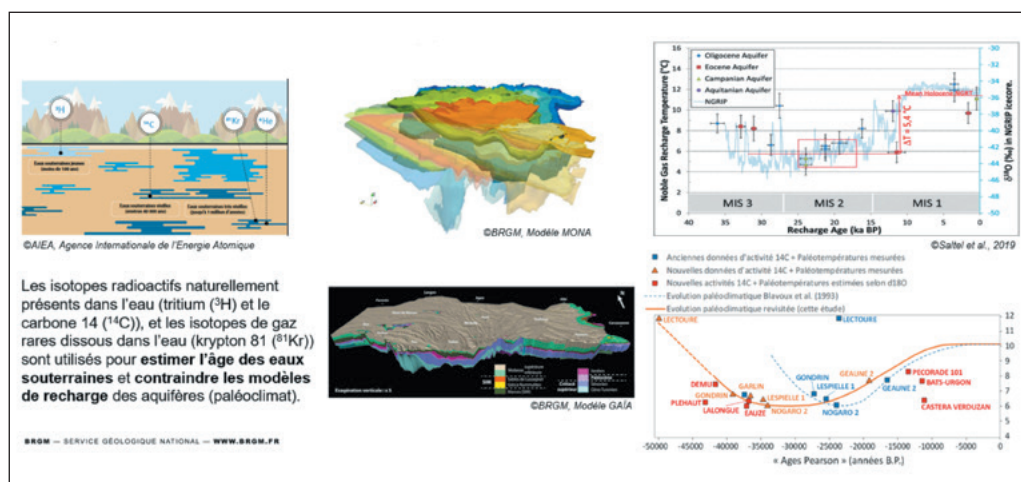


Figure 12

L'hydrologie isotopique pour estimer l'âge des eaux souterraines.

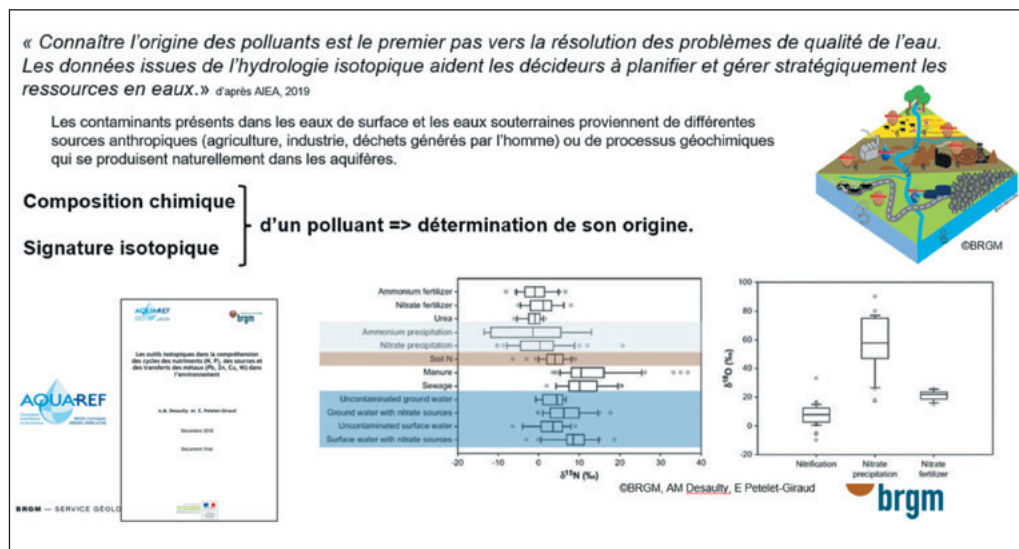


Figure 13

L'hydrologie isotopique pour connaître l'origine des polluants.

système que sont les précipitations. Ici, grâce aux techniques analytiques et aux progrès de l'analyse, on a pu se rendre compte que, dans ce bassin, circulent des eaux qui avoisinent 50 000 ans d'âge.

Connaître l'origine des polluants est le premier pas vers la résolution des problèmes de qualité de l'eau. Cette fois-ci, l'isotopie ne va pas porter sur la molécule d'eau en elle-même, mais sur le polluant (Figure 13). On va regarder les isotopes naturels qui participent à la composition du polluant et on va le traiter de la même manière, pour essayer de voir, par exemple sur l'azote, la différence de contenu de ^{15}N , par rapport à son origine potentielle. Cela permettra d'être beaucoup plus précis par rapport à sa source d'origine, et donc d'identifier la cause sur laquelle il faut jouer.

3 Biogéochimie environnementale

Jusqu'à il y a une dizaine d'années, on pensait qu'il y avait peu ou pas de formes de vie dans les eaux souterraines. On se trompait, et beaucoup de travaux sont maintenant réalisés pour identifier les phyla¹⁰ et la stygofaune¹¹ qui s'y trouvent (Figure 14).

Ces communautés bactériennes peuvent être perturbées par nos activités, et la recharge artificielle des aquifères, surtout avec des eaux usées traitées, peut être un élément de solution pour augmenter le stock et résoudre une partie des problèmes de disponibilité, mais avec le risque potentiel de perturber

10. Phyla : micro-organismes, division spécifique des bactéries.

11. Stygofaune : ensemble des espèces qui vivent dans les milieux aquatiques souterrains.

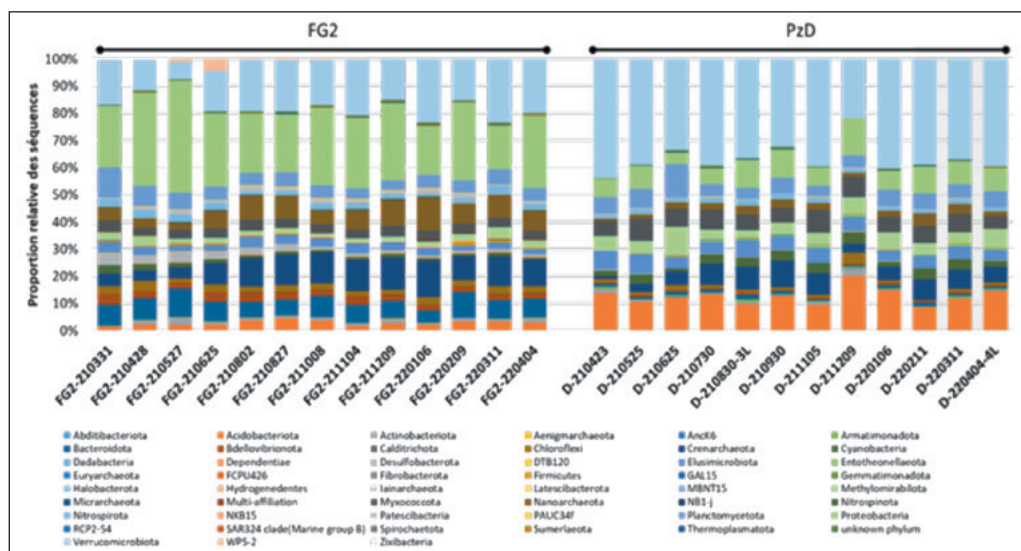


Figure 14

Évolution temporelle de la diversité des phyla dans les eaux souterraines.

le biotope¹² souterrain peu ou pas connu. Il faut donc prévoir ce que l'on fait à l'avance et non *a posteriori*.

12. Biotope : milieu biologique présentant des conditions de vie homogènes.

Des outils sont actuellement développés, et résumés sur le schéma de la [figure 15](#), pour étudier l'évolution temporelle de ces phyla. D'autre part, dans le cadre du programme de recherche One Water¹³, exposé dans un autre chapitre de cet ouvrage (voir l'article de Mme Agathe Euzen), un projet s'intéresse à l'inventaire, l'identification, la classification des ARN environnementaux et des ADN environnementaux¹⁴ comme sentinelles de la qualité des milieux.

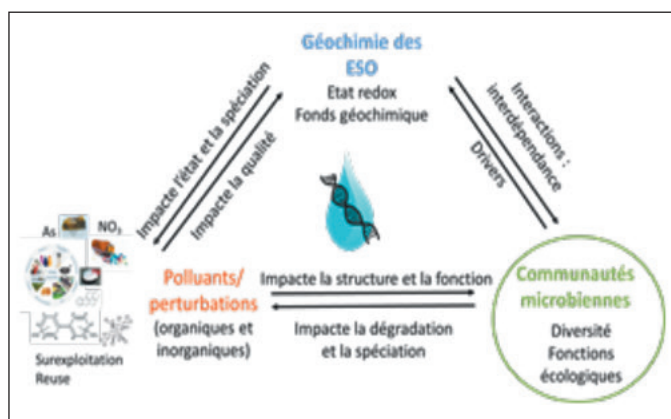


Figure 15

Interactions entre communautés bactériennes, polluants et fonds géochimiques.

13. One Water : « une seule eau ».
14. La détection d'ADN et d'ARN dans l'environnement permet, théoriquement, de définir l'activité d'un organisme dans une condition donnée.

Conclusion

En conclusion, nous disposons d'une bonne connaissance relative des systèmes aquifères en France, comme illustré par la carte actualisée des aquifères en France (**Figure 16**). Mais la **figure 17** nous rappelle les très nombreuses sources de pollution existantes, malheureusement souvent anthropiques, qui sont présentes au droit des ressources en eau. Il ne faut pas non plus oublier l'historique de nos activités

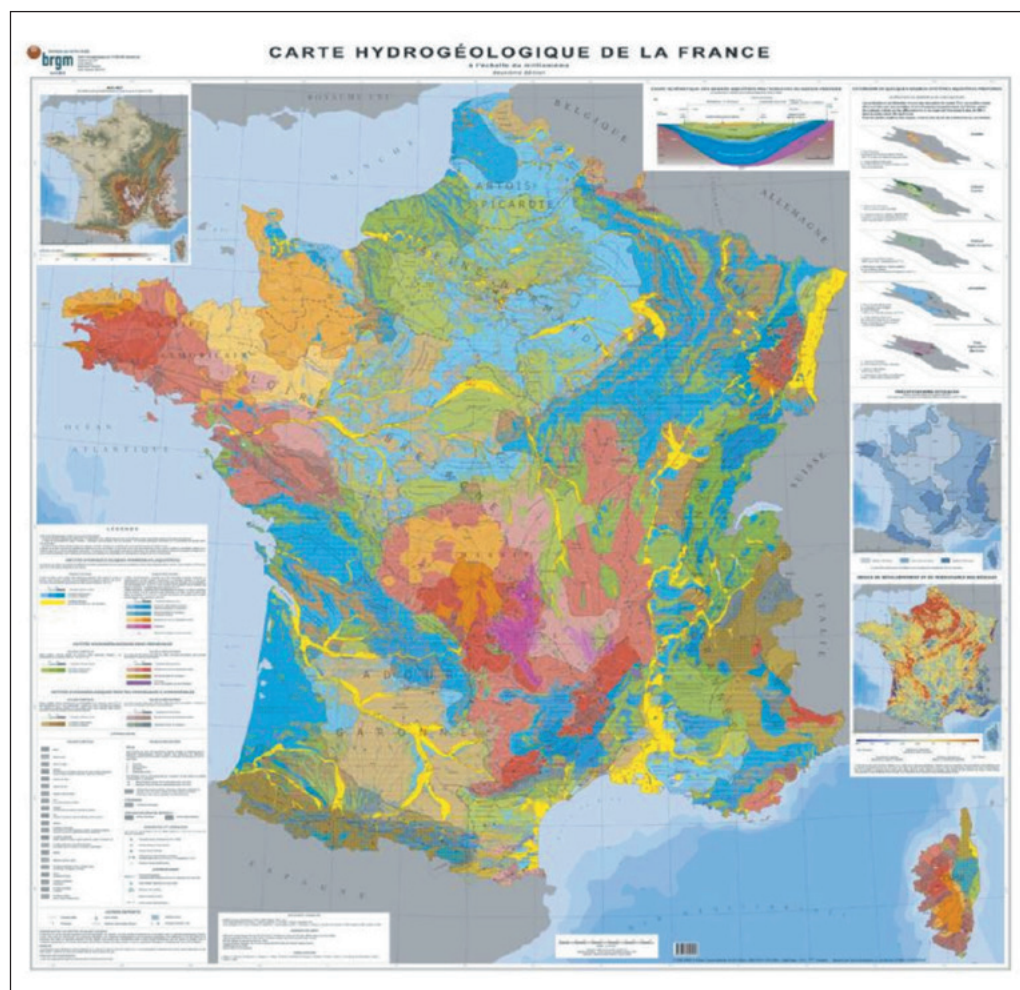


Figure 16

Carte des aquifères en France.

passées qui étaient moins vertueuses en termes de protection de la qualité de nos ressources en eau. Et, pour finir, ne pas oublier non plus que tout ce que l'homme a épandu ou déversé à la surface du sol, y compris ce qui y est venu *via* l'atmosphère, peut se retrouver au bout d'un laps de temps plus ou moins important dans les eaux souterraines...



Figure 17

Sources de pollution des eaux souterraines.

L'ensemencement des nuages : progrès et limites

Professeure émérite à l'Université Clermont-Auvergne à Clermont-Ferrand, Andrea Flossmann est associée au laboratoire de météorologie physique, une unité de recherche mixte (URM¹), avec le CNRS². Elle est aussi, parmi ses autres charges, coprésidente d'une équipe d'experts internationaux qui travaille sur la modification du temps.

1 Modification de la météo et formation de nuages

1.1. Pourquoi modifier le temps ?

Dans ce chapitre, on va regarder l'eau dans l'atmosphère, pas seulement sous forme de nuages, mais aussi en présence des produits chimiques ajoutés qui peuvent les modifier. La première question à se poser est : pourquoi veut-on modifier les nuages ?

D'un point de vue général, on peut dire que vouloir modifier le temps est bien dans nos gènes, que l'on pense aux danses de la pluie ou aux dieux comme Zeus inventés pour tenter de faire venir une meilleure météo ! On dira que l'on a bien évolué depuis, mais le besoin est tout de même toujours là : disposons-nous de sources d'eau fiables ? Pouvons-nous satisfaire les demandes sociétales associées ?

Il existe un groupement d'experts de l'Organisation mondiale de la météorologie³ qui se propose de répondre à ces

1. Structure regroupant chercheurs d'universités et organismes publics (comme le CNRS) pour collaborer sur des projets scientifiques spécifiques.

2. Centre national de la recherche scientifique, principal organisme public français de recherche fondamentale.

3. Institution des Nations unies coordonnant l'étude mondiale des phénomènes météorologiques et climatiques.

questions. Mais que font-ils ? On a beaucoup parlé du changement climatique, et le nombre de pays qui ont prévu d'avoir recours à des techniques de modification du temps, ou qui le font déjà, a beaucoup augmenté ces derniers temps. Malheureusement, il y a aussi des organismes qui essaient d'en tirer avantage. Ce groupement d'experts, qui existe depuis 50 ans, est là pour prodiguer des conseils sur demande et orienter les actions.

Mais, revenons-y : pourquoi faudrait-il modifier le temps en modifiant les précipitations ? Cela peut concerner la pluie mais aussi la neige ; et on peut vouloir augmenter ou bien réduire, voire empêcher les précipitations. Cela est pratiqué d'une manière récurrente par des pays comme la Russie ou la Chine qui le font pour leurs parades, qui ne se font pas sous la pluie, ou pour les

JO de Beijing⁴ ou encore en France quand on cherche à prévenir la grêle. Cela étant, il y a aussi d'autres applications, telle la dissipation des brouillards.

1.2. Processus de formation des nuages

Il s'agit de modifier les processus dans les nuages. Pour saisir les défis techniques, partons du *background*⁵ et regardons ce qui se passe en temps normal. Comment les nuages se forment-ils ?

Il faut de la vapeur d'eau, de l'humidité qui vient du sol, de l'évaporation à la surface des océans, mais aussi des continents. L'humidité s'élève, elle monte, l'air se refroidit et la vapeur d'eau se condense (*Figure 1*).

Cette condensation qui forme des gouttelettes, ou vient faire grossir celles qui existent, ne peut pas se faire dans le vide. Elle a besoin de supports matériels. On peut comparer le phénomène à la rosée qui se forme au sol où c'est le gazon qui joue ce rôle. Dans l'atmosphère, ce sont les particules d'aérosol⁶ qui sont présentes pour permettre une condensation, qui doit être en quantité suffisante. Une sous-population de ces particules d'aérosol peut servir de noyau

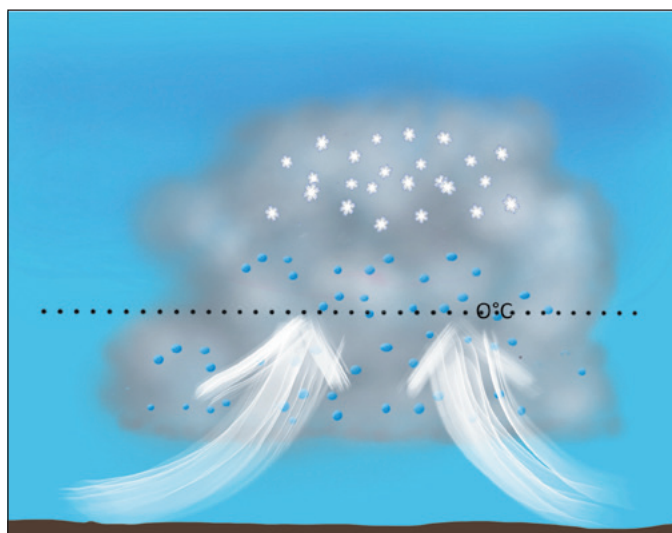


Figure 1

Processus de formation des nuages.

4. Jeux olympiques organisés à Pékin (Beijing) en 2008, où l'ensemencement de nuages a été utilisé pour éviter la pluie.

5. « Bagage scientifique ».

6. Minuscules particules solides ou liquides en suspension dans l'air, influençant la formation des nuages.

de condensation⁷ et former des gouttelettes. Des particules solubles, des sels, par exemple, jouent ce rôle encore plus efficacement.

Dans les nuages, à côté des gouttes liquides, on a une phase solide : la phase des cristaux. Ceux-ci s'étendent parfois très haut, verticalement. Des cristaux peuvent se former sur d'autres populations de particules d'aérosol, des particules insolubles ou même biogéniques⁸, qu'on appelle des « noyaux glaçogènes⁹ ». Un autre concept qu'il faut avoir en tête, c'est que dans les nuages, la phase liquide ne s'arrête pas à 0 °C du fait du phénomène de surfusion qui explique que les gouttes restent liquides, même à des températures très inférieures à 0 °C.

7. Particules autour desquelles la vapeur d'eau se condense pour former des gouttelettes de nuage.

8. Particules d'origine biologique, comme le pollen ou les spores, jouant un rôle dans la formation des nuages.

9. Particules favorisant la formation de cristaux de glace dans les nuages surfondus.

Les trois pictogrammes ci-dessous (**Figure 2**) résument ce que représente un nuage. Quand on les regarde dehors, les nuages ressemblent à du coton, à de la barbe à papa. Est-ce qu'on peut sauter dedans? Peut-être pas. Pour visualiser, considérons un nuage cubique de 1 km³, 1 km sur chaque côté. C'est, certes, un tout petit nuage, avec un contenu en eau liquide de 1 g par mètre cube. Il n'est pas énorme, mais si on l'intègre, cela nous donne une masse totale d'eau condensée de 1000 tonnes¹⁰ l'équivalent du poids de trois Boeing 747¹¹. Cette fois, c'est un poids énorme qui ne nous tombe pas sur la tête parce qu'il est réparti dans des microgouttelettes qui sont suspendues par le mouvement vertical ascendant.

Le processus de condensation¹² libère une chaleur

10. Un cumulonimbus pèse entre 50 000 et 300 000 tonnes.

11. Avion de ligne quadrimoteur connu pour son double-pont à l'avant, pesant environ 300 tonnes.

12. Il s'agit en réalité d'une liquéfaction (passage de l'état gazeux à l'état liquide).

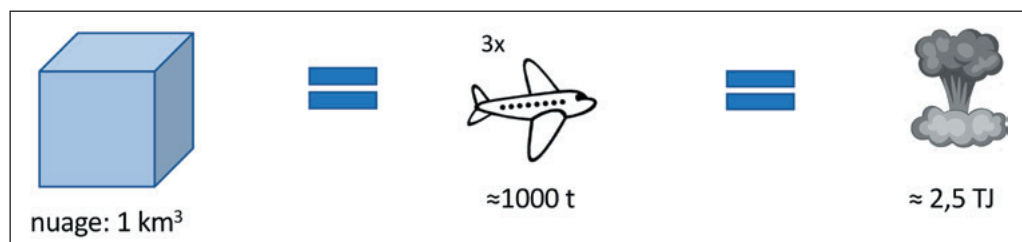


Figure 2

Poids et énergie d'un nuage de volume un kilomètre cube.

Flossmann, Andrea I., M. J. Manton, A. Abshaev, R. Brientjes, M. Murakami, Th. Prabhakaran, Z. Yao, 2019: Review of Advances in Precipitation Enhancement Research; Bull. Atm. Met. Soc., 1465-1480, DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0160.1.

latente¹³. Dans notre petit nuage témoin, cela correspond à une énergie de 2,5 téra-joules¹⁴. Cette quantité reste faible si on la compare, par exemple, avec les bombes de type Hiroshima qui ont une énergie de 55 térajoules. Mais notre nuage est quand même tout petit. Ces chiffres permettent de donner un ordre de grandeur.

13. Énergie nécessaire pour transformer de l'eau à l'état gazeux en liquide.

14. Unité d'énergie valant 10^{12} joules (1 000 000 000 000), utilisée pour quantifier de grandes quantités d'énergie.

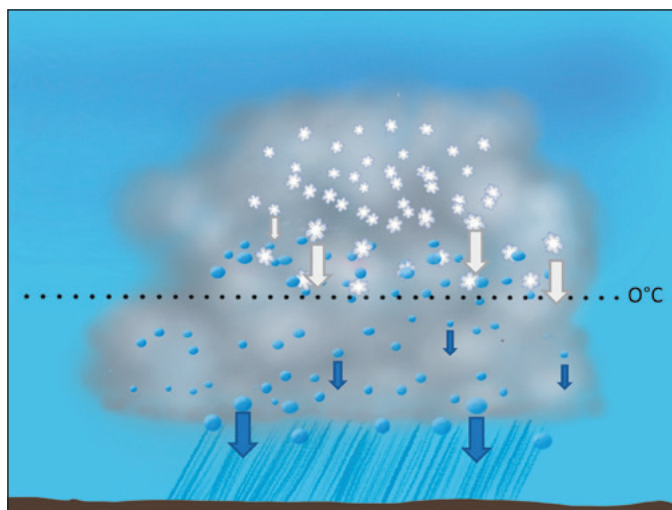


Figure 3

Processus de formation des précipitations.

Flossmann, Andrea I., M. J. Manton, A. Abshaev, R. Bruintjes, M. Murakami, Th. Prabhakaran, Z. Yao, 2019: Review of Advances in Precipitation Enhancement Research; Bull. Atm. Met. Soc., 1465-1480, DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0160.1.

2 Formation des précipitations et modifications par l'ensemencement

2.1. Processus de formation des précipitations

Après la formation des nuages intervient la précipitation des microgouttelettes. Il faut les transférer ou les transformer en gouttes ou en cristaux de taille millimétrique. Le seul processus de condensation prendrait un temps considérable. En pratique, il est court-circuité par un ou des processus de collision.

Goutte-goutte, ça fait pluie. Cristal-cristal, ça fait des flocons de neige. Et goutte-cristal, ça fait un «graupe¹⁵», couramment appelé «grêlon», «grêle» ou «particules de grêle». Qu'est-ce qui déclenche ce processus de précipitation?

En fait, il faut des hydrométéores¹⁶ qui chutent plus vite que les autres et, sur leur chemin de la chute, collectent les autres et deviennent de plus en plus grands. Pour donner un ordre de grandeur, il faut un million de petites gouttelettes pour former une goutte de pluie. Il faut donc beaucoup de collisions. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'avoir des hydrométéores de différentes tailles, des gros et des petits, pour qu'ils puissent s'attraper les uns les autres. C'est le mécanisme de base avec lequel il faut travailler (**Figure 3**).

15. Grésil.

16. Grosses gouttes d'eau suffisamment lourdes pour vaincre la gravité et tomber dans le nuage.

2.2.Principe de l'ensemencement des nuages : deux méthodes

À partir de ce mécanisme, on cherche à définir un ou plusieurs moyens d'accélérer ce processus, puisque notre but est d'accroître les précipitations. La méthode consiste à élargir le spectre des tailles des hydrométéores pour qu'on en ait un nombre suffisant capable de provoquer des collisions lors de leur chute. L'idée adoptée est de rajouter (ensemencement) des particules d'aérosols dans les nuages pour remplir ce rôle.

On distingue deux types d'ensemencements : l'un est dit « de type froid », et agit sur les cristaux ; l'autre est dit « de type chaud », et agit sur les gouttes.

Sur la **figure 4**, on voit une petite image datant de 1946 de Langmuir¹⁷, Vonnegut¹⁸ et Schaefer¹⁹, les trois scientifiques qui viennent de découvrir que l'iodure d'argent²⁰ en particules est très efficace pour faire congeler le liquide

surfondu²¹. C'est l'une des particules très utilisées pour l'ensemencement froid. Une alternative consiste à utiliser de la neige carbonique²² ou du CO₂ liquide²³ qui refroidissent l'air soudainement et cassent la surfusion ; d'autres solutions sont aussi à l'étude.

Pour l'ensemencement chaud, on complète les particules d'aérosol naturel²⁴, représentées par la courbe en bleu (**Figure 5**). On ajoute de gros cristaux de sel qui vont former des gouttes qui seront plus grandes, et le processus de collision est déclenché.



Figure 4

Photo de Langmuir, Vonnegut et Schaefer prise en 1946.

21. Liquide restant à l'état liquide bien qu'il soit refroidi en dessous de son point de congélation.

22. Dioxyde de carbone solide (CO₂ à -78,5 °C), utilisé pour refroidir ou modifier les nuages.

23. Dioxyde de carbone sous forme liquide à haute pression, utilisé pour certaines expériences atmosphériques.

24. Particules naturelles comme le sel marin ou les cendres volcaniques jouant un rôle dans la formation des nuages.

17. Irving Langmuir, physicien ayant étudié l'ensemencement des nuages et le comportement des particules dans l'atmosphère.

18. Bernard Vonnegut, chimiste ayant découvert l'effet glaçogène de l'iodure d'argent sur les nuages.

19. Vincent Schaefer, pionnier des techniques d'ensemencement, notamment avec l'utilisation de neige carbonique.

20. Composé chimique, solide ionique composé d'iode et d'argent utilisé pour stimuler la formation de cristaux de glace dans les nuages.

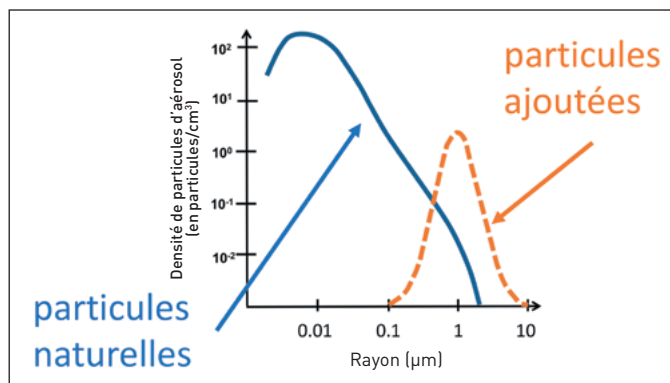


Figure 5

Graphique représentant le nombre de particules ajoutées de chaque type en fonction de leur rayon.



Figure 6

Couverture du magazine Collier's de mai 1954.

3 Efficacité de l'ensemencement

3.1. Approche expérimentale

Une augmentation des pluies par cette méthode avait été observée dans les panaches des moulins à papier²⁵ en Afrique du Sud. Quand on a découvert la possibilité d'influencer la formation de la pluie, dans les années 1940 et au début des années 1950, cela a suscité un grand engouement. On pensait pouvoir faire pleuvoir quand on le voulait, comme le titre sur la couverture de ce magazine de 1954, «Weather Made to Order?»²⁶, le fait miroiter (Figure 6). Malheureusement, ça n'a pas tenu ses promesses du fait du grand problème que constitue la grande variabilité des nuages naturels : parmi deux nuages qui coexistent dans le même ciel la même journée, l'un va pleuvoir naturellement, et l'autre non.

Autre situation fréquente : le signal créé par l'ensemencement est trop faible par rapport aux bruits naturels existants. Pour le moment, on a du mal à démontrer statistiquement que ce petit signal d'ensemencement existe. Ces difficultés ont diminué la mise en œuvre des techniques d'ensemencement, et ce n'est que récemment que la recherche a repris. Elles ont mis l'accent sur deux approches qui permettent finalement de définir les bonnes conditions pour que les

techniques d'ensemencement fonctionnent.

Pour la première approche, il faut réaliser beaucoup d'essais, à l'instar de ce que l'on fait en expérimentation médicale. On fait des doubles blancs²⁷, des blancs aveugles²⁸ et des doubles blancs aveugles. Il faut un grand nombre d'échantillons pour obtenir des informations statistiquement significatives, cela veut dire qu'il faut des milliers d'expériences. Pour le moment, cette approche n'est pas mûre ; on n'a pas encore à disposition des milliers d'expériences, en particulier en raison de leur coût.

Dans l'autre approche envisagée, et là, on a finalement des preuves que ça peut marcher, on se focalise sur les nuages qui ont une variabilité naturelle réduite, à l'exemple des nuages qui se forment sur un relief. Dans ce cas, quand l'air arrive, il est forcé de monter et de se refroidir : un nuage se forme.

3.2. Succès de l'ensemencement à l'iodure d'argent

Les premières preuves expérimentales du succès de ces processus viennent de deux études : d'abord, l'expérience qui a été faite dans les montagnes Rocheuses aux États-Unis ; ensuite, celle qui a été conduite en Australie, l'air

25. L'industrie papetière d'Afrique du Sud est très productrice d'aérosols, notamment de sulfates.

26. «Contrôler le temps?»

27. Étude comparative composée de deux séries d'expériences identiques ou analogues.

28. Étude où les participants ne savent pas s'ils reçoivent le traitement ou un placebo.

arrive du Pacifique et monte sur le relief.

Dans ces deux études, on observe d'abord la formation de gouttes puis, plus haut, de quelques cristaux, mais il y a une grosse zone d'eau surfondue qui demeure et les nuages ne précipitent pas. On rajoute alors des produits chimiques, de l'iodure d'argent dans ce cas-là. Pour réussir cette opération, qu'on appelle l'ensemencement, on a le choix entre plusieurs techniques.

Sur le schéma ci-dessus (**Figure 7**) est représenté l'idéal : on utilise des torches sous les ailes d'avion pour cibler la zone d'eau surfondue. On peut aussi éjecter des torches en altitude. Une technique un peu meilleur marché utilise des fusils qui sont lancés au niveau de la base du nuage (en rose sur l'image de gauche). Cette technique est plutôt utilisée par les militaires en Russie et en Chine. En France, dans la plus grande partie des opérations, on utilise des brûleurs :

un mélange d'acétone²⁹ et d'iodure d'argent est brûlé et, avec les courants ascendants, arrive dans cette région critique (même région en rose), transforme les gouttes en cristaux de glace qui entrent ensuite en collision avec les autres cristaux et produisent de la neige.

La technique des brûleurs a été mise en œuvre par les scientifiques en partenariat avec les agences de l'eau dans l'Idaho et le Wyoming³⁰ pour augmenter la couverture neigeuse dans les bassins versants qui alimentent l'eau potable. Cela a vraiment constitué la première preuve publiée, documentée, de l'efficacité de l'ensemencement.

29. Solvant organique inflammable utilisé dans diverses expériences chimiques et techniques industrielles.

30. États du nord-ouest des États-Unis connus pour leurs expériences sur l'ensemencement des nuages pour accroître les précipitations.

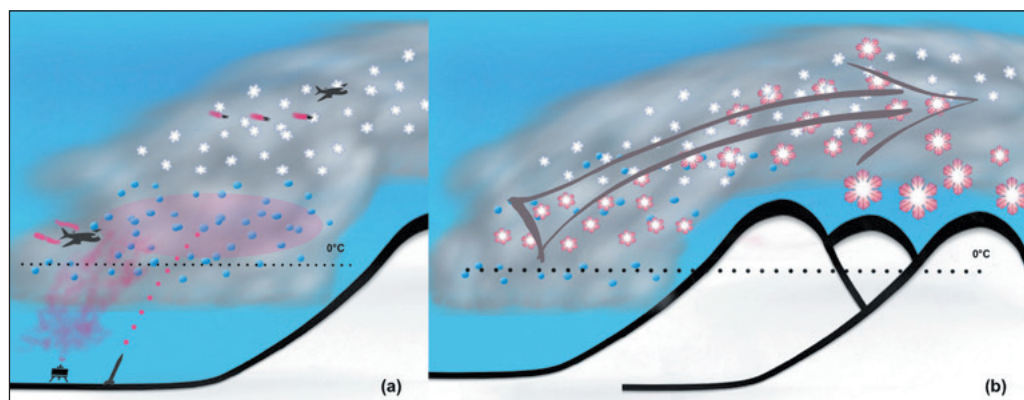


Figure 7

Ensemencement de nuages froids par utilisation d'iodure d'argent près de reliefs.

3.3. Ensemencement de nuages convectifs aux sels

L'autre approche évoquée consistait à ensemercer avec des sels qui créent de grosses gouttes dans la phase liquide ; celles-ci vont former des agrégats qui vont déclencher la précipitation du nuage (**Figure 8**). Une grosse campagne est en cours en Inde : l'expérience Caipex³¹, qui en est aujourd'hui à 300 ensemcements. Il manque donc encore un peu de travail pour arriver à un ensemble de cas statistiquement significatifs.

4 Développements futurs

4.1. Recommandations méthodologiques

Quelles consignes donner aux opérateurs en tant que groupement de conseil ?

31. Projet d'étude visant à améliorer les précipitations dans les régions arides en Inde.

Premièrement, il faut une phase d'études climatiques pour connaître le type de nuages que l'on va traiter et les particules qui sont normalement là en arrière-plan. Est-ce que ce sont des particules que l'on va traiter ou remplacer ? Il faut aussi un programme soigné de simulations numériques.

Deuxièmement, on devra travailler sur deux domaines (**Figure 9**) pour pointer les différences dues au traitement. Ces deux domaines devront être choisis côte à côte pour qu'ils soient autant que possible dans le même écoulement.

Un choix qui est souvent fait, mais qui est à éviter absolument, est de modifier les options de démarrage et les protocoles de campagne et de changer les indicateurs de contrôle. La cohérence entre les conditions appliquées aux deux sites à comparer est une condition essentielle.

Les meilleurs résultats qu'on a eus étaient dans les nuages

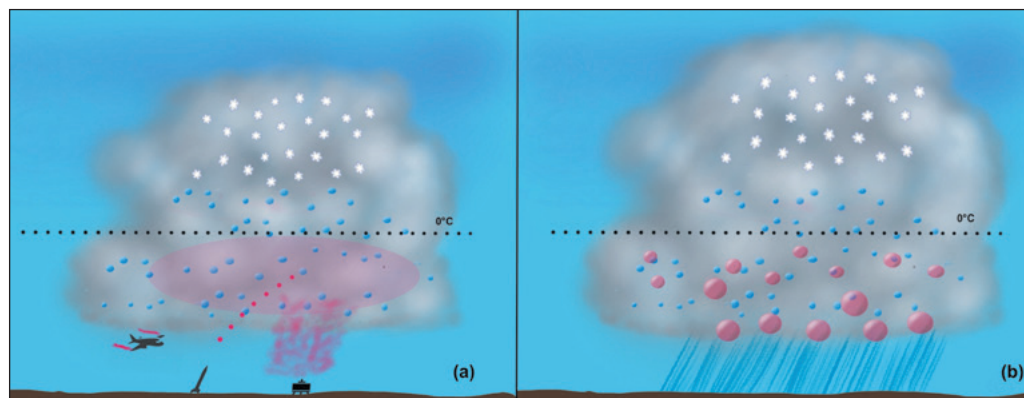


Figure 8

Ensemencement de nuages chauds par utilisation de cristaux de sel.



Figure 9

Détermination de zones d'ensemencement (en marron) et de zones témoin (en blanc) pour la réalisation d'essais.

orographiques hivernaux³² avec un ensemencement avec l'iodure d'argent par avion, en torche, parce que, là, on peut vraiment cibler la zone, et mieux encore si le nuage est proche d'une précipitation naturelle. Dans ces conditions, on a vraiment des résultats encourageants.

Dans tous les cas, il faut réaliser qu'il n'est pas utile de faire ce travail sur un seul nuage ou couple de nuages. Il faut le faire à plus grande échelle pour donner une viabilité convaincante sur un bassin versant, même si cette stratégie, bien sûr, réclame beaucoup d'ensemencements.

4.2. Ensemencement, géopolitique et environnement

Chaque fois qu'un État annonce qu'il fait de l'ensemencement, le voisin crie : « On nous vole de l'eau. » C'est potentiellement une source de conflit. Il y a une

dizaine d'années, l'Iran avait accusé Israël de lui voler de l'eau³³; mais l'inverse a aussi eu lieu.

Récemment, on a signalé l'intervention de complottistes autour des inondations en Espagne³⁴. Une théorie circulait selon laquelle les ensemencements au Maroc avaient créé les inondations en Espagne. En fait, s'il est vrai que le Maroc fait des expériences de modification des précipitations, celles-ci n'ont rien à voir avec ce qui s'est passé en Espagne. Mais le potentiel de conflit est tout de même là.

Par ailleurs, il reste indispensable de veiller à l'impact écologique de ces expériences parce que l'iodure d'argent est un produit potentiellement toxique en grande quantité pour les écosystèmes aquatiques.

32. Nuages formés par le soulèvement de l'air sur des montagnes, souvent ciblés pour l'ensemencement.

33. L'Iran a accusé Israël en 2018 de provoquer une sécheresse en « volant » les nuages grâce à l'ensemencement.

34. Inondations des 29-30 octobre 2024 dans la province de Valence ayant causé 240 morts.

Conclusion

On peut considérer qu'aujourd'hui, après des décennies d'essais infructueux et d'observations décevantes, les techniques d'ensemencement de l'atmosphère pour déclencher des précipitations sont réellement disponibles.

Mais leur complexité apparaît aussi. La nature ne se laisse pas dominer si facilement. Son fonctionnement est en effet marqué par une grande diversité et variabilité de situations. Cette complexité se traduit, bien sûr, par le coût des expériences préparatoires dont on a cité l'importance.

Cela laisse une grande inconnue à ce programme qui n'est autre que la prévision du coût des opérations. Apparemment, il n'existe pas encore de visibilité conclusive sur la question. Là aussi doit régner une grande diversité de situations. Que sera l'extension à grande échelle de l'ensemencement ? Encore un peu de patience pour avoir la réponse.

Partie 3

Préserver la ressource :
eaux potables
et industrielles

Osmose inverse, de la fabrication des membranes à l'exploitation des méga-usines

D'après la conférence de Jean-Baptiste Thubert, directeur technique et innovation pour l'ensemble de Veolia Water Technologies¹, expert en osmose inverse² chez Veolia, notamment pour de grands projets sur le dessalement³, avec la conception et la fabrication de méga-usines, dites « usines XXL ».

Introduction

Veolia et la place de l'eau sur Terre

Veolia et l'eau, c'est une longue histoire. Actuellement, Veolia est le leader des services à l'environnement. Cela

représente environ 45 milliards d'euros de chiffre d'affaires et un peu plus de 200 000 employés dans le monde entier. Notre objectif est d'accompagner nos clients dans leur transition écologique, que ce soit au travers

1. Entreprise spécialisée dans les solutions de traitement d'eau, notamment le dessalement, pour des applications industrielles et municipales.

2. Technique de filtration utilisant une membrane semi-perméable pour extraire les solutés (comme le sel) de l'eau sous pression.

3. Processus d'élimination du sel et d'autres minéraux de l'eau de mer ou saumâtre pour produire de l'eau potable.

des métiers de l'eau, de l'énergie ou des déchets.

La **figure 1** représente l'eau disponible. Si on regarde la Terre, la grosse goutte d'eau, c'est l'eau salée ; la toute petite est l'eau douce dont on pourrait disposer. Cette eau douce est vraiment quelque chose de très réduit, et donc

à préserver et à chérir autant qu'on peut.

Dans le monde, on est globalement au-delà de 11 000 millions de mètres cubes consommés par jour (**Figure 2**), et seule une toute petite fraction de cette eau provient du dessalement, même si cela concerne plusieurs milliers de stations à travers le monde.

La tension sur l'eau est énorme, pour la France et pour le monde. Cela va conduire au décuplement de cette solution du dessalement dans les années à venir. On attend une croissance probablement supérieure à 10 % de la demande en eau dessalée par an. En France, on commence à en parler, car à certains endroits c'est une solution dont on pourrait bénéficier.

Dans le monde, plus de 300 millions de personnes vivent aujourd'hui grâce à cette eau dessalée. Sans cela, soit ces gens auraient dû émigrer vers d'autres régions, soit ils n'auraient tout simplement pas pu vivre dans ces régions.

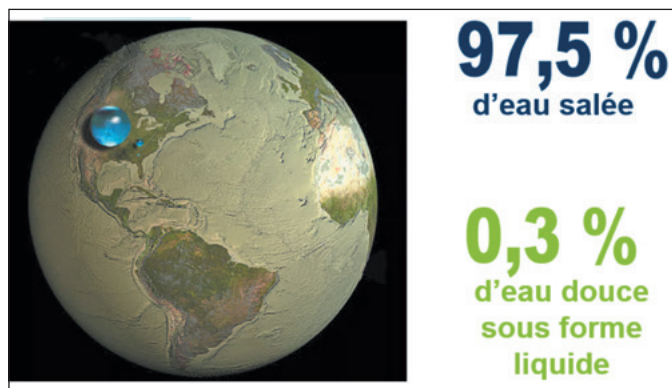


Figure 1

Quantité d'eau douce disponible sur Terre.

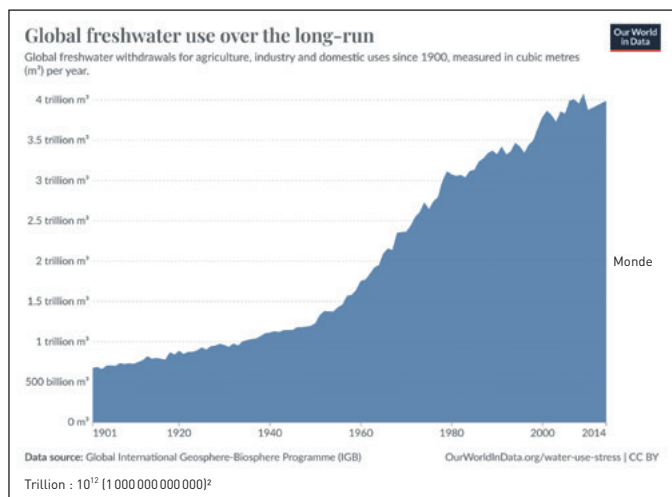


Figure 2

Évolution dans le temps de l'utilisation de l'eau douce dans le monde. Consommation d'eau douce dans le monde pour l'agriculture, l'industrie et l'usage domestique depuis 1900, mesurée en mètres cubes par an.

1 Le dessalement

Historiquement, le dessalement n'est pas nouveau. La Terre fait du dessalement depuis toujours. On parle du « cycle de l'eau », dont la base est le dessalement.

L'évaporation de l'eau est le processus par lequel on sépare l'eau douce d'une eau salée qui se condense ensuite au travers de la pluie. Ce phénomène naturel de dessalement a été reproduit depuis l'Antiquité, d'abord sur les bateaux avec du dessalement thermique

rudimentaire. Puis, progressivement, les méthodes se sont industrialisées, sont montées en capacité, essentiellement avec du dessalement thermique au début : on faisait bouillir de l'eau sous vide, puis on la condensait pour avoir de l'eau potable.

Mais, progressivement, d'autres technologies ont émergé, en particulier les technologies membranaires. La **figure 3** montre cette évolution. Les premières membranes ont été créées dès les années 1950, pourtant elles ont mis des années à être industrialisées. Il y a des sujets sociétaux d'acceptation de ces technologies, et des sujets de maturité technologique qui font que ce n'est pas simple de réussir à produire ce genre de solutions à l'échelle industrielle.

Les membranes industrielles sont arrivées dans les années 1980-1990. Aujourd'hui, le dessalement thermique existe encore, mais on en voit de moins en moins. Il persiste

pour des usages industriels, sur les bateaux, ou dans des raffineries. La technique qui domine actuellement pour les grosses stations de dessalement est le traitement membranaire.

La **figure 4** montre un panorama des technologies de dessalement. Nous avons évoqué le thermique et le membranaire. En réalité, ce ne sont que quelques solutions technologiques parmi toutes celles qui existent et qui vont être choisies par l'industriel en fonction de différentes contraintes : type d'eau à atteindre, type d'eau entrante, type de source d'énergie que l'on a à disposition. De nombreuses raisons peuvent pousser à parcourir l'arbre dans un sens ou dans l'autre.

Maintenant, dès qu'on parle de dessalement de grande taille, on parle en général de l'osmose inverse, qui est la solution la plus mature aujourd'hui et qui est vraiment le courant dominant.

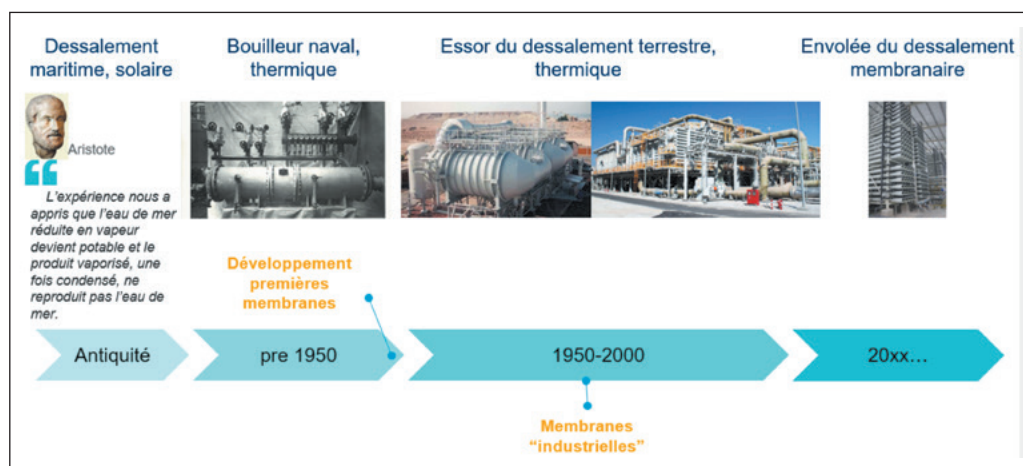


Figure 3

Évolution des techniques de dessalement depuis l'Antiquité.

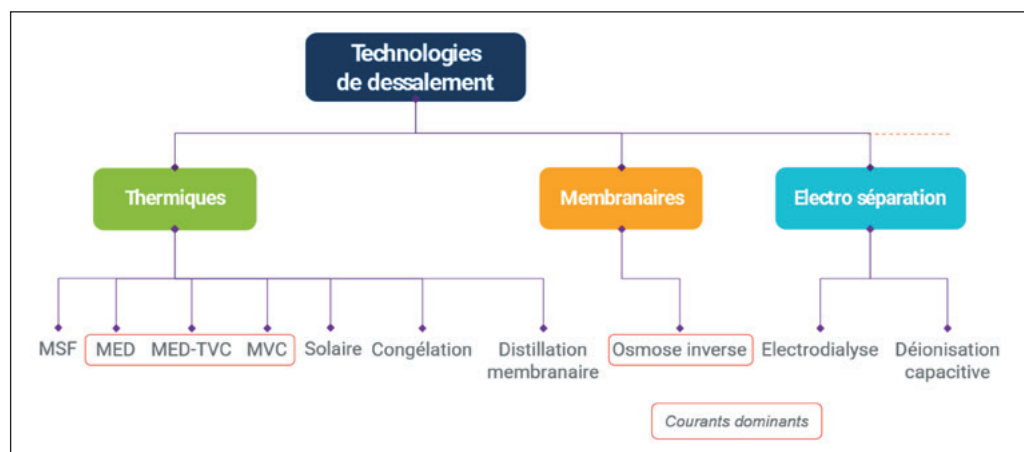


Figure 4

Les technologies de dessalement actuelles^{4, 5, 6}.

2 La membrane

Tout d'abord, il faut voir la membrane comme un filtre extrêmement efficace. C'est un matériau poreux. On peut

4. MSF, MED, MED-TVC, MVC : Multi-Stage Flash (technique de dessalement par évaporation et condensation rapides, en plusieurs étapes, sous vide partiel), Multi-Effect Distillation (dessalement utilisant plusieurs étapes d'évaporation à basse température pour économiser de l'énergie), MED-Thermal Vapor Compression (variante de MED intégrant un compresseur pour recycler la vapeur et réduire les besoins énergétiques), Mechanical Vapor Compression (dessalement où la vapeur est comprimée mécaniquement pour être réutilisée comme source de chaleur).

5. Électrodialyse : technique utilisant un champ électrique pour déplacer des ions à travers des membranes, séparant les sels de l'eau.

6. Déionisation capacitive : méthode de purification où des électrodes chargées électrostatiquement retiennent les ions dissous dans l'eau.

imaginer une feuille de plastique dans laquelle il y a plein de petits trous, qu'on appelle des « pores ». En fonction de la taille des pores, et de leur nombre, on va réussir à filtrer différents éléments. Les ordres de grandeur sont indiqués sur la **figure 5**.

La dimension des particules à éliminer sur une échelle en nanomètres⁷, en haut de la **figure 5**, montre à l'échelle moléculaire la typologie des particules que l'on peut éliminer. Cela va des macropollutions (telles que des particules, du sable, des choses en suspension) jusqu'à des particules biologiques (comme les virus, les microbes), pour lesquelles il faudra des pores beaucoup plus petits, et enfin des ions métalliques et des molécules chimiques.

7. Unité de longueur (1 nm = 10⁻⁹ m), utilisée pour décrire l'épaisseur des membranes ou la taille des particules.

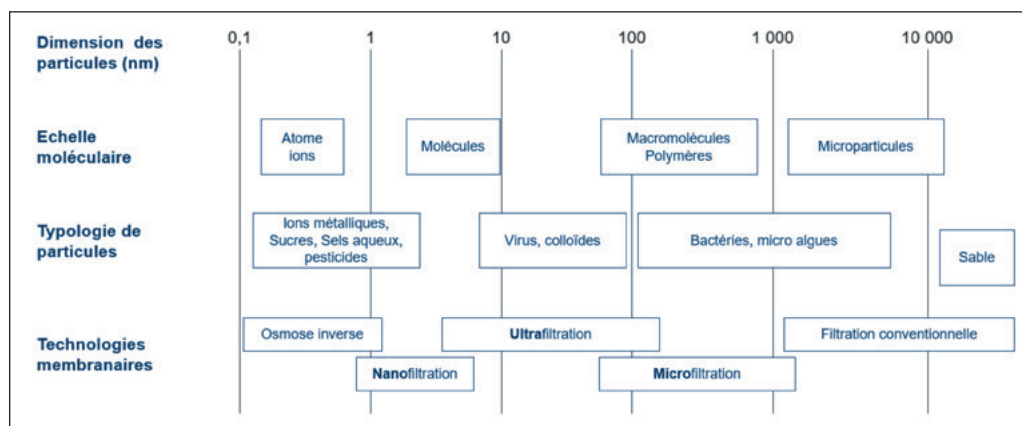


Figure 5

La membrane : un filtre très efficace pour de nombreuses applications.

On voit apparaître les premières membranes, avec des membranes de microfiltration⁸, puis viennent celles d'ultrafiltration⁹, puis celles encore plus fines, les membranes de nanofiltration¹⁰, quand on commence à vouloir éliminer des choses qui sont dissoutes comme des sels dissous, souvent polyvalents¹¹. Pour éliminer des polluants à l'échelle du nanomètre et en dessous, on va utiliser des membranes d'osmose inverse. Celles-ci éliminent quasiment tout, jusqu'à la plupart des micropolluants, qui ne sont

évidemment pas visibles à l'œil nu, et les ions dissous¹², qui font souvent la salinité de l'eau.

2.1. Les différentes technologies : les membranes sont efficaces et très compactes

On a deux courants technologiques avec différents arrangements en fibres creuses pour l'ultrafiltration, essentiellement. On peut imaginer cela comme des pailles dont la paroi est poreuse et dans lesquelles on injecte de l'eau, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur ; puis l'eau percole¹³ au travers de la membrane, et les déchets restent de l'autre côté. Les membranes spiralées utilisées pour l'osmose inverse et la nanofiltration permettent

8. Filtration pour éliminer les particules solides de taille supérieure à 0,1 micromètre, utilisée pour clarifier les liquides.

9. Procédé de filtration qui retient les macromolécules et les particules de taille supérieure à 0,01 micromètre.

10. Filtration retenant des particules ou ions spécifiques, comme les sels polyvalents, mais laissant passer l'eau et les petits ions.

11. Ions portant plusieurs charges électriques, comme Ca^{2+} ou Mg^{2+} , souvent retirés pour adoucir l'eau.

12. Particules ioniques en solution, comme les sels (Na^+ , Cl^-), qui influencent la conductivité et la qualité de l'eau.

13. Mouvement d'un liquide ou de solutés à travers une membrane sous l'effet d'une différence de pression.

de faire des choses beaucoup plus fines. Ce sont des membranes qu'on vient enrouler, comme on peut le voir sur la **figure 6** : on fait un sandwich entre des membranes qui filtrent et des membranes qui canalisent l'eau. On pousse l'eau d'un côté et elle est filtrée tangentielle-ment. Cette membrane peut retenir un sel dissous au travers de sa paroi. Ces systèmes spirales, on peut les imaginer comme un gros rouleau de sopalin avec des feuilles qui sont enroulées

autour des autres, ce qui permet de densifier énormément les systèmes. Sur la **figure 6**, le système présenté mesure à peu près 1 m de long et 20 cm de diamètre, ce qui n'est pas très gros ; pourtant, il permet de compacter un peu plus de 40 m² de membrane.

Ce sont des systèmes utilisés en osmose traditionnelle qui peuvent produire à peu près 500 litres d'eau dessalée par heure, ce qui est plutôt important.

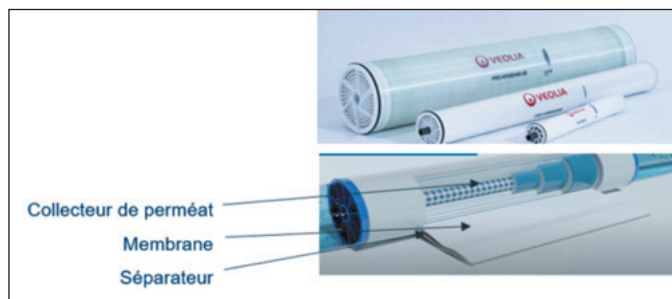


Figure 6

Membranes spirales utilisées par Veolia.

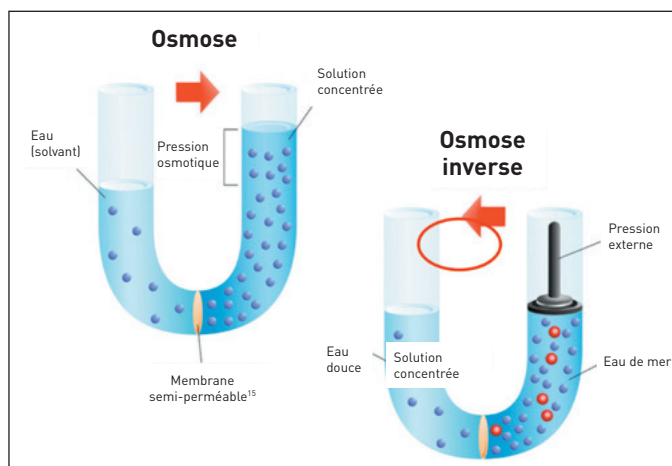


Figure 7

Principe de fonctionnement de l'osmose inverse.

2.2. Mécanisme de fonctionnement des membranes d'osmose inverse

Dans le cas du dessalement, la séparation membranaire va un peu contre les lois de la nature : selon le principe physique de pression osmotique¹⁴, si je mets une solution salée et une solution non salée de part et d'autre d'une membrane semi-perméable, je vais avoir une migration de l'eau douce vers l'eau salée, alors que, quand on veut dessaler, ce qu'on cherche à obtenir, c'est plus d'eau douce, donc l'inverse.

On utilise l'énergie électrique pour inverser le phénomène physique naturel d'osmose. C'est le phénomène qu'on voit sur la **figure 7**. La nature aurait tendance à venir diluer la partie salée (à gauche) mais, avec des pompes, on exerce une forte pression sur la partie

14. Pression nécessaire pour arrêter l'osmose, proportionnelle à la concentration des solutés d'une solution.

15. Membrane perméable à l'eau et imperméable aux ions.

salée, ce qui va permettre de produire plus d'eau douce : **c'est le principe de l'osmose inverse.**

3 Mise en œuvre des membranes d'osmose inverse et applications

La membrane est le cœur du système, mais la membrane toute seule ne va pas faire grand-chose, pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, les trous sont extrêmement fins. Pour ne pas boucher la membrane en quelques minutes, il faut préalablement traiter l'eau, au besoin faire des filtrations pour éliminer le sable, les turbidités¹⁶, toutes les matières en suspension.

Ensuite, parce que cette membrane est très fine et donc

extrêmement efficace : elle élimine presque tout, ce qui veut dire que, du point de vue de la consommation humaine, et même des besoins industriels, on élimine un peu trop.

Souvent, on a besoin d'un post-traitement dans lequel on va venir reminéraliser¹⁷ selon les besoins de l'industriel ou de la municipalité. Cette eau est trop pure pour être propre à la consommation et au transport sur les réseaux.

La **figure 8** est un schéma d'une usine typique du Moyen-Orient, où vous voyez l'emplacement de l'osmose inverse (OI). Il y a toute une partie en amont où l'eau est nettoyée et une partie en aval où l'eau est

17. Ajouter des minéraux essentiels, comme le calcium et le magnésium, à de l'eau dessalée pour améliorer son goût et ses qualités.

16. Particules en suspension.

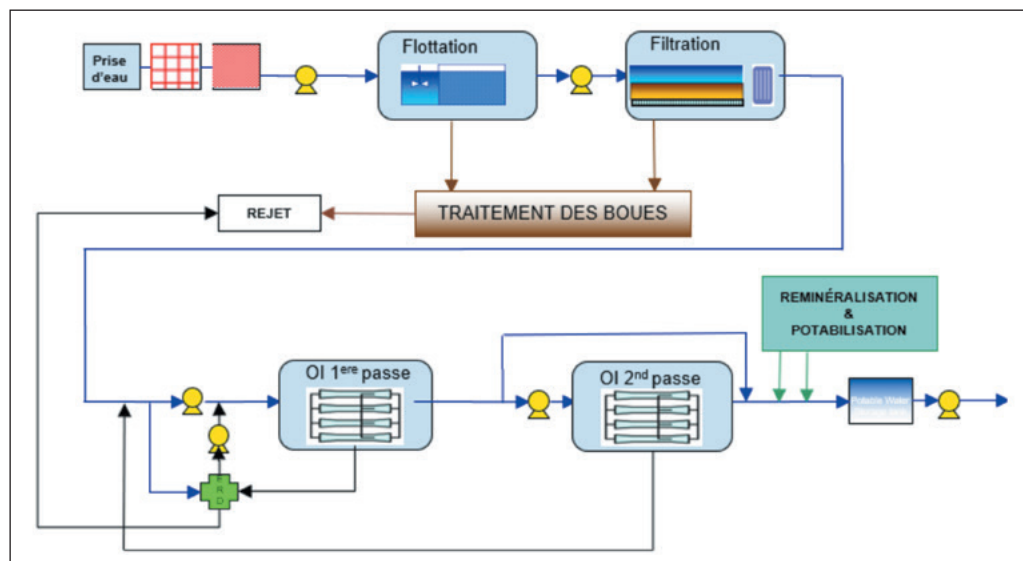


Figure 8

Étapes de traitement dans une usine d'osmose inverse.

reminéralisée pour la rendre consommable.

Cette osmose inverse, aujourd'hui, on en parle beaucoup pour le dessalement, mais on en parle un peu aussi pour la réutilisation des eaux usées.

Le dessalement des eaux salées nécessite des pressions assez élevées, de l'ordre de 60 à 80 bars¹⁸. Il y a d'autres applications qui nécessitent moins de pression, comme la réutilisation des eaux usées mais aussi des traitements de l'eau potable. C'est le cas pour éliminer les micropolluants¹⁹ qui ne sont pas toujours

18. Pression très élevée équivalente à celle régnant au fond d'un océan de 600 à 800 mètres de profondeur.

19. Contaminants présents en très faibles concentrations (nanogrammes à microgrammes par litre), comme les pesticides ou les résidus de médicaments.

éliminés avec les traitements conventionnels. C'est un sujet d'actualité. **Dans le cas des PFAS²⁰, la membrane d'osmose inverse peut être une solution.**

4 Exemples de réalisations

Les exemples concernent des réalisations à grande échelle dans des pays pour lesquels il est vital d'avoir cette eau dessalée. De très grandes quantités sont traitées sur la **figure 9** : c'est une usine thermique en Arabie saoudite, qui traite 800 000 m³ d'eau par jour.

20. Per- and Polyfluoroalkyl Substances : groupe de composés chimiques résistants utilisés dans l'industrie, persistants dans l'environnement et potentiellement nocifs.



Figure 9

Usine de dessalement thermique en Arabie saoudite.

La **figure 10** présente une usine qu'on dit «hybride» : elle effectue à la fois du dessalement thermique et du membranaire. On est sur quasiment

600 000 m³/jour. C'est aux Émirats arabes unis.

L'usine plus récente, Al Dur, à Bahreïn (**Figure 11**), traite un



Figure 10

Usine de dessalement hybride aux Émirats arabes unis.



Figure 11

Usine de dessalement membranaire à Bahreïn.

peu plus de 200 000 m³/jour. Elle a été complétée il y a à peu près deux ans.

Celle de la **figure 12** a été, à un moment, la plus grande usine de dessalement membranaire au monde, avec presque 700 000 m³/jour. Elle est aux Émirats, à côté de Dubaï.

Ce sont des exemples réalisés par Veolia, qui a la chance d'avoir en son sein une entreprise qui est le leader mondial du dessalement : Sidem²¹.

21. Filiale de Veolia spécialisée dans la conception de systèmes de dessalement thermique.



Figure 12

Usine de dessalement membranaire aux Émirats arabes unis.

Conclusion

Les défis à surmonter

Les défis qui nous attendent sont nombreux. Ils sont technologiques, mais pas seulement.

Le premier défi est celui de l'énergie. Au début du dessalement thermique, on consommait presque 20 kWh/m³, ce qui était plutôt important. L'amélioration des technologies thermiques et le passage au membranaire ont réduit cette consommation à environ 3 kWh/m³.

On peut dire que c'est beaucoup, et c'est vrai que c'est beaucoup par rapport à un traitement d'eau potable conventionnel. Néanmoins, si l'on applique ce chiffre à la consommation en eau d'un foyer de quatre personnes, il n'est pas très différent de la consommation énergétique d'un frigo.

Parmi les autres défis figure en premier la sélectivité : l'osmose inverse enlève tout, et c'est trop. Beaucoup de recherches sont faites pour rendre ces membranes plus sélectives dans ce qu'on veut récupérer ou éliminer.

Les prétraitements ne sont pas parfaits, ils laissent passer des choses qui sont encrassantes²². C'est le cas des eaux usées des laiteries, toujours très grasses, et dans lesquelles pas mal de produits biologiques peuvent se développer.

Il faudrait **des membranes qui s'autonettoient** ; ce serait aussi de l'eau économisée parce qu'il y a moins à nettoyer et des matériaux économisés parce qu'il y a moins à changer les membranes.

Le dernier défi est **l'impact environnemental**. Les usines ne sont pas implantées n'importe comment. Vu de France, on peut dire qu'au Moyen-Orient, ils font n'importe quoi. En réalité, il y a quand même des études environnementales qui regardent l'impact des rejets et l'impact vis-à-vis de l'évolution de la salinité, bien que le golfe Persique s'évapore actuellement naturellement parce qu'il fait chaud.

Il va s'évaporer de plus en plus. L'évaporation, c'est quasiment 6 % d'élévation de la concen-

22. Accumulation de particules ou de biofilms sur une membrane, réduisant son efficacité et augmentant les coûts d'entretien.

tration en salinité du golfe *versus* 0,05 % qui est imputable à l'industrie du dessalement. C'est donc une fraction absolument minime (**Figure 13**).

Finalement, les défis ne sont pas tant techniques et technologiques, mais plutôt sociétaux. Là-dessus, ils nous concernent, nous, industriels, ceux qui prennent des décisions, de grandes orientations qui essaient d'influencer certaines choses, mais vous aussi.

Les lycéens, les plus jeunes, c'est par vos changements de culture, votre prise de conscience que toutes ces choses-là vont évoluer. Gardez en tête que l'eau est trop précieuse pour n'être utilisée qu'une fois.

D'abord, économisons, réutilisons, recyclons et, à la fin, peut-être dessalons.

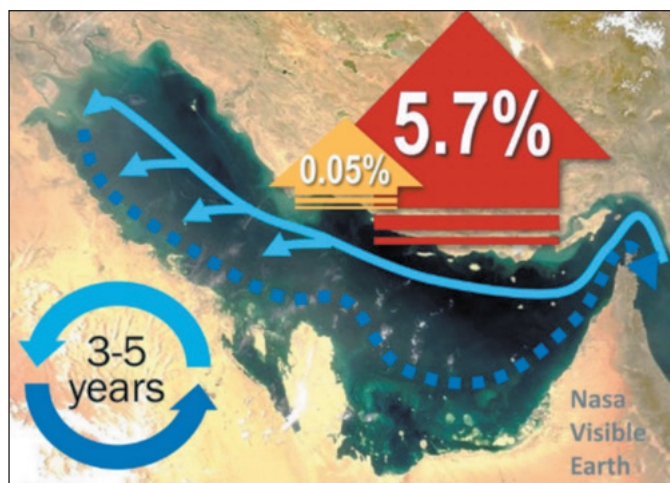


Figure 13

Hausse de la salinité due à l'évaporation (en rouge) et au dessalement (en jaune).

Des stations d'épuration encore plus performantes pour réutiliser les eaux

Christelle Pagotto est docteur-ingénieure et travaille chez Veolia depuis 2001. Elle a tout d'abord exercé au sein de la Recherche et Développement sur divers domaines : la valorisation des déchets, puis la protection des ressources en eau des milieux aquatiques et de la biodiversité... Elle est aujourd'hui responsable qualité assainissement et réutilisation des eaux usées traitées au sein de la Direction technique de Veolia Eau France.

Introduction

Les ressources en eau se raréfient et des solutions sont à inventer pour répondre aux besoins en eau de demain. Dans le contexte de changement climatique, la réutilisation des eaux usées traitées (dite « REUT ») peut apporter, en complément de la sobriété

qui doit rester à privilégier en premier lieu, une solution pour adresser les tensions sur les ressources. Cet article vise à rappeler les incidences du changement climatique, à dresser un état des lieux de la REUT en France et à présenter les étapes d'un projet de REUT ainsi que quelques exemples de projets mis en œuvre.

1 Un contexte de changement climatique

L'évolution de l'écart par rapport à la normale des températures moyennes en France depuis 1900 (*Figure 1*), marquée par une hausse significative ces dernières années, illustre de manière concrète les effets du changement climatique. Parmi les conséquences observées figurent des vagues de chaleur de plus en plus fréquentes, ainsi que des épisodes de précipitations extrêmes. Les cartes présentées (*Figure 2*) mettent en évidence les zones du territoire français les plus fortement impactées par ces phénomènes.

Le changement climatique va également avoir un impact sur la ressource en eau disponible. Le chiffre clé à avoir en tête est qu'un degré de plus représente 7 % d'eau qui s'évaporent en

plus, et que cela peut conduire jusqu'à une diminution de 14 % de la ressource en eau renouvelable.

En France, sachant que la ressource en eau renouvelable se répartit à 80-85 % dans les eaux de surface et à 15-20 % dans les nappes phréatiques, l'élévation des températures liée au changement climatique aura un impact important sur la recharge des nappes et le débit des cours d'eau, comme illustré sur la *figure 3*.

Cela aura des conséquences sur les usages de l'eau, nécessitant de les réduire à certaines périodes. Des restrictions seront alors imposées par des arrêtés émis par les préfets du département qui vont prescrire, compte tenu de la situation critique des ressources en eau, l'interdiction du remplissage des piscines, la suspension de l'arrosage

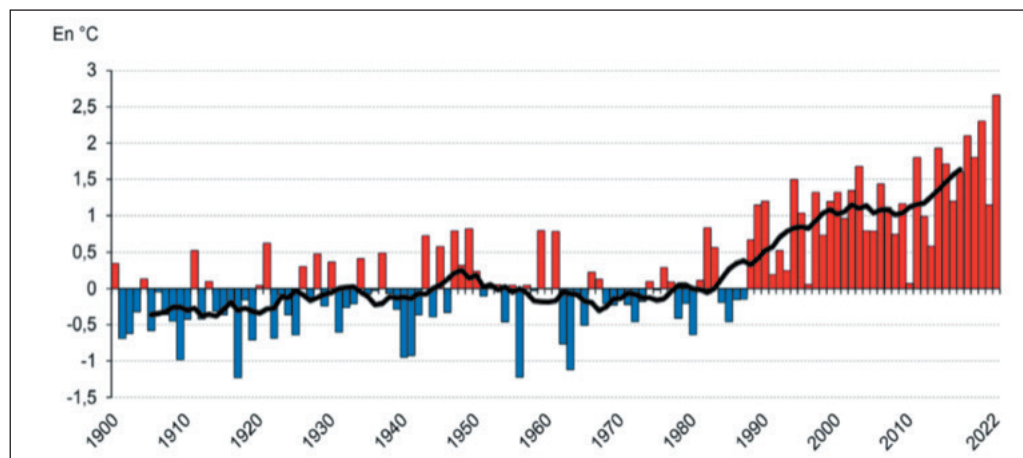


Figure 1

Écart par rapport à la normale des températures moyennes depuis 1900 (normale 1961-1990) en France métropolitaine.

Source : Météo France, décembre 2022.

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-effets-du-changement-climatique-en-france-synthese-des-connaissances-en-2023>

des espaces verts en milieu urbain, ou encore la diminution des prélèvements d'eau dans les secteurs industriels, par exemple.

Des solutions pour une gestion résiliente et concertée des ressources vont donc devoir être inventées.

En France, un plan eau a ainsi été adopté en mars 2023 avec 53 mesures pour l'eau visant à réduire les prélèvements (-10 % d'ici à 2030, en organisant la sobriété de tous les usages), à optimiser la disponibilité des ressources via la réduction des fuites des

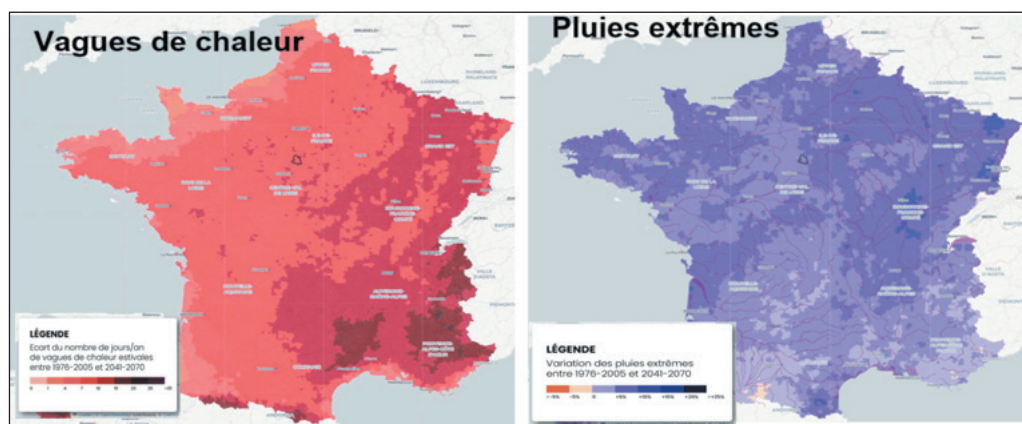


Figure 2

Cartes des zones françaises impactées par les vagues de chaleur et les pluies extrêmes.

Source : KAIROS – Outil Veolia de sensibilisation aux aléas climatiques.
(Pour en savoir plus : article ResearchGate – accès libre : https://www.researchgate.net/publication/361461637_Kairos_-_Outil_de_sensibilisation_aux_aléas_climatiques)

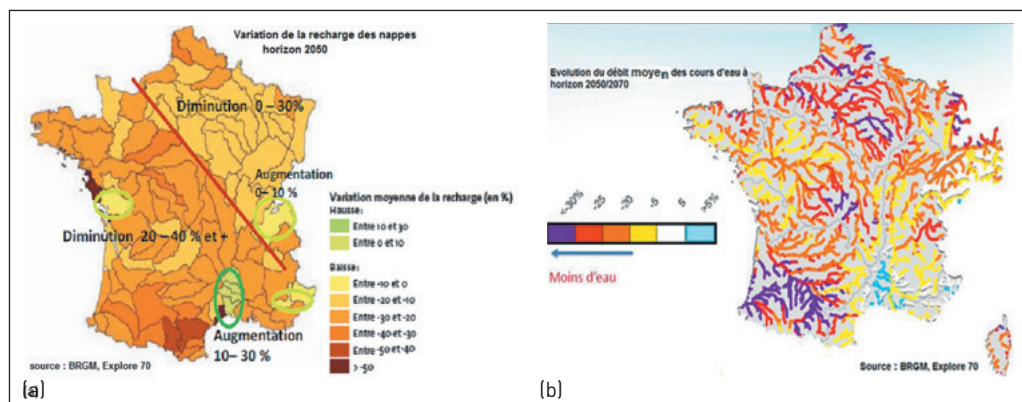


Figure 3

Effets attendus du changement climatique sur la recharge des nappes (a) et les débits des cours d'eau (b) en France.
<https://www.senat.fr/rap/r18-511/r18-5117.html>

réseaux d'eau potable et la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable, et la valorisation des eaux non conventionnelles. Sur ce dernier point, un objectif de 1 000 projets de réutilisation d'eaux d'ici à 2027 est retenu.

Des solutions sont donc à inventer pour adapter les services d'eau et d'assainissement pour mieux gérer l'eau. Diverses solutions sont à présent identifiées pour s'adapter au changement climatique, dans les périodes où il n'y a pas assez d'eau ou dans celles où il y a trop d'eau, notamment dans le rapport au Premier ministre et au Parlement sur

la prospective au service de l'adaptation¹.

Pour le « trop d'eau », les services d'assainissement vont, par exemple, travailler sur la façon dont on peut mieux utiliser les réseaux d'assainissement lors des gros événements pluvieux, pour stocker l'eau *via* des vannes hydrodynamiques et éviter les débordements/déversements des réseaux vers les milieux, susceptibles d'inonder en point bas certaines zones ou de polluer les cours d'eau (exemple : Dinard). Une gestion prévisionnelle des cours d'eau peut également être mise en place pour

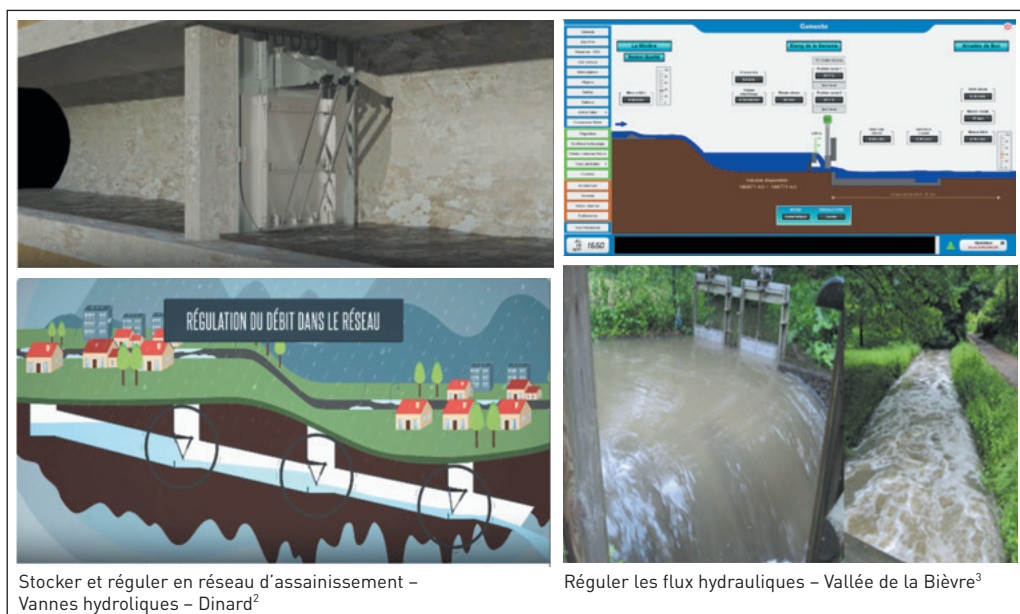


Figure 4

Exemples de solutions pour mieux gérer l'eau en période de « trop d'eau ».

1. <https://www.vie-publique.fr/rapport/284298-la-prospective-au-service-de-ladaptation-au-changement-climatique>
2. <https://f-reg.fr/les-travaux-dassainissement-ville-de-dinard/>
3. <https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/actus/Fiche%20REX%20Bi%C3%A8vre%20amont%20VF.pdf>

réguler les flux hydrauliques et éviter d'inonder certains quartiers (exemple : la Bièvre) (Figure 4).

Face au défi du « pas assez d'eau », de nombreuses solutions existent. La première consiste à renforcer la sobriété, c'est-à-dire à réduire les différents usages et les prélèvements en eau. Des dispositifs comme le télérelevé permettent de suivre en temps réel la consommation, et constituent ainsi un excellent levier de sensibilisation des usagers⁴. Autre exemple, le programme Éco d'Eau⁵ incite chacun à adopter des gestes responsables pour préserver la ressource en eau⁶. Un autre axe majeur concerne la réduction des pertes sur les réseaux de distribution d'eau potable, grâce à des outils permettant de détecter et de localiser plus efficacement les fuites⁷. Enfin, un autre levier consiste à favoriser/développer le recyclage et la réutilisation des eaux usées traitées, afin de limiter le recours à l'eau potable pour certains usages.

Aujourd'hui, les différents acteurs impliqués dans la

gestion de l'eau (ministères, agences de l'eau...) s'accordent à dire que, pour répondre aux enjeux de l'eau, une combinaison de ces différentes solutions sera nécessaire.

2 Situation de la REUT⁸ en France

La REUT consiste à « utiliser à nouveau » les eaux usées traitées en sortie des stations d'épuration urbaines (qui collectent et traitent tous les effluents de la ville) ou en sortie des stations d'épuration industrielles (qui collectent et traitent les effluents des industriels). Il s'agit là de leur donner une « seconde vie » pour des usages qui n'auraient pas besoin d'une qualité d'eau « eau potable ». Cela nécessite parfois de les traiter davantage de façon à obtenir une qualité suffisante pour permettre ces usages. Les usages possibles aujourd'hui sont, pour l'essentiel, des usages urbains (arrosage des parcs et des espaces verts des villes, nettoyage des réseaux d'assainissement, lavage des rues...), agricoles (irrigation) ou industriels (divers usages).

Et puis, aujourd'hui, mais c'est encore à un stade expérimental, on essaie également de réutiliser ces eaux usées traitées pour préserver l'environnement, c'est-à-dire, par exemple, de réalimenter des zones humides qui se retrouvent en souffrance parce qu'elles n'ont pas assez d'eau avec un impact sur la biodiversité ou bien de recharger des ressources qui vont être utilisées pour la production d'eau

4. <https://www.veolia.com/fr/solutions/telereleve-compteurs-eau-ville-intelligente>

5. Éco d'Eau : initiative lancée par Veolia visant à rassembler l'ensemble des acteurs – citoyens, pouvoirs publics, entreprises, associations – autour des actions à mener pour préserver notre ressource commune en eau. <https://ecodeau.org/>

6. <https://ecodeau.org/>

7. <https://www.veolia.com/fr/planetlive/detecter-fuites-deau-reduire-pertes-eau-potable#:~:text=Veolia%20dispose%20d'un%20large,son%20entre%20deux%20capteurs%20acoustiques>

8. REUT : acronyme pour « réutilisation des eaux usées traitées ».

potable (barrages ou nappes phréatiques – c'est ce qu'on appelle la « REUT Eau Potable indirecte »).

En France, la REUT demeure aujourd'hui peu pratiquée, comparativement à ce qu'on observe dans d'autres pays européens : ces eaux usées traitées demeurent assez peu utilisées, tel qu'on peut le voir sur la carte (Figure 5). En effet, la France réutilise aujourd'hui moins de 1 % des eaux usées traitées en sortie de stations d'épuration. On peut noter que d'autres pays réutilisent une proportion plus importante de ces eaux : 8 % en Italie, 14 %

en Espagne, et jusqu'à plus de 80 % en Israël.

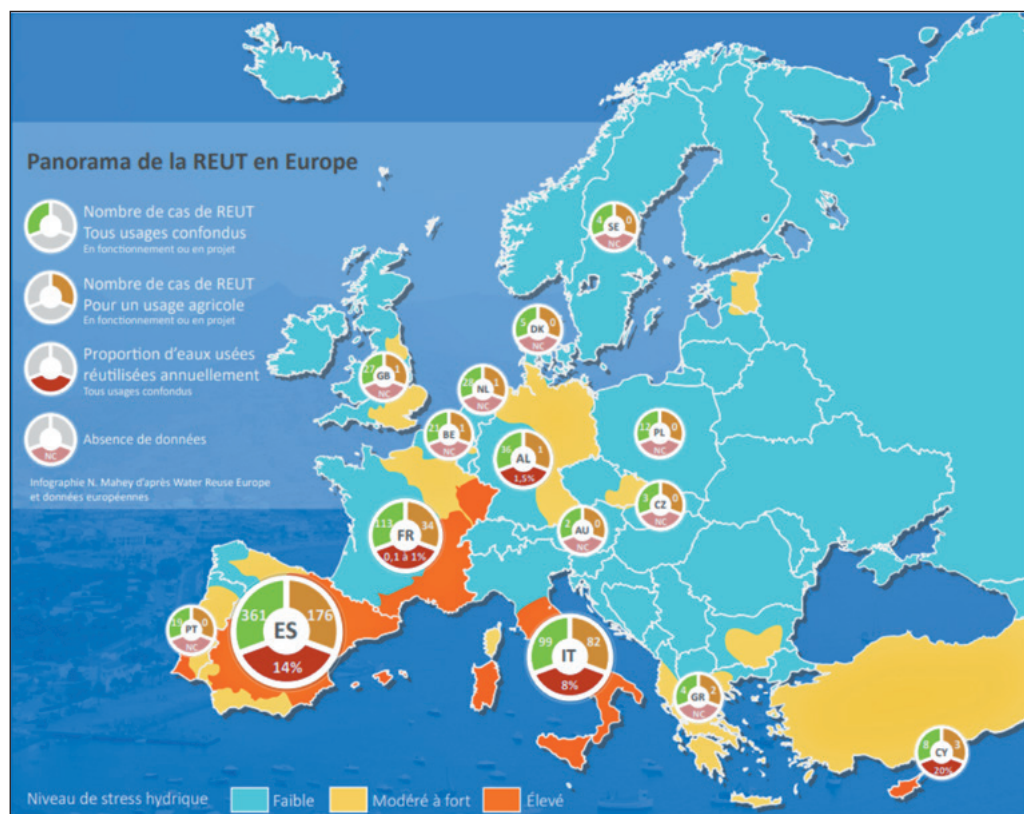
La carte suivante (Figure 6) présente le panorama des projets en France : il s'agit d'une cartographie réalisée par le Cerema⁹ en 2017¹⁰ et mise à jour par l'INRAE¹¹ en

9. Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

<https://www.cerema.fr/fr>

10. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/panorama-francais-reutilisation-eaux-usees-traitees-3>

11. INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement. <https://www.inrae.fr/>



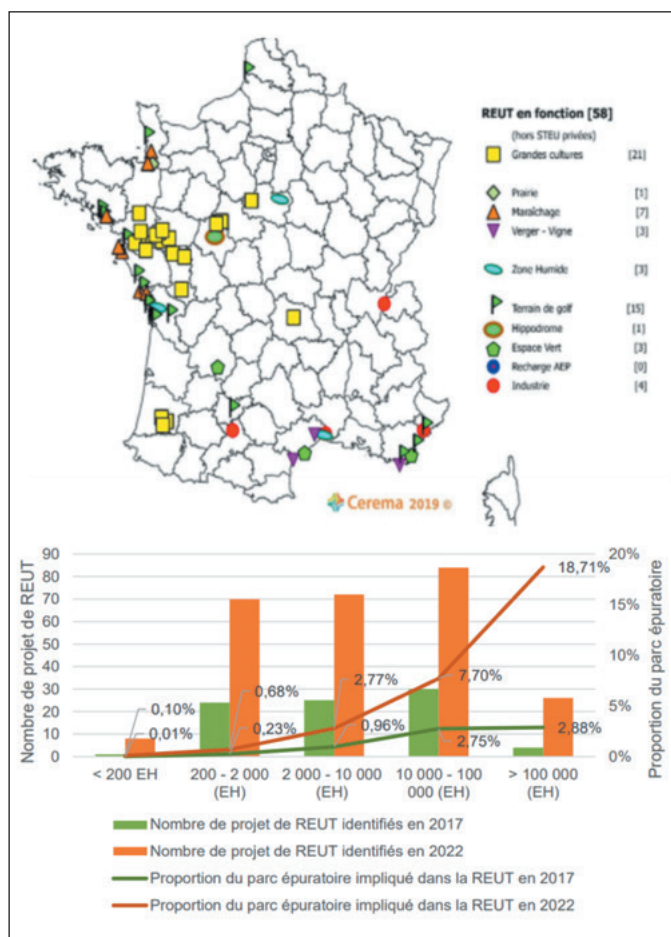


Figure 6

Projets de REUT recensés en France.

2022¹². Il existe divers cas mais ils restent assez peu nombreux.

Divers freins ont été identifiés, notamment par l'ASTEE¹³, dans le cadre de travaux lancés sous l'égide des

ministères de l'Environnement et de la Santé et menés par une large panoplie d'acteurs concernés par le sujet de la réutilisation des eaux usées en France (collectivités, fédérations de professionnels de l'eau, bureaux d'études spécialisés...). Il s'agissait de mener collectivement une analyse pour comprendre les freins et les leviers possibles pour favoriser le recours aux eaux non conventionnelles (ENC : eaux usées traitées

12. <https://www.oieau.fr/eaudans-laville/content/panorama-de-la-r%C3%A9utilisation-des-eaux-us%C3%A9es-trait%C3%A9es-en-france-en-2022>

13. ASTEE : Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement.

mais également autres eaux non conventionnelles telles que eaux de pluie, eaux grises...). Plus de 80 retours d'expérience ont été collectés et ont servi de base à cette analyse.

Les principaux verrous au développement du recours aux ENC identifiés par l'ASTEE en France étaient essentiellement :

– Un verrou d'ordre réglementaire : avec un cadre réglementaire alors incomplet, et

siloté par type d'eaux/usages et imposant une démarche administrative d'autorisation longue et complexe.

– Un verrou d'ordre économique/financier : aujourd'hui, la mise en place d'une solution de réutilisation des eaux a forcément un coût puisqu'il faut davantage traiter l'eau, la transporter au point d'usage... et, face à un coût de l'eau potable qui est relativement peu élevé en France, la rentabilité économique est souvent difficile à atteindre. Il est alors difficile de trouver des utilisateurs de ces eaux qui acceptent de payer l'eau usée traitée.

Malgré tout, il est apparu que de nombreux couples «types d'eaux/usages» offrent un potentiel (*Figure 7*) et divers leviers et recommandations pour favoriser le recours aux eaux non conventionnelles.

On peut noter 6 leviers et 24 recommandations communes à l'ensemble des usages visant principalement à :

- clarifier et faire évoluer la réglementation ;
- développer et transmettre la connaissance ;
- renforcer la confiance et inciter les acteurs à développer des projets ;
- accompagner les acteurs dans la mise en œuvre ;
- financer et rendre économiquement viables les projets ;
- et intégrer les ENC dans une approche de gestion globale.

Suite à ces travaux de l'ASTEE, un nouveau cadre réglementaire visant à lever les verrous réglementaires est en cours d'adoption (*Figure 8*) [décret d'août 2023 et arrêtés

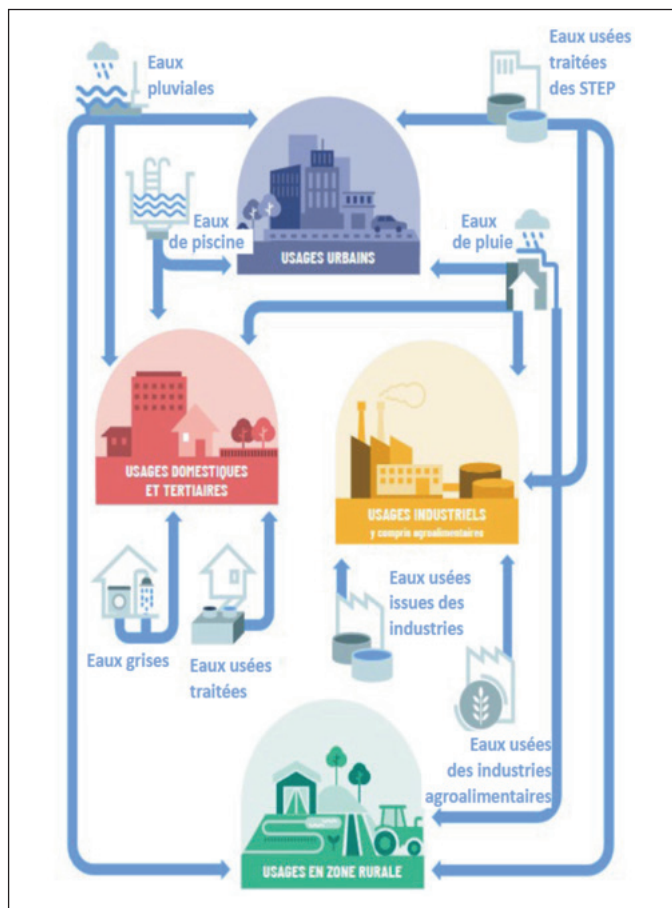


Figure 7

Schéma présentant les multiples couples «eaux usées/usages» offrant un potentiel.

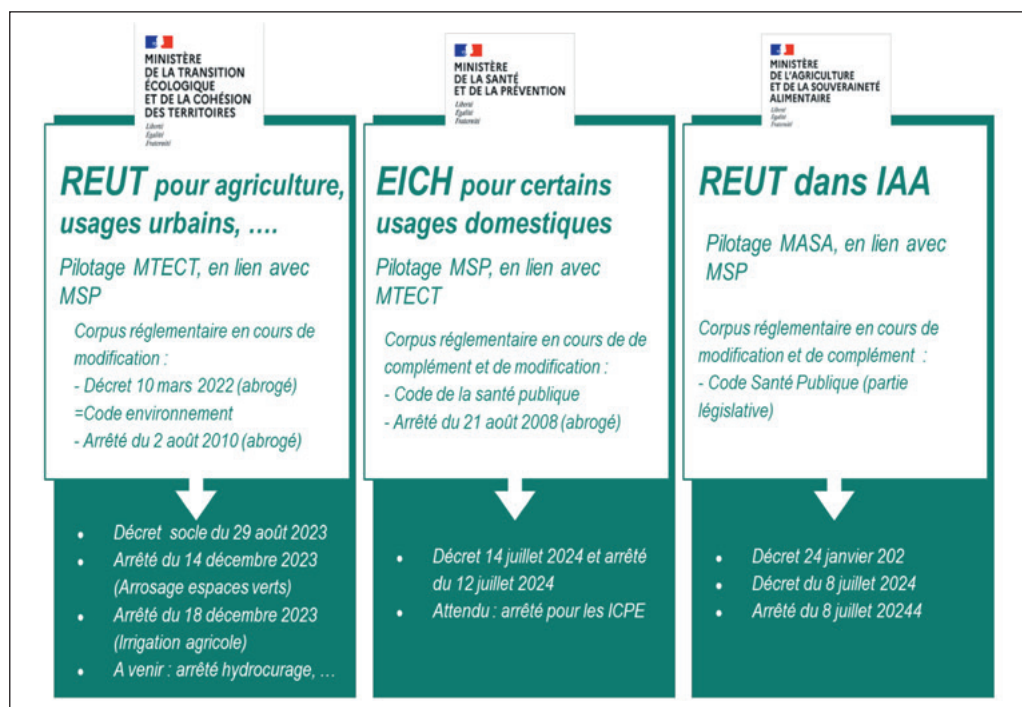


Figure 8

Les divers chantiers réglementaires initiés suite au plan eau.

spécifiques liés pour différents usages).

Sans rentrer dans le détail des textes réglementaires qui s'appliquent, le décret d'août 2023 va définir le processus d'autorisation (Figure 9). En effet, avant tout projet, il faut obtenir une autorisation préfectorale, donc monter un dossier de demande d'autorisation qui, en général, est porté soit par l'entité qui va produire les eaux usées traitées, ou bien par celle qui va réutiliser ces eaux usées traitées. Ce dossier intègre une évaluation des risques environnementaux et sanitaires pour démontrer que le projet n'impacte ni l'environnement ni la santé. Ce dossier est déposé auprès du

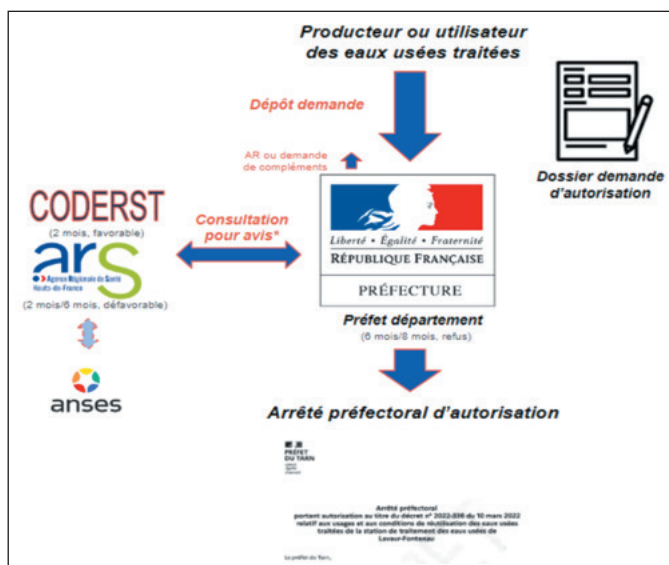


Figure 9

Processus d'autorisation d'un projet REUT.

préfet et instruit par le service de police de l'eau après avis de l'Agence Régionale de la Santé (ARS), notamment. Cela va donner lieu à un arrêté préfectoral qui va autoriser les usages de l'eau, en spécifiant les règles à respecter (qualité d'eau...). En complément du décret de 2023, des arrêtés par type d'usage viennent préciser les conditions dans lesquelles on peut utiliser les eaux usées traitées (pour l'irrigation agricole, l'arrosage des espaces verts...). Ces arrêtés vont venir définir les qualités de l'eau *a minima* et les conditions d'usage à suivre pour pouvoir les utiliser. Ils permettent alors de s'affranchir de la consultation de l'ARS.

Différentes classes de qualité d'eau (A, B, C, D) sont définies, et vont définir les usages possibles de l'eau usée traitée. Avec la qualité A, qui est la meilleure, on va pouvoir pratiquer les usages les plus nobles, par exemple l'irrigation agricole de cultures consommées par l'homme ; avec la qualité D, des usages qui vont nécessiter une qualité d'eau moindre.

À titre d'exemple, le tableau ci-dessous (**Figure 10**) présente les différentes classes de qualité définies (selon les arrêtés arrosage des espaces verts du 14 décembre 2023 et irrigation agricole du 18 décembre 2023). Il est intéressant de regarder les paramètres qui sont réglementés pour la réutilisation de ces eaux usées traitées. On retrouve des paramètres assez usuels de la chimie de l'eau : la présence de matières en suspension, la présence de matières organiques dans les eaux reflétée par le paramètre

demande biologique en oxygène¹⁴ (DBO5), mais on trouve surtout des limites en concentration ou des niveaux d'abattement à atteindre pour des paramètres microbiologiques. On retrouve, par exemple, *Escherichia coli*¹⁵ ou *Clostridium perfringens*¹⁶, qui sont des micro-organismes qu'on retrouve dans les eaux usées urbaines ou qui sont des indicateurs de contamination fécale. On doit s'assurer qu'ils ont été bien éliminés dans les eaux usées traitées de façon à ne pas générer de risques sanitaires, puisque certains micro-organismes peuvent être pathogènes pour l'homme.

3 Les étapes d'un projet de REUT

La construction d'un projet se fait en plusieurs étapes (**Figure 11**).

Des aides peuvent généralement être obtenues auprès des agences de l'eau aux différentes étapes (études, construction...).

14. Demande biochimique en oxygène (DBO) : quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques (biodégradables) par des bactéries. Elle permet d'évaluer la fraction biodégradable de la charge polluante carbonée des eaux usées. Elle est en général calculée au bout de cinq jours à 20 °C et dans le noir. On parle alors de «DBO5».

15. *Escherichia coli* : bactérie qui réside dans le tube digestif de l'être humain et des animaux ; certaines sont pathogènes pour l'homme.

16. *Clostridium perfringens* : bactérie naturellement présente dans l'intestin de l'homme.

Tableau 4. – Paramètres et niveau de qualité

PARAMÈTRES	NIVEAU DE QUALITÉ SANITAIRE DES EAUX USÉES TRAITÉES			
	A	B	C	D
Matières en suspension (mg/L)	≤ 10	Conforme à la réglementation des rejets d'eaux usées traitées pour l'exutoire de la station hors période d'utilisation		
Demande biologique en oxygène sur 5 jours (mg/L)	≤ 10	Conforme à la réglementation des rejets d'eaux usées traitées pour l'exutoire de la station hors période d'utilisation		
Escherichia coli (nombre/100mL)	≤ 10	≤ 100	≤ 1 000	≤ 10 000
Coliphage (bactériophages ARN-F spécifiques et/ou phages somatiques (*))	≤ 10	≤ 100	≤ 1 000	≤ 10 000
Clostridium perfringens (**)	≤ 10	≤ 100	≤ 1 000	≤ 10 000
Turbidité (NTU)	≤ 5	-	-	-
Autres	Legionella spp. : < 1 000 ufc/l lorsqu'il existe un risque de formation d'aérosols Nématodes intestinaux (œufs d'helminthes) : ≤ 1 œuf/l pour l'irrigation des pâturages ou des fourrages frais			

(*) Les coliphages totaux sont choisis comme étant l'indicateur viral le plus approprié. Cependant, si l'analyse des coliphages totaux est impossible, au moins l'un d'entre eux (les coliphages F-spécifiques ou les coliphages somatiques) doit être analysé.

(**) Les spores de *Clostridium perfringens* sont choisies comme étant l'indicateur de protozoaires le plus approprié. Cependant, les bactéries anaérobies sulfito-réductrices et leurs spores offrent une solution de remplacement si la concentration de spores de *Clostridium perfringens* ne permet pas de valider la réduction log₁₀ requise.

Paramètres et abattement lors de la validation des performances de l'installation

PARAMÈTRES	ABATTEMENT EN LOG	
	A	B (1)
Escherichia coli	≥ 5	≥ 3
Coliphages totaux/coliphages F-spécifiques/coliphages somatiques/coliphages	≥ 6	≥ 3
Spores de <i>Clostridium perfringens</i> /bactéries anaérobies sulfito-réductrices et leurs spores	≥ 4 dans le cas de spores de <i>Clostridium perfringens</i> ≥ 5 dans le cas de bactéries anaérobies sulfito-réductrices et leurs spores	≥ 3

(1) abattement attendu si usage pour des espaces verts ouverts au public

Figure 10

Classification de l'eau suivant sa qualité, selon les arrêtés de décembre 2023.

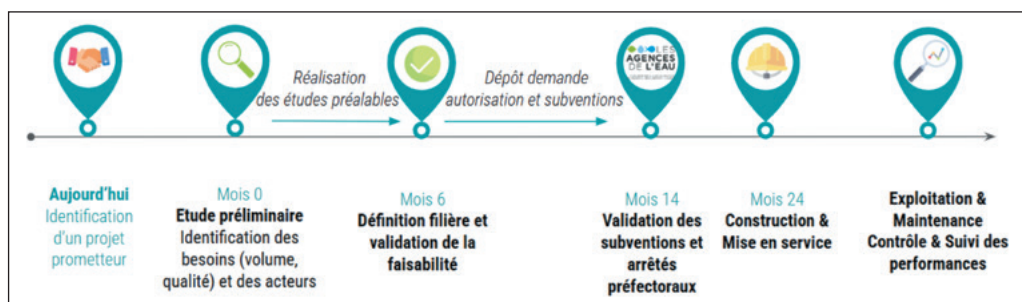


Figure 11

Les différentes étapes d'un projet REUT.

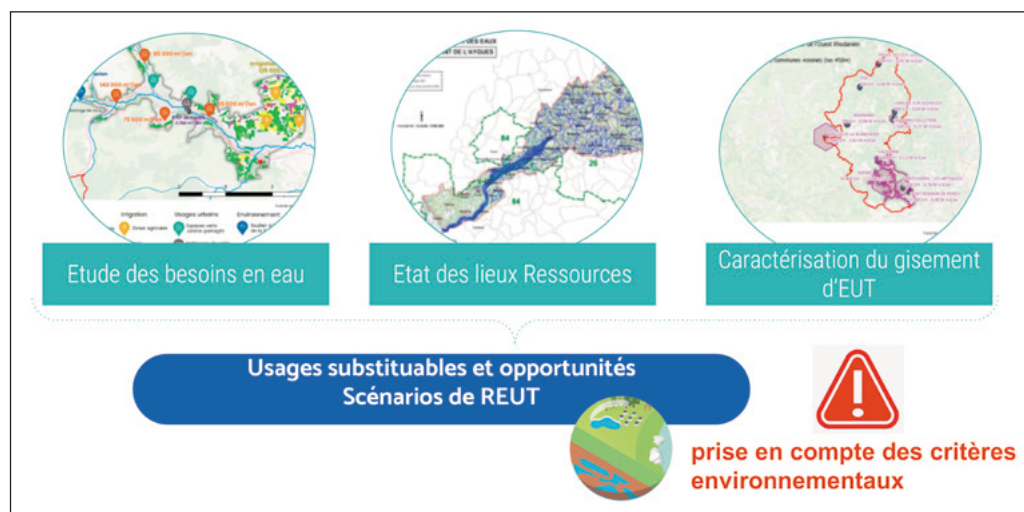


Figure 12

Les différentes étapes de l'étude d'opportunités à réaliser pour proposer un projet de REUT.

Pour identifier un projet prometteur, on commence par réaliser une étude d'opportunités (Figure 12).

À ce stade, les critères environnementaux doivent être considérés : la REUT ne doit pas priver le cours d'eau récepteur des rejets de la station d'épuration d'une eau dont il a besoin ou dont les usagers à l'aval auraient besoin. C'est la raison pour laquelle, aujourd'hui, on a essentiellement des projets qui démarrent en zone littorale, là où, effectivement, les eaux sont « perdues » pour les usages sur la Terre et où la question de l'incidence environnementale se pose moins.

Ensuite, il faut définir la bonne filière technique pour produire l'eau avec une qualité adaptée au regard de l'usage visé. Les eaux usées en sortie de station d'épuration ont déjà subi un traitement assez important, comme on peut le voir sur la figure 13. Cependant, il peut rester des traces de matières en suspension, des matières organiques et surtout des

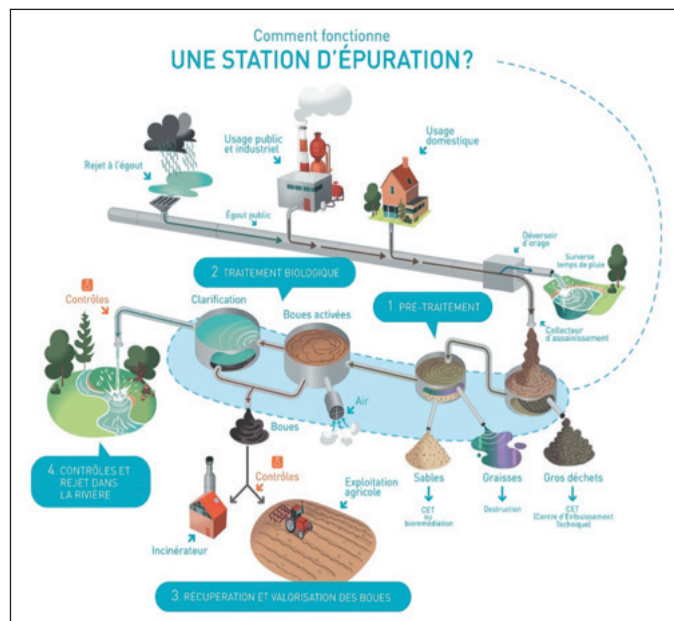


Figure 13

Étapes usuelles de l'épuration des eaux usées urbaines.

micro-organismes, puisque le traitement usuel sur les stations d'épuration ne vise pas à les éliminer. Il est donc bien souvent nécessaire d'ajouter des étapes complémentaires de traitement.

Il faut donc chercher une solution adaptée pour affiner le traitement des eaux en sortie de station. Pour cela, on dispose d'un portefeuille complet de technologies qui

peuvent être mises en œuvre parmi lesquelles on choisira selon la qualité disponible en sortie de station d'épuration et selon la qualité visée (Figure 14).

Des solutions standards packagées ou des solutions sur mesure peuvent être utilisées (Figure 15).

Pour affiner le traitement des eaux, il est en général nécessaire de les filtrer davantage

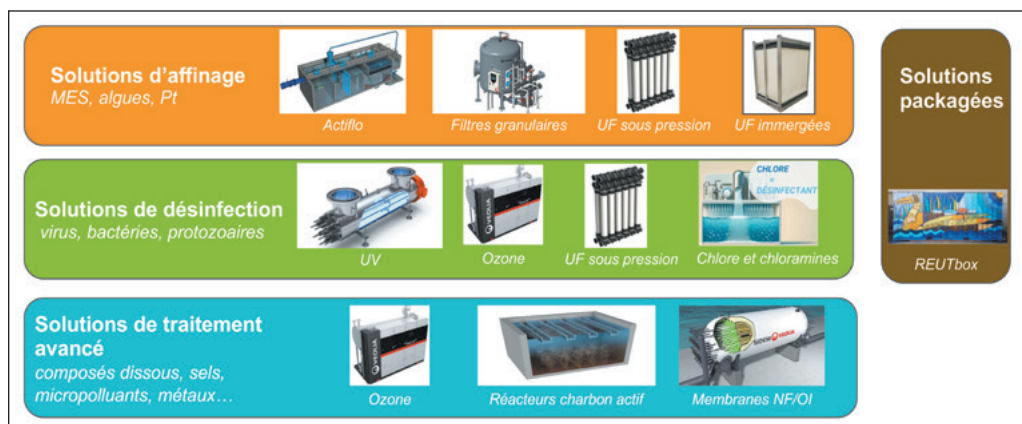


Figure 14

Le portefeuille de solutions disponibles pour améliorer la qualité des eaux en sortie d'une station d'épuration.

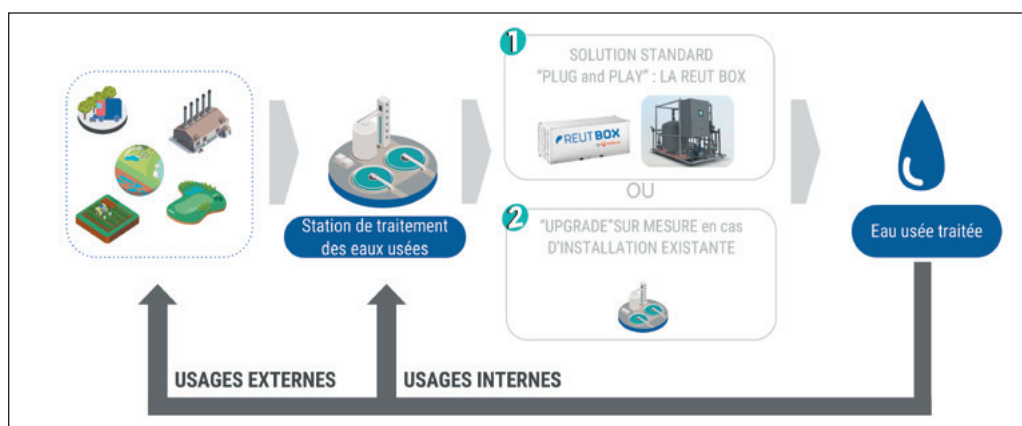


Figure 15

Les choix possibles pour un projet de REUT.

pour éliminer les matières en suspension puis les désinfecter. On dispose de différentes techniques, mais l'une des plus utilisées en sortie de station d'épuration est la désinfection UV. Le pouvoir bactéricide des UV est utilisé pour éliminer les micro-organismes présents dans l'eau. Il faut définir la dose d'UV nécessaire pour obtenir une bonne efficacité. Ensuite, on fait souvent une chloration de ces eaux pour garder la désinfection « active », assurer la rémanence de la désinfection. Cela vise à conserver une bonne qualité sanitaire lors du transport jusqu'au point d'usage par des canalisations ou des camions.

La ReutBox¹⁷ (Figure 16) est un exemple d'unité packagée, de petite capacité, « Plug and Play », qui combine tous ces traitements.

17. ReutBox : de l'anglais, « boîte de la REUT » (réutilisation des eaux usées traitées).

Veolia, elle permet assez rapidement de mettre en place une solution REUT sur les stations d'épuration de façon à produire des petits débits et des petites quantités d'eaux usées traitées pour l'utilisation.

La carte ci-après (Figure 17) présente quelques exemples de projets REUT emblématiques nationaux accompagnés par Veolia. Ainsi, le projet du golf de Sainte-Maxime a été parmi les pionniers avec 300 000 mètres cubes d'eau réutilisés chaque année pour l'arrosage. À Disneyland Paris, l'eau usée traitée est utilisée pour arroser des espaces verts, mais aussi pour remplir les bassins d'agrémentation. Narbonne Ville réutilise presque 100 000 mètres cubes par an pour des usages internes de l'eau mais aussi pour l'arrosage des espaces verts.

D'importants projets de R&D ont par ailleurs été menés pour étudier l'impact de la

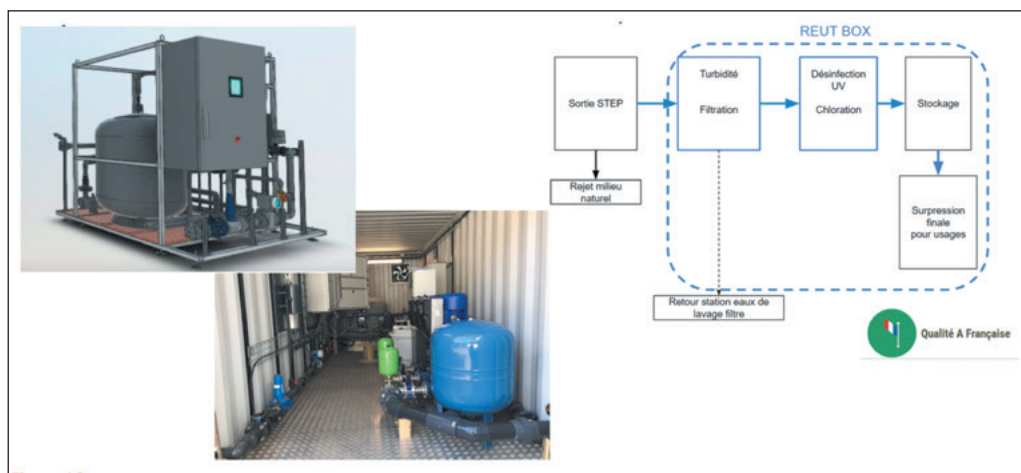


Figure 16

Schéma de fonctionnement de la ReutBox.

réutilisation sur les sols et leurs qualités, comme celui de Irri-Alt'Eau, dans le sud de la France. Et une unité d'affinage a été construite pour le projet Jourdain de Vendée Eau, premier démonstrateur en France de REUT indirecte pour

la production d'eau potable. Il s'agit là d'une expérimentation unique autorisée. Les eaux usées traitées par l'unité d'affinage permettent la recharge d'une retenue dans laquelle l'eau est prélevée pour produire l'eau.



Figure 17

Carte présentant quelques projets de REUT français emblématiques (accompagnés par Veolia).

Conclusion

Dans un contexte de changement climatique, face aux tensions sur les ressources en eau, le développement de la REUT fait partie des mesures identifiées par le plan eau du gouvernement pour une gestion résiliente et concertée de l'eau. En France, elle reste aujourd'hui assez peu développée, en raison de freins d'ordre réglementaire et économique. Toutefois, suite

au plan eau, la réglementation évolue et les solutions techniques existent pour produire, à partir d'eaux usées traitées, des eaux de qualité permettant leur utilisation pour divers usages (irrigation agricole, arrosage des espaces verts...). De premiers retours d'expérience en confirment la faisabilité et l'intérêt dans certains contextes, lorsqu'elle peut être « sans regret » au regard des potentiels impacts environnementaux et sanitaires. C'est aujourd'hui essentiellement en zone littorale qu'elle se développe et avec des traitements permettant l'élimination des micro-organismes d'origine fécale (filtration et UV, par exemple). Elle peut donc offrir, pour certains territoires, une solution complémentaire aux actions de sobriété qui sont à réaliser en tout premier lieu.

Préserver la ressource en eau – Exemple de la chimie

D'après la conférence de Patrick Cleret, qui a 32 ans d'expérience dans l'industrie chimique dans différents postes : directeur usine, directeur environnement et sécurité dans différentes sociétés. Aujourd'hui, il travaille à France Chimie comme directeur des affaires techniques.

Introduction

France Chimie est la structure qui représente l'industrie chimique en France, avec un petit millier d'adhérents, de

sites qui travaillent pour la chimie. Regardons ensemble un certain nombre d'applications de la chimie, qui est présente un peu partout dans notre quotidien (**Figure 1**).

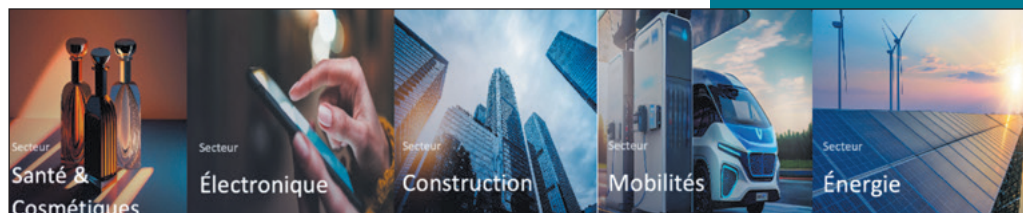


Figure 1

Domaines du quotidien où la chimie est présente.

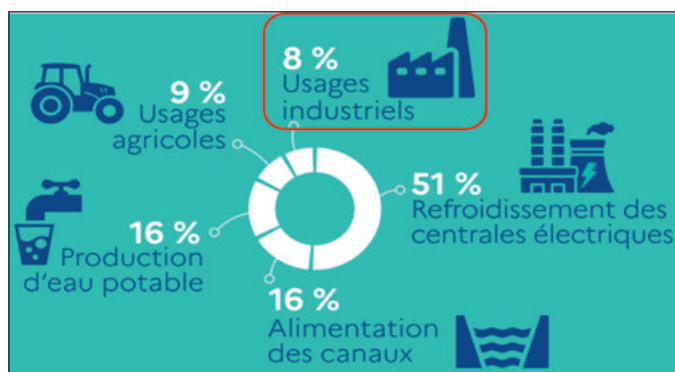


Figure 2

Schéma illustrant les différents usages de l'eau.

Les téléphones portables sont l'une des nombreuses applications dans lesquelles vous trouvez de la chimie. Il y en a beaucoup d'autres, souvent des secteurs de pointe, comme celui des énergies renouvelables, la pharmacie ou les batteries électriques. La chimie est donc présente dans tous les secteurs.

Une préoccupation générale est la préservation de notre ressource en eau, et nous allons ici préciser les efforts et les apports de la chimie.

D'abord, partageons ensemble quelques données.

1 État des lieux de la ressource en eau

1.1. Quelques données

33 milliards de mètres cubes de prélèvement dits d'« eau douce » par an en France, c'est beaucoup. Plus de 33 % servent au refroidissement des centrales de production d'électricité. L'industrie, c'est 8 % : elle n'est pas la plus grosse préleveuse, mais

cela compte quand même (Figure 2). Et dans l'industrie, le secteur de la chimie est le plus gros contributeur. On le voit ensuite sur les chiffres de la chimie, tous prélèvements confondus, en rajoutant aux eaux douces les prélèvements d'eau de mer : 1,3 milliard de mètres cubes par an qui se répartissent pour moitié en eaux de surface, un quart en eaux venant de la mer, un petit quart en eaux « souterraines » et simplement une cinquantaine de millions de mètres cubes d'eau de distribution.

Mais pourquoi a-t-on besoin de 1,3 milliard de mètres cubes par an ? Voici les utilisations principales.

La principale utilisation de l'eau, c'est pour refroidir nos installations et ce qu'on appelle nos « masses réactionnelles ». Dans les sites de production industriels, on chauffe, on refroidit, on réchauffe, on rerefroidit. Dans la vie réelle, c'est un petit peu plus compliqué que cela, mais effectivement, il y a quand même beaucoup d'étapes de refroidissement et on utilise de l'eau pour refroidir.

La deuxième utilisation de l'eau, c'est pour le lavage des unités. Quand on passe d'une production à une autre dans une autre application, on a besoin d'un lavage très strict pour éviter d'apporter des contaminants, des impuretés pour les applications qui suivront.

Par ailleurs, on chauffe les milieux réactionnels avec de la vapeur et, pour produire de la vapeur, on a évidemment besoin d'eau.

1.2. Des efforts significatifs mais une volonté d'aller plus loin

Entre 2000 et 2020, on a baissé nos prélèvements de 30 %. C'est un progrès notable. Est-ce qu'on s'arrête là ? Non ! On veut aller plus loin pour deux raisons principales :

- 1) D'abord, le changement climatique, et on va juste prendre l'exemple des canicules. Comme on l'a remarqué, elles sont de plus en plus fréquentes. Elles existaient déjà dans le passé. Aujourd'hui, quand elles reviennent, elles durent de plus en plus longtemps. Quand on a une canicule, la ressource en eau s'appauvrit progressivement et on doit réduire nos prélèvements, et donc nos capacités de production, jusqu'au point où on ne peut plus fonctionner pour des raisons de sécurité. On doit alors arrêter totalement nos ateliers, on ne fournit plus nos clients ; c'est une situation dont il faut sortir.
- 2) Nous sommes des chimistes responsables : nous voulons apporter des solutions. On

ne travaillerait pas ce sujet si nous étions incapables de réduire notre consommation, nos prélèvements.

2 Le programme d'accompagnement de France Chimie

Dès l'automne 2022, France Chimie a engagé un programme d'accompagnement des adhérents. Elle a placé l'eau comme une priorité dès 2023.

Quel est ce programme ? Quels sont les objectifs ?

- 1) Sensibiliser nos adhérents pour qu'ils considèrent la gestion de l'eau comme prioritaire et stratégique.
- 2) Les inviter à s'emparer du sujet, les rendre plus indépendants. Dans ce but, on a décidé de mettre à leur disposition deux outils :
 - a. Un **outil d'autoévaluation appelé « FSAT¹ »** (Figure 3), grille qui, avec

1. FSAT (Factory Self-Assessment Tool) : outil ou système automatisé conçu pour assister les opérations dans une usine ou un environnement industriel.

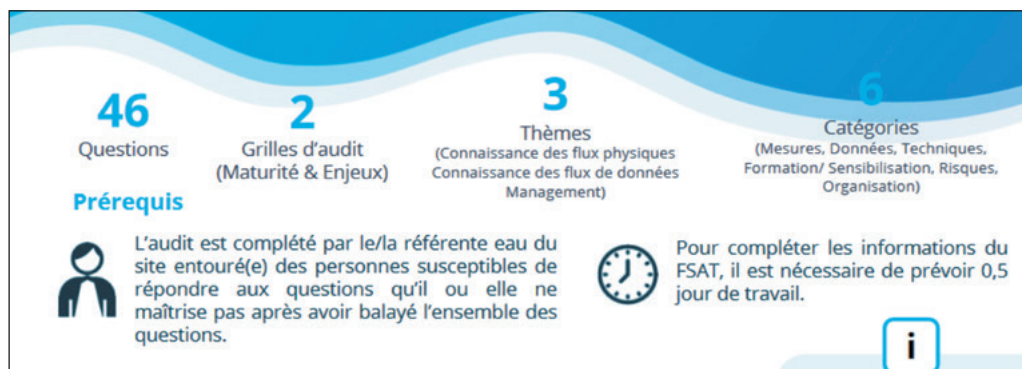


Figure 3

Outil d'évaluation FSAT (Factory Self-Assessment Tool).

une cinquantaine de questions, permet d'identifier là où on doit travailler. Les axes de travail sont différents d'un site à l'autre.

- b. Un **guide de l'eau** (*Figure 4*), pour rappeler les concepts et principes de l'efficacité hydrique. Il est composé d'un certain nombre de fiches qui vont aider nos adhérents à travailler sur leurs priorités. Par exemple, on sait ce qui rentre sur un site, mais on doit savoir comment cela se répartit dans différents ateliers pour différents usages. Il faut avoir un schéma très précis, compter combien de mètres cubes vont à tel endroit, mettre en place des indicateurs de contrôle, identifier des fuites... Tel est le principe du guide de l'eau. J'aimerais remercier deux structures qui ont aidé à construire ce guide : Aquassay et l'Agence Seine-Normandie.

Nous avons d'abord travaillé avec **le top 50 des plus gros préleveurs**. Dans ce top 50, **construit à l'initiative du gouvernement**, la chimie en compte 22, ou 27 si l'on prend la filière chimie et matériaux. Le travail avec ces sites a servi pour élaborer une feuille de route ayant comme objectif de diminuer nos besoins en eau de 10 % en 2030, avec comme référence l'année 2019.

Le guide de l'eau n'est pas figé, et nous allons le faire évoluer, à la lumière des retours d'expérience. Nous pourrions nous inspirer de sites déjà engagés sur certaines actions et faire profiter d'autres partenaires de leurs compétences. Aujourd'hui, parmi nos milliers d'adhérents, nous comptons une très grande majorité de petites structures (PME/TPE²) ; cette communauté est vouée à grandir.

2. PME : petites et moyennes entreprises. TPE : très petites entreprises.

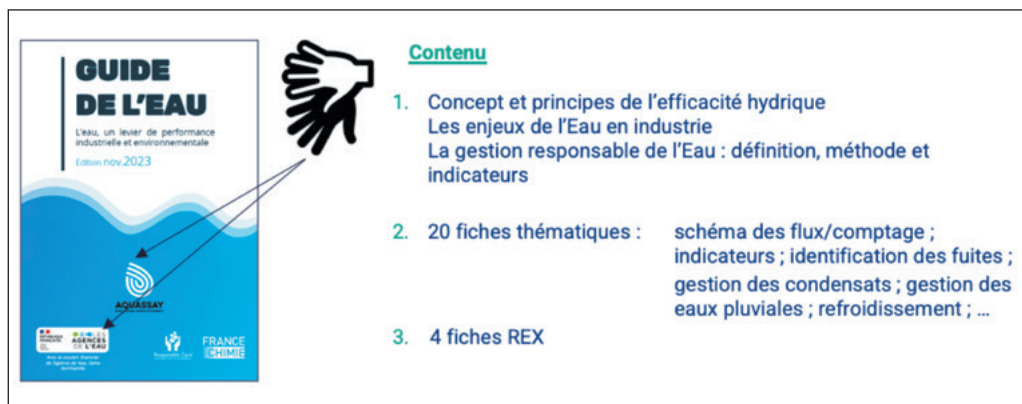


Figure 4

Le guide de l'eau, un programme d'accompagnement.

Conclusion

En 2025, la gestion de l'eau reste une priorité. La dynamique est engagée, il faut la poursuivre. L'autre objectif, c'est d'aller plus loin dans la réutilisation (REUT³) ou le recyclage que l'on fait déjà en interne – on récupère de l'eau et on la réintroduit en amont dans nos procédés. La difficulté devant nous est de faire réutiliser nos eaux usées par d'autres secteurs d'activité, ce qui est le propre de la REUT. Les ministères, réglementairement, permettent ces réutilisations. Maintenant, il faut qu'on passe à la phase concrète et qu'on travaille dur pour obtenir des cas concrets de réutilisation.

3. REUT : réutilisation des eaux usées traitées.

Actions concrètes de réduction des prélèvements d'eau industriels

D'après la conférence de Patrick Renck, responsable Environnement Alsachimie et membre du comité de bassin de l'agence de l'eau Rhin-Meuse.

1 Présentation d'Alsachimie

Alsachimie est une très jeune entreprise puisqu'elle a été créée en 2020 lorsque Solvay a vendu son activité polyamide¹ à deux actionnaires : BASF et DOMO. Le site va bientôt fêter ses 70 ans. Quelques chiffres clés sont indiqués sur la [figure 1](#).

Alsachimie gère la plateforme chimique WEurope sur laquelle elle est implantée avec six autres industriels. C'est le premier site européen de production d'intermédiaires polyamides 6-6². Il est situé au bord du canal d'Alsace, à l'est de Mulhouse, sur la plus grande nappe phréatique d'Europe.

1. Polyamide : polymère construit à partir de molécules possédant une fonction chimique amide en chaîne.

2. Polyamide 6-6 : polyamide résultant de la polymérisation de molécules possédant 6 atomes de carbone.



Figure 1

Chiffres clés de l'entreprise Alsachimie.

2 Problématiques de la ressource eau

2.1. Contexte actuel et perspectives

Parmi les quelques chiffres de la **figure 2**, celui qui nous intéresse est celui des prélèvements en eau. Sur des années de production à pleine capacité, la plateforme représente à peu près 170 millions de mètres cubes de prélèvement d'eau par an, dévolus en grande partie au refroidissement de procédés, ce qui représente, en termes de débit, l'équivalent du remplissage d'une piscine olympique en dix minutes. 95 % de cette eau est rejetée au milieu naturel, à savoir le Grand Canal d'Alsace.

Dans le cadre du plan eau du gouvernement 2023, des engagements très forts ont été pris par Alsachimie qui fait

partie du top 50 des préleveurs industriels d'eau en France. L'entreprise s'est engagée à réduire les prélèvements de 15 % en 2030 par rapport à l'année de référence 2019.

2.2. Types d'actions menées

Rentrons concrètement dans les actions qui sont en cours ou qui ont été réalisées sur Alsachimie. Les actions de réduction des prélèvements d'eau sont menées sur 3 axes :

- 1) un axe très technique en agissant directement sur les procédés de fabrication ;
- 2) un axe comportemental qui concerne l'ensemble du personnel de l'entreprise ;
- 3) un axe organisationnel, appelé souvent le « management³ » de la performance.

3. Management : gestion des ressources industrielles ou humaines.



Figure 2

Chiffres de la consommation d'Alsachimie.

La première action concerne les éventuelles fuites d'eau sur les réseaux. La plateforme d'Alsachimie est très peu concernée par cette problématique, mais c'est un point qu'il faut évidemment considérer lorsque l'on s'attaque à la sobriété hydrique. Globalement, en France, on évalue les fuites sur les réseaux à environ 20 %, en particulier sur les sites industriels très anciens. Deux méthodes d'investigation sont possibles : soit on va aller chercher les fuites avec toutes les techniques existantes ; soit on fait une balance entre l'eau prélevée en entrée et l'eau rejetée en sortie, afin de vérifier la cohérence des données.

Sur un site industriel avec des réseaux nombreux et très complexes ainsi qu'une multitude de consommateurs, il est primordial d'établir un **schéma de flux**. Dans le cas

d'Alsachimie (**Figure 3**), une aide d'un prestataire spécialisé dans le domaine a été nécessaire.

Une autre action consiste à établir une **comptabilité eau** la plus précise possible. Les prélèvements et les rejets sont très bien mesurés mais, entre les deux, les consommations de chaque utilisateur, voire de chaque équipement, ne sont pas forcément connues avec une bonne précision. Ce travail est encore en cours sur la plateforme et l'ambition à court terme est d'avoir une comptabilité « en direct », c'est-à-dire fournissant à tout moment les consommations ou prélèvements de tous les acteurs de la plateforme, voire de chaque équipement sur les unités de production.

L'étude préliminaire permettant d'établir le schéma de flux a également permis

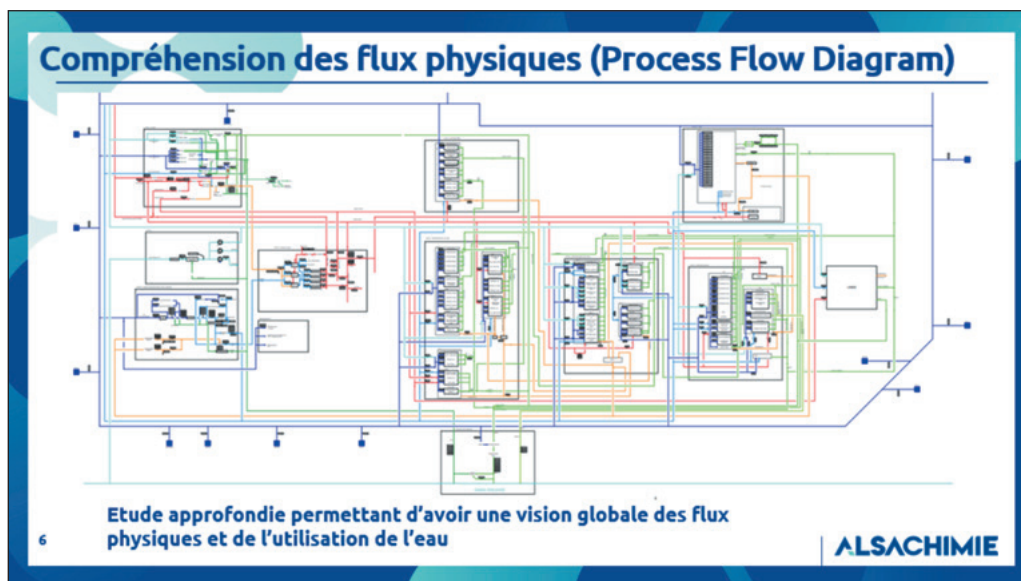


Figure 3

Exemple de Process Flow Diagram⁴.

de réaliser une **hiérarchisation des utilisations**, ce qui permet de cibler les actions sur les consommateurs les plus importants. Cette hiérarchisation a été réalisée sur les 25 principaux équipements consommateurs sur Alsachimie, qui représentaient à eux seuls 80 % des consommations de l'entreprise.

Pour rappel, la chimie, science de la transformation de la matière, consomme beaucoup d'énergie : montées en température et en pression pour effectuer des distillations, refroidissement des fluides au moyen d'échangeurs de chaleur, etc. Un groupe de travail dédié a été créé avec des opérateurs afin d'étudier les améliorations possibles sur le pilotage et la performance des équipements, voire les

modifications sur les procédés pour réutiliser l'eau. Plusieurs projets sont en cours ou déjà terminés sur Alsachimie.

Les moyens de mesure sont également très importants : certaines consommations internes n'étaient pas mesurées et nécessitaient de mettre en place des compteurs ou, au minimum, de vérifier si les compteurs existants étaient justes.

Concernant la partie réutilisation de l'eau, il y a ici ([Figure 4](#)) une fiche projet qui montre comment cela s'articule :

Sur la modification des procédés, Alsachimie travaille sur des projets à long terme. Un certain nombre d'investissements sont prévus à l'horizon 2030 pour plusieurs millions d'euros.

Enfin, des actions managériales ont été menées

4. Process Flow : flux du procédé.

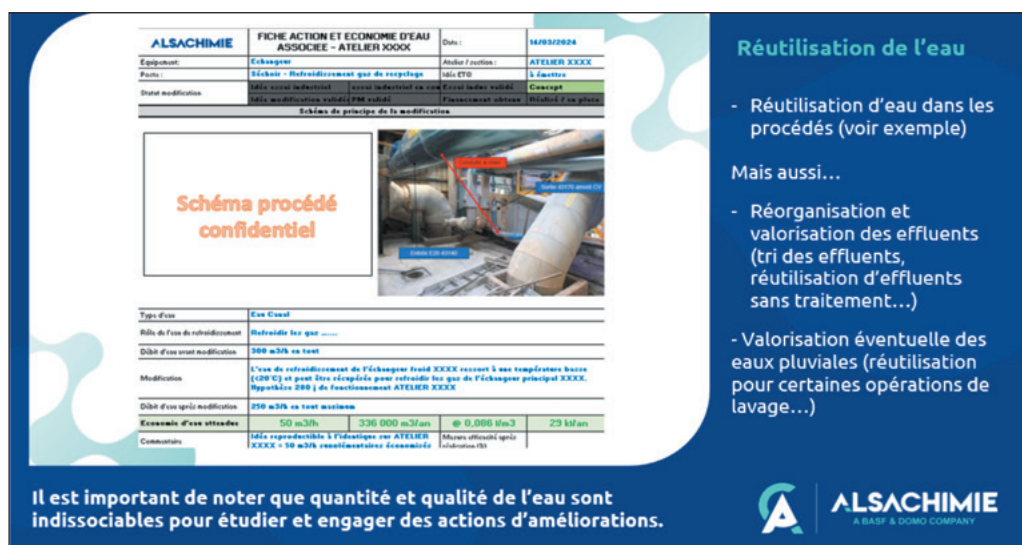


Figure 4

Exemple de fiche projet sur les équipements industriels.

consistant à sensibiliser l'ensemble du personnel aux économies d'eau, et cette thématique a été intégrée dans les habilitations des opérateurs

de production. Il est crucial d'impliquer l'ensemble des collaborateurs de l'entreprise sur la sobriété hydrique.

Conclusion

La sobriété hydrique est prise en compte depuis plusieurs années par l'industrie, et notamment l'industrie chimique, qui a besoin de grandes quantités d'énergie et d'eau pour ses procédés.

Mon dernier message est à destination des nombreux étudiants présents aujourd'hui et qui sont, pour la plupart d'entre eux, en passe de choisir leur voie professionnelle. Rejoignez l'industrie, et plus particulièrement la chimie, qui offre des perspectives enrichissantes avec des métiers très variés et passionnants.

Réutilisation des eaux industrielles dans l'industrie agroalimentaire

Fabrice Leteneur et Jérôme Montagnier

Fabrice Leteneur est président du Syprodeau, un syndicat sectoriel français qui représente des sociétés fabriquant des solutions pour le traitement de l'eau en France. Ce syndicat est également membre de l'UIE (Union des industries et entreprises de l'eau), qui rassemble huit syndicats.

Fabrice Leteneur est également le dirigeant de la société néEAU.

Jérôme Montagnier est membre du Syprodeau et Directeur général de DR. KUEKE France.

1 Enjeux et solutions pour une gestion durable de l'eau dans l'industrie agroalimentaire

1.1. 2022, une année charnière pour la gestion de l'eau en France

L'UIE¹, ce sont 200 sociétés adhérentes, 15 000 collabora-

teurs, et un chiffre d'affaires de 4 milliards d'euros. Au départ, nous envisagions de parler uniquement de l'industrie laitière, mais nous avons décidé d'élargir à l'industrie agroalimentaire², car elle rencontre des problématiques similaires concernant l'eau.

1. UIE : Union des industries et entreprises de l'eau.

2. Industrie produisant des aliments à partir de matières agricoles.

Dans l'utilisation de l'eau, chaque goutte compte. Cela va être notre leitmotiv³ !

L'année charnière a été 2022 (**Figure 1**). Au cours de cette année, des mesures de limitation des prélèvements ont été prises pour 1338 zones de gestion des cours d'eau, soit 97 % des territoires métropolitains concernés, comme le montre cette carte du ministère. À titre de comparaison, c'était 25 % en 2021 et 75 % en 2019. L'année 2022 a déclenché une politique de sobriété⁴ (**Figure 2**) des industriels et même au-delà, car l'eau concerne tout le monde.

Sans eau, rien n'est produit. Il est important d'en prendre

3. Phrase, formule qui revient à plusieurs reprises.
4. Réduction des consommations pour préserver une ressource.

conscience. Selon des chiffres de source sûre, 43 % de la population mondiale pourrait connaître des pénuries d'ici à 2025. Certes, il y aura des inégalités, géographiques et politiques, mais il y a, globalement, une forte menace de pénurie. En 2030, 56 % du déficit en eau douce à usage professionnel est prévu. Enfin, quand les entreprises en France sont interrogées, 38 % déclarent que l'eau est un sujet stratégique.

Il y a une demande forte du secteur agroalimentaire (**Figure 3**), notamment laitier, de promouvoir la sobriété en eau. Une mobilisation est indispensable dans ce secteur. Les industriels, bien entendu, mais aussi les représentations professionnelles comme Syprodeau et l'Union des industries et entreprises

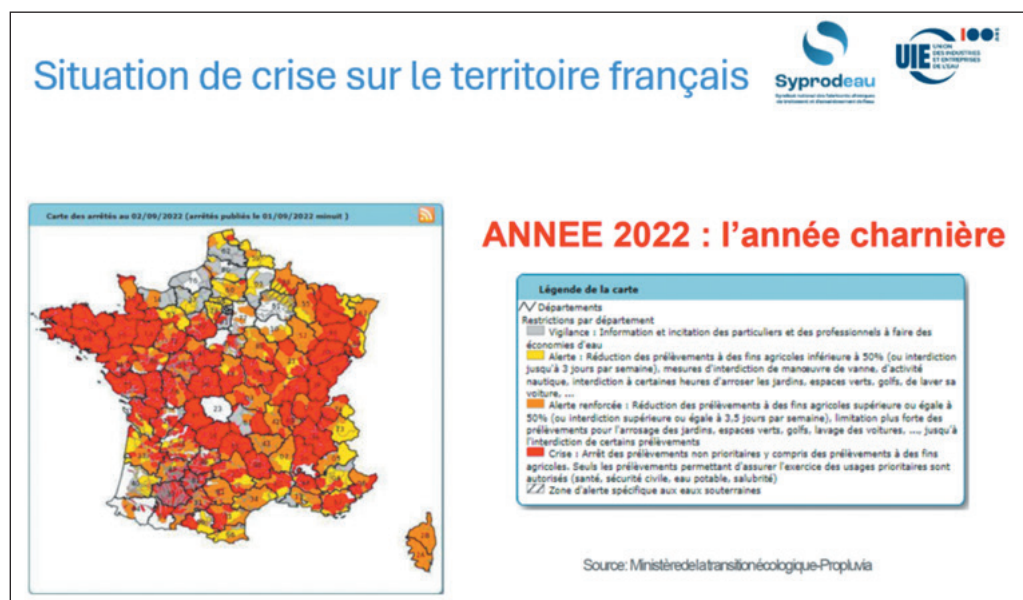


Figure 1

Cartographie des arrêts de prélèvements d'eau à des fins agricoles en 2022.

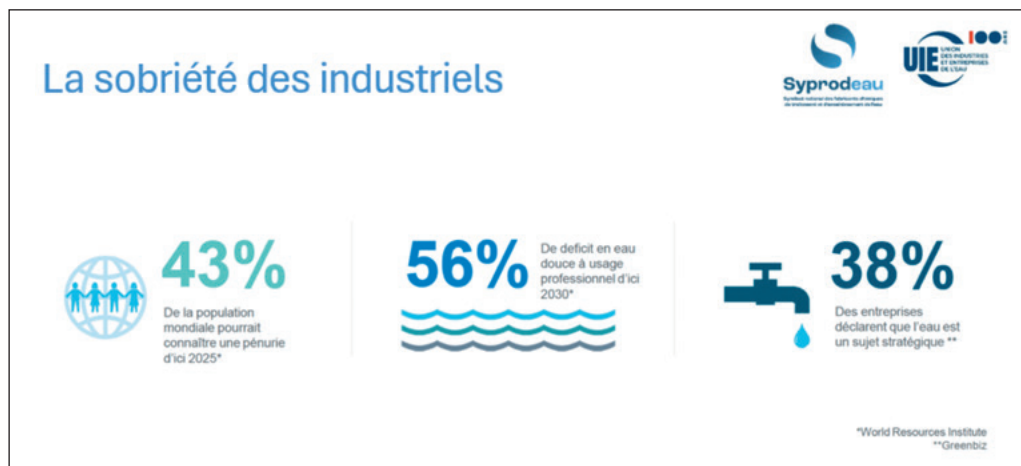


Figure 2

Chiffres clés sur la sobriété industrielle en eau.

de l'eau ont poussé pour une évolution des réglementations sur l'utilisation des eaux non conventionnelles⁵.

En France, en Bretagne, si nous prenons 28 sites agroalimentaires bretons, 2,5 millions de mètres cubes d'eau par an pourraient être économisés, soit 800 piscines olympiques. Et sur les matières laitières, ce serait une économie de plus de 11 millions de mètres cubes par an. Pour prendre l'exemple d'une usine qui produit du lait en Chine, ce sont 16 500 tonnes d'eau par mois qui sont économisées et qui évitent les prélèvements de 500 000 litres d'eau par jour.

1.2. Réduire, réutiliser, recycler : vers une gestion responsable de l'eau dans l'industrie

Pour résumer, nous parlons du fameux « triptyque des objectifs » :

Réduire les prélèvements, les consommations d'eau et, pour



Figure 3

Chiffres sur l'importante demande en eau dans le secteur agroalimentaire.

5. Eaux qui ne proviennent pas directement des sources naturelles classiques, comme les eaux recyclées.

cela, faire évoluer nos procédés. **Réutiliser** dans des équipements, dans des processus de nettoyage.

Enfin, **recycler** après traitement. L'objectif de 100 % est indiqué sur la **figure 4** et, bien entendu,

on en est loin. Mais si tout était mis en œuvre pour réduire, réutiliser et recycler, nos consommations d'eau pourraient diminuer de manière drastique.

Heureusement, il existe un plan eau (**Figure 5**), décrit ailleurs (voir le chapitre d'Agathe Euzen), par la déclinaison des réglementations. Il nous sert de guide pour travailler sur la réutilisation des eaux usées dans les industries.

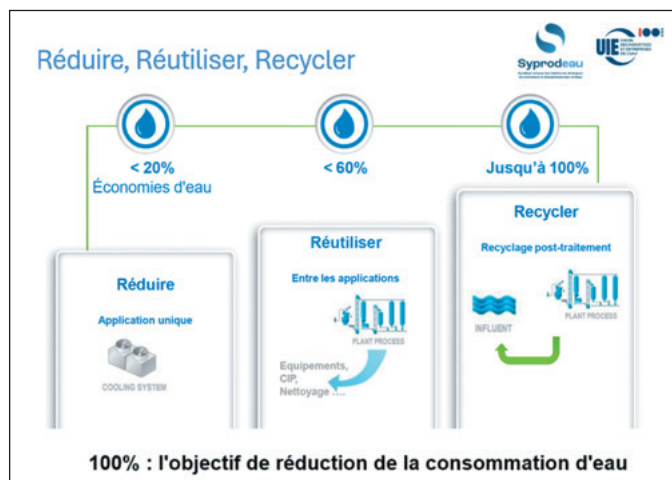


Figure 4

Les objectifs de réduction de la consommation d'eau.

2 Valorisation des eaux dans l'industrie agroalimentaire : défis, innovations et opportunités

2.1. Typologies et usages des eaux dans l'industrie agroalimentaire

Dans les industries agroalimentaires (**Figure 6**), différé-

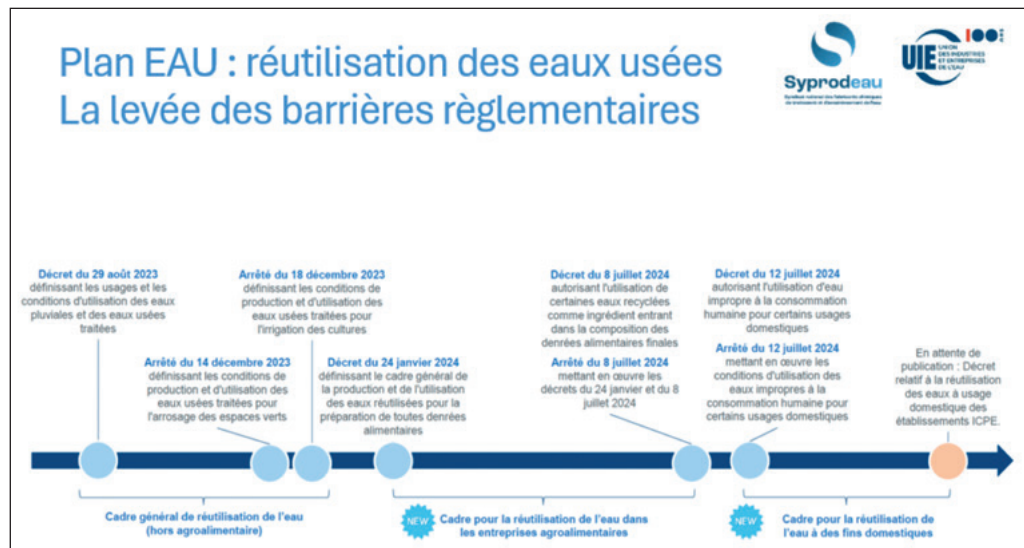


Figure 5

Chronologie du plan eau.

Les types d'eau dans les industries agro-alimentaires  	
Eaux issues de matières premières	Eaux qui étaient à l'origine un constituant d'une matière première alimentaire et qui en ont été extraites au cours du processus de transformation par une entreprise du secteur alimentaire, pour être ensuite utilisées, avec ou sans traitement complémentaire, au cours des opérations de préparation, de transformation et de conservation des aliments.
Eaux de processus recyclées	Eaux qui ont été utilisées au cours des opérations de préparation, de transformation et de conservation des aliments et qui sont collectées pour être réutilisées, avec ou sans traitement complémentaire.
Eaux usées traitées recyclées	Eaux usées générées par une entreprise du secteur alimentaire ayant fait l'objet, après un premier traitement dans une station de traitement des eaux usées, d'un traitement complémentaire par une unité de traitement en vue de leur utilisation.
Eaux usées	Ensemble des eaux résiduaires et autres rejets liquides générés par une entreprise du secteur alimentaire. Elles sont notamment constituées des eaux utilisées lors des opérations de préparation, de transformation et de conservation de toutes denrées et marchandises destinées à l'alimentation humaine, y compris pour le nettoyage des locaux, installations et équipements, ainsi que des eaux pluviales et des eaux-vannes de l'entreprise lorsque cette dernière n'est pas raccordée au réseau public de collecte des eaux usées.
Eaux brutes	Eaux acheminées vers une unité de traitement en vue de faire l'objet d'un traitement complémentaire, après un premier traitement par une station de traitement des eaux usées. Impropres à la consommation humaine en raison de la présence de contaminants.

Figure 6

Les différents types d'eaux dans l'industrie agroalimentaire.

rentes qualités et différents types d'eau sont rencontrés : les eaux issues des matières premières (voir plus loin), les eaux de processus recyclées, toutes les eaux usées traitées et recyclées, et les eaux brutes.

Les eaux issues des matières premières (Figure 7), du lait par exemple, on les appelle les «eaux de vache». Le lait est composé à 90 % d'eau ; pour les racines de la betterave, c'est 77 %. Ces eaux issues des matières premières sont autorisées pour différents types d'usages : préparer des denrées et marchandises, les transformer et les conserver, pour tout ce qui est nettoyage des locaux et des équipements, et tout ce qui concerne la fabrication des aliments en eux-mêmes. Pour cela, une déclaration en préfecture et

une procédure HACCP⁶ sont nécessaires.

Ensuite, nous avons les eaux issues de processus recyclées (Figure 8). Cela peut être le lavage des légumes, par exemple. Pour celles-ci, c'est le même principe que pour les premières. Il s'agit de tout ce qui concerne les usages, la préparation de denrées, la transformation de denrées, la conservation, le nettoyage et la fabrication. Une déclaration en préfecture et une procédure HACCP pour le client sont aussi nécessaires.

Enfin, on a affaire à tout ce qui est eaux traitées et recyclées (Figure 9). C'est différent. Nous avons encore besoin des autorisations réglementaires pour utiliser ces eaux pour

6. Hygiène et contrôle des points critiques : méthode pour assurer la sécurité des aliments.

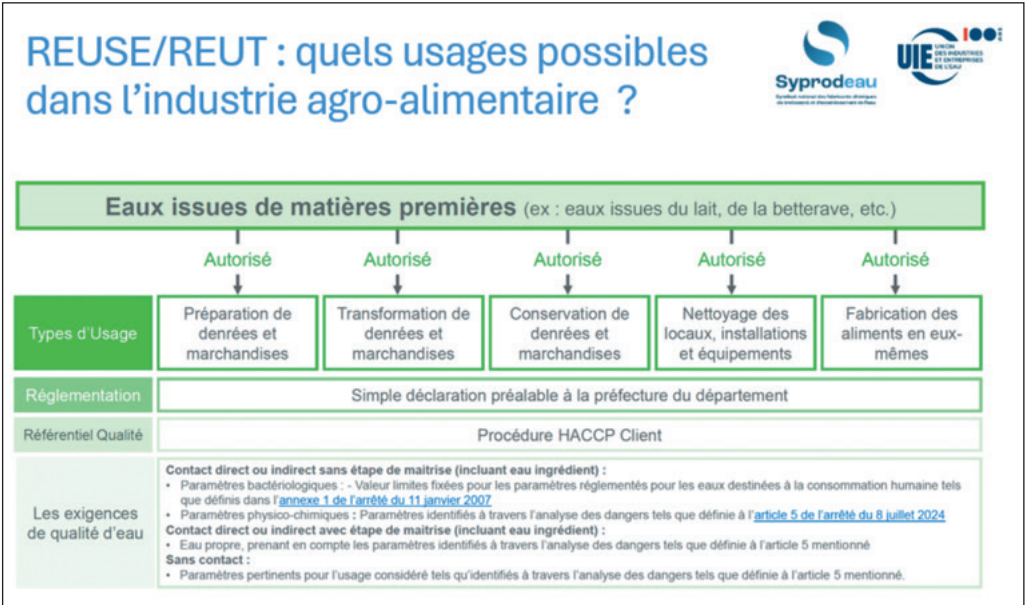


Figure 7

Tableau des usages des eaux issues de matières premières.

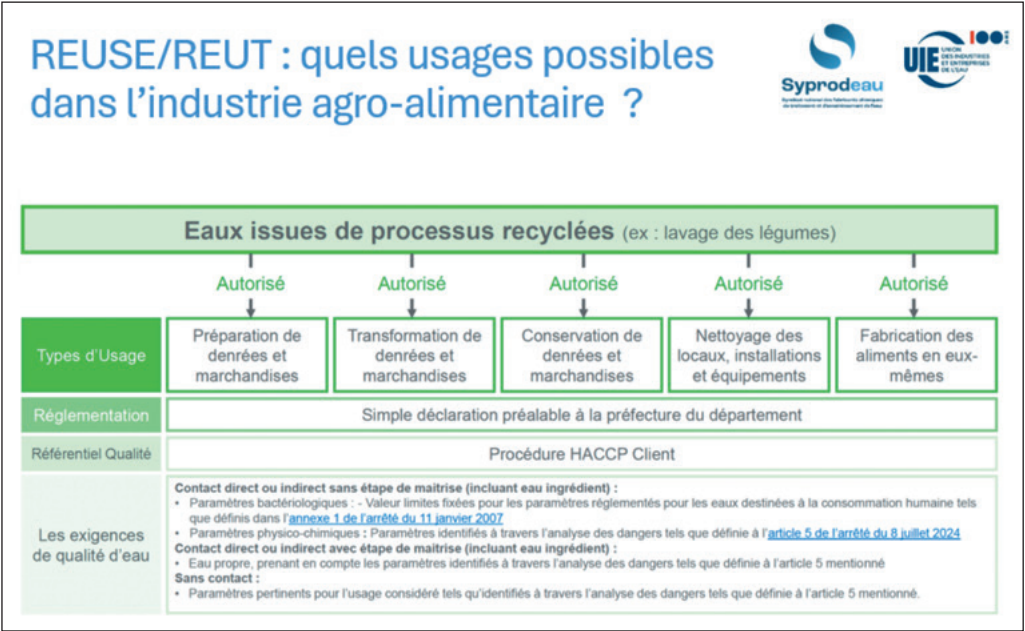


Figure 8

Tableau des usages des eaux issues de processus recyclées.

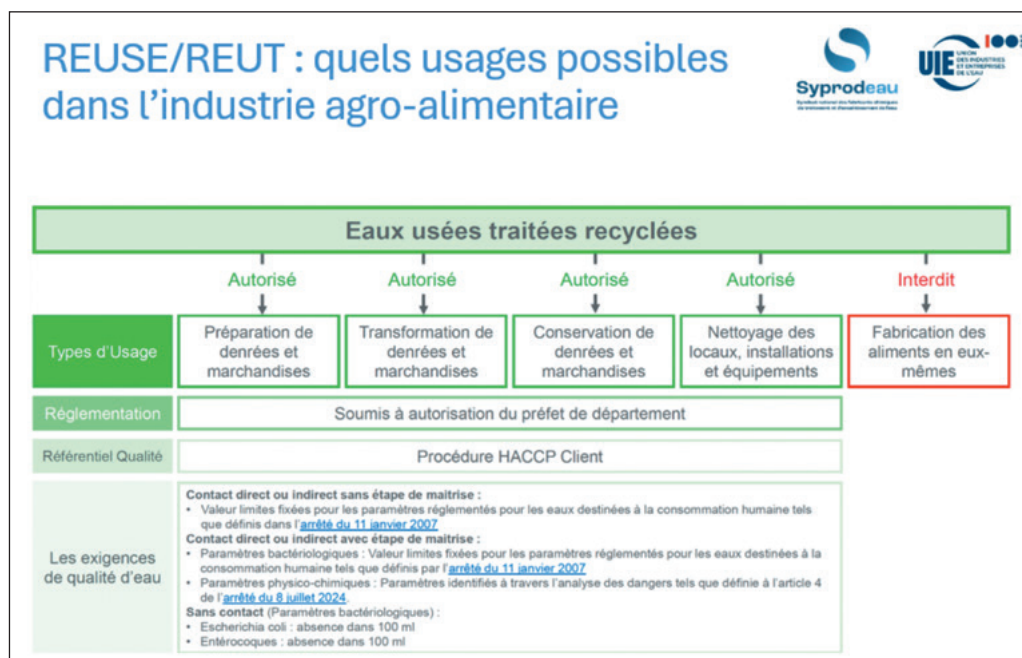


Figure 9

Tableau des usages des eaux usées traitées et recyclées.

la préparation des denrées, la transformation, la conservation, et tout ce qui est nettoyage. Par contre, ces eaux sont interdites pour fabriquer les aliments eux-mêmes, en tant qu'«eau ingrédient». Leur utilisation est toujours soumise à l'autorisation du préfet, avec une procédure HACCP. En termes d'exigences de qualité d'eau, rentrent naturellement en compte *E. coli* et entérocoques⁷...

Tous les autres types d'eau sont interdits pour l'utilisation dans le domaine agro-alimentaire. Il s'agit de toutes les eaux impliquées dans les opérations de réutilisation. Si l'on veut détailler (voir

Figure 10), il va s'agir des eaux usées issues du lavage des locaux susceptibles d'avoir été en contact avec du matériel à risque, de tout ce qui est eaux usées issues de l'installation d'un traitement, de tout ce qui sort des stations de traitement d'eaux usées, de tout ce qui est également eaux présentant une concentration importante en produits chimiques, de tout ce qui va être toxique dans l'eau, et également de tout ce qui est saumures⁸ et concentrats qui peuvent être délivrés par des adoucisseurs d'eau.

Il y a encore beaucoup de travail à accomplir dans le

7. Types de bactéries indicatrices de pollution dans l'eau.

8. Solutions très salées issues d'un processus industriel (adoucissement de l'eau, par exemple).

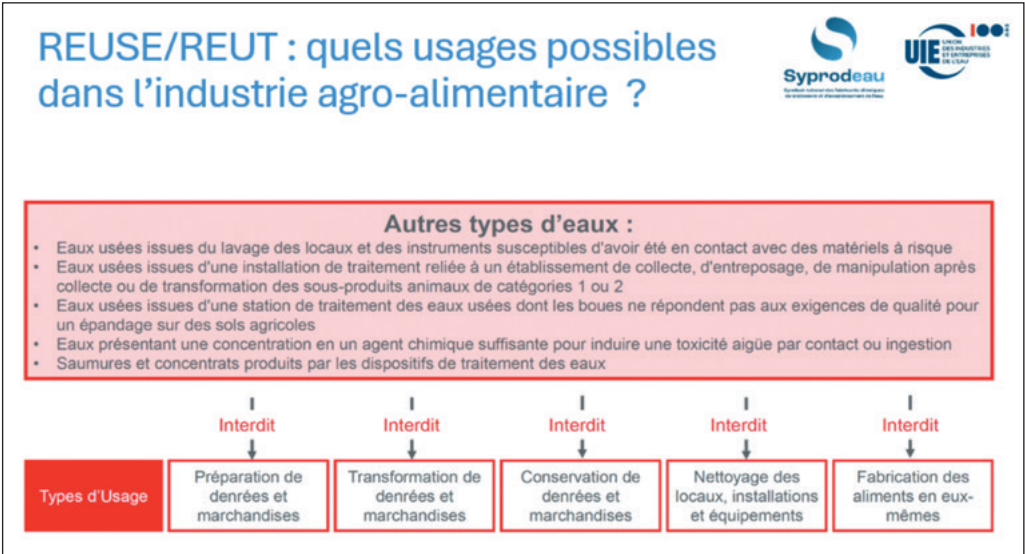


Figure 10

Tableau des usages des autres types d'eaux.

domaine de la réutilisation de l'eau, mais de premiers résultats émergent et ils sont très prometteurs.

2.2. Innovations et enjeux économiques dans la réutilisation de l'eau

Dans le développement des nouveaux projets, il y a des

freins économiques forts (Figure 11). Globalement, le coût de l'eau est minime pour un industriel, vu son investissement, et l'industrie utilise aussi beaucoup d'eau de forage⁹, qui a encore un coût minime alors que l'eau recyclée a un coût beaucoup plus élevé. Il n'y a pas de règle absolue : par exemple, si on fait un traitement membranaire¹⁰, l'investissement peut être relativement faible (300 000 à 800 000 euros), mais il reste fort sur des installations dimensionnées pour recycler 200 à 500 mètres cubes d'eau par jour.

Aujourd'hui, recycler avec les technologies disponibles est rarement compétitif. Avec le Syprodeau et l'UIE, on veut

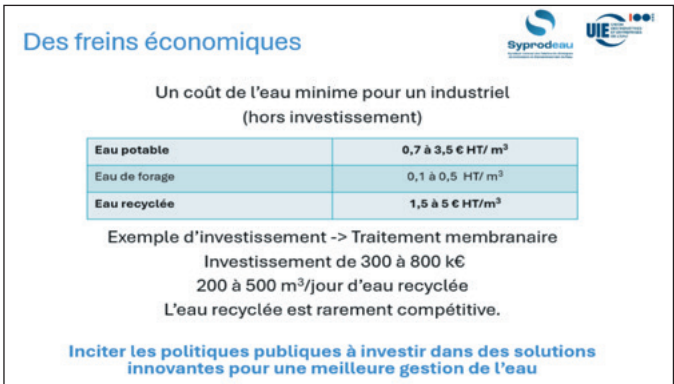


Figure 11

Tableau des différents freins économiques.

9. Eau extraite du sol via des puits ou des trous creusés.

10. Technique de filtration de l'eau à travers des membranes spéciales.

inciter les politiques publiques à investir dans des solutions innovantes pour une meilleure gestion de l'eau.

Avec l'UIE, nous avons lancé un prix innovation, le **prix Innovation des eaux non conventionnelles** (Figure 12), pour les 100 ans de l'UIE. Il est destiné aux start-up qui proposent une solution innovante permettant de valoriser ce type d'eau.

Il manque de l'investissement dans l'industrie, mais aussi sur les réseaux de distribution de l'eau. Il manque environ 4,6 milliards d'euros par an pour les réseaux d'eau potable en France. En France, l'eau coûte en moyenne 3,5 euros par mètre cube. Dans l'un de nos pays voisins, le prix est



Figure 12

Présentation du prix Innovation.

d'environ 1 € de plus qu'en France... de quoi investir durablement si un prix de 4,5 €/m³ était envisagé.

Conclusion

On peut naïvement penser que l'eau et son exploitation, c'est le domaine technique le plus ancien qui soit ! C'est tellement classique qu'il n'y a plus là de place pour l'innovation ! « Tout va bien », occupons-nous plutôt de fluides importants, comme les combustibles.

Hélas, nous prenons aujourd'hui conscience que la pénurie menace. L'eau est devenue une question critique pour l'humanité. Elle mobilise les imaginations, les craintes et les efforts de toutes natures pour épargner la malédiction, pour continuer à en bénéficier. Car elle menace de nous faire défaut.