

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



edp sciences

Fondation de la Maison de la Chimie

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.



9 782759 838103

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

edp sciences

Fondation de la Maison de la Chimie

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 1er 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 adjointe 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

Paul Rigny

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

Danièle Olivier

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 6e 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

Danièle Olivier

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