



Focus / **L'eau**

Focus / L'eau



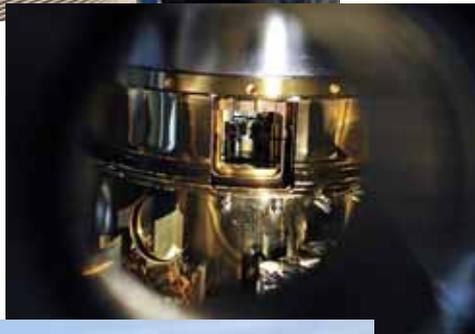
page 05
ÉDITO



page 06
EN IMAGES



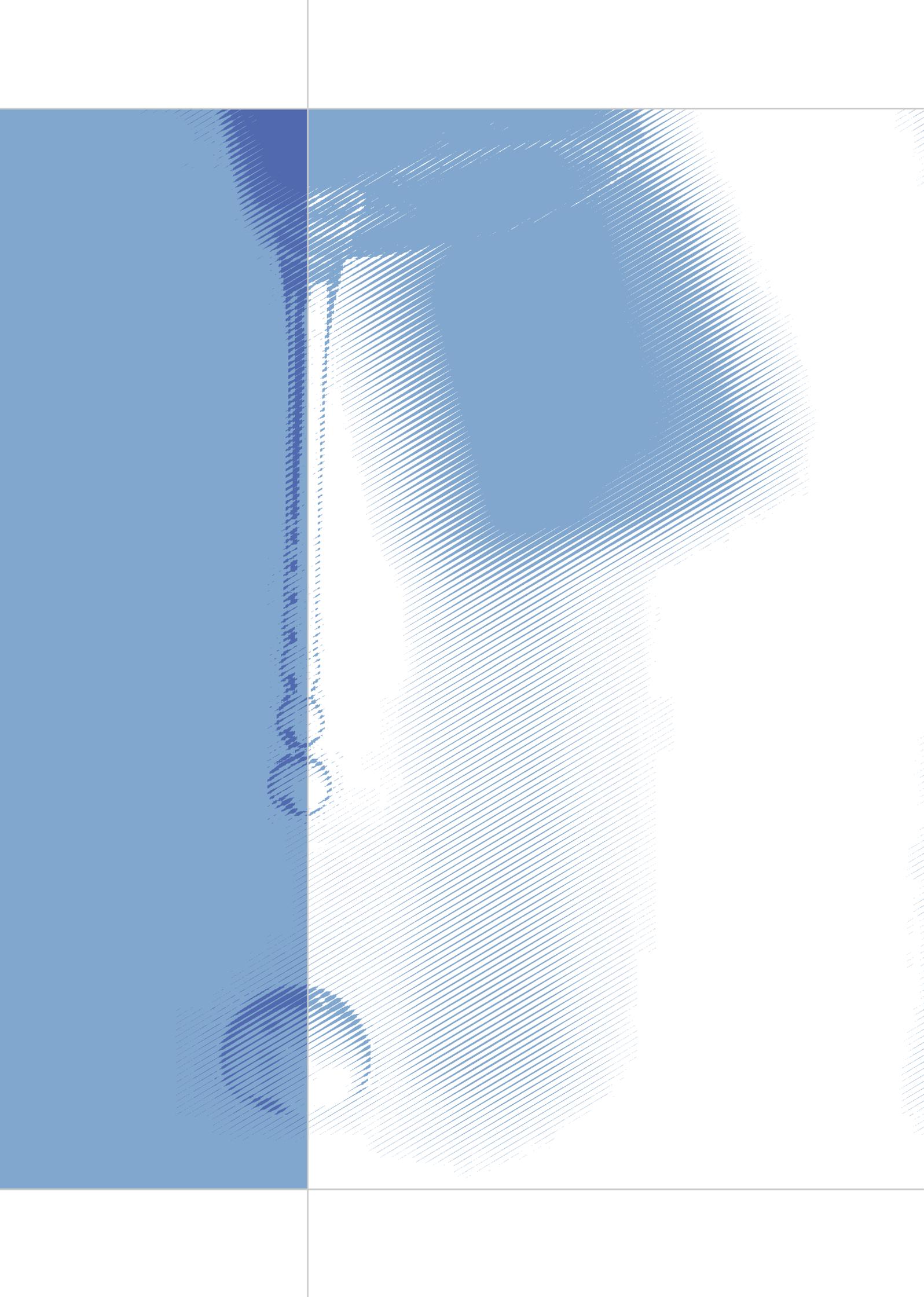
page 12
L'EAU DONT L'HUMAIN
USE ET ABUSE



page 24
L'EAU DANS
TOUS SES ÉTATS



page 32
L'EAU OU LE CUMUL
DES FONCTIONS



Dans l'imaginaire et dans la symbolique des humains, l'eau est omniprésente. L'eau est source de vie. L'eau est également source de drames et de conflits à cause de sa répartition hétérogène dans l'espace et le temps ; les recherches en philosophie et en histoire nous aident à le comprendre.

L'eau, sans laquelle aucune vie sur Terre n'est possible, est un objet physique et chimique complexe qui possède encore de nombreuses inconnues.

Voilà pourquoi la France dispose de laboratoires travaillant sur l'eau dont bon nombre sont soutenus par le CNRS qui dans sa pluridisciplinarité s'intéresse à tous les aspects de l'eau. Le challenge est de comprendre la complexité de l'eau et de ses interactions avec l'ensemble des processus qui intéressent la planète et les humains. L'environnement des humains dépend de l'eau et l'eau dépend de la dynamique environnementale globale et locale. De ce fait en recherche, comme chez les décideurs, eau et environnement sont très souvent associés.

Le principe « tous les humains usant de l'eau sans en abuser » doit être un objectif majeur du développement durable mondial. L'usage de l'eau dépasse aussi les usages courants pour l'agriculture, les animaux et les humains. Par exemple elle joue un rôle de premier plan dans les démarches de chimie verte. Au sein du programme Chimie pour le développement durable du CNRS il existe un réseau de recherche intitulé : « Optimiser des procédés et milieux de synthèse respectueux de l'environnement : pour une nouvelle alliance entre chimie et ingénierie ». Ce travail permet d'éviter les solvants organiques.

L'eau est le solvant vert par excellence, mais n'oublions pas qu'elle peut être également un vecteur redoutable des pollutions chimiques. Il convient alors d'être capable de détecter et d'identifier les contaminants et d'en comprendre leur évolution dans le temps et l'espace. La chimie analytique joue alors un grand rôle et voit ses performances pour la détermination des traces croître de façon spectaculaire. La relation environnement-santé est très souvent une relation directe ou indirecte eau-santé.

La bonne gestion de l'eau n'échappe pas à l'immense besoin de connaissances identifiées pour la mise en œuvre des stratégies de développement durable. Le CNRS s'est associé au Cemagref, au ministère de l'Écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire ainsi qu'au ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec pour un programme Eau et territoires. Ce programme a pour objectif « d'éclairer les politiques actuelles ou à venir portées par les acteurs publics responsables de la gestion des territoires et de la gestion de l'eau en dépassant les politiques sectorielles et en proposant des approches et des modes de gestion transversaux ». La complexité de la question abordée nécessite une approche systémique dans le cadre d'une interdisciplinarité entre écologie, sciences de l'Univers, sciences de la vie et sciences économiques et sociales. Au-delà des problématiques immédiates, il convient également de développer des visions de long terme afin d'anticiper l'émergence de nouveaux problèmes dans les décennies à venir et définir les seuils de ruptures dans un contexte de changement global. ■

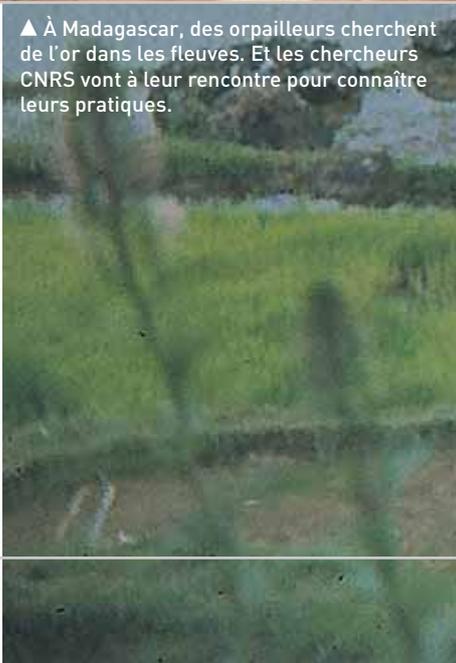
Françoise Gaill
Directeur scientifique
Institut Écologie et environnement

06

L'EAU EN IMAGES



▲ À Madagascar, des orpailleurs cherchent de l'or dans les fleuves. Et les chercheurs CNRS vont à leur rencontre pour connaître leurs pratiques.



▲ L'eau est essentielle aux cultures que l'humain doit adapter aux paysages. Au premier plan on aperçoit des pépinières au milieu de rizières en terrasses. Malgré les transformations affectant la

population étudiée en Indonésie depuis 1971 par des équipes notamment du CNRS, la riziculture reste au centre des préoccupations des habitants car le riz en est l'aliment de base.



▲ Grâce à d'ingénieux dispositifs comme ce laser mobile, il est possible de mesurer les polluants de l'atmosphère voire de contrôler la foudre.



◀ Portage sur le bassin du Loven Est, glaciers situés dans la partie Nord-Ouest de l'archipel du Spitzberg. Ce site est un cas d'école pour qui veut étudier les dynamiques hydrologiques des glaciers, ce que font des équipes CNRS.

© CNRS Photothèque / Jeannine Koubi - CNRS Photothèque / Stefano Salmi - CNRS Photothèque / Université Jean Moulin Lyon 3 / Alexis Gratia - © CNRS Photothèque / Marieleine Grisslin



▲ L'eau vient se nicher partout comme dans ce lac acide du volcan Poas au Costa Rica. Un type de lac rare s'il en est, que magmatologues et vulcanologues connaissent bien.



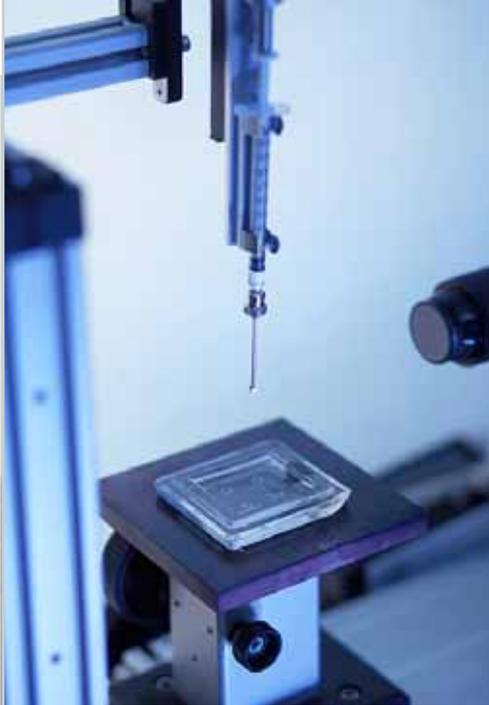
▲ Au Spitzberg, le glacier du Conway (au fond) termine sa course dans le kongsfjorden et livre des icebergs en vèlant. Le réchauffement climatique fait reculer ce glacier très surveillé par le CNRS.

► Grâce à cette expérience d'ozonation catalytique, il est désormais possible de dégrader des polluants en solution aqueuse.
→ VOIR P. 19 *L'eau dont l'humain use et abuse, De la source aux usines*



◀ Et même sous terre, l'eau continue à s'écouler et les hydrogéologues à aller l'explorer.

© CNRS Photothèque / Marie-Françoise André - CNRS Photothèque / Franck Domadieu - CNRS Photothèque / Christophe Lebedinsky - CNRS Photothèque / Michal Bakalovic



◀ Ce tensiomètre permet d'identifier le meilleur composé à utiliser dans les crèmes de beauté afin de disperser des corps gras dans l'eau. Au CNRS, des spécialistes utilisent cet outil qui permet effectivement d'étudier les tensioactifs, composés indispensables aux produits d'hygiène et de cosmétologie.



▲ Beaucoup de recherches sont menées sur l'eau de mer qui représente 97 % des eaux présentes sur Terre. Comme ici l'étude de l'extension de prairies d'algues.



▲ Ces tubes colorés permettent de reconstituer, en un lieu donné, la trajectoire et l'histoire d'une masse d'eau.



© CNRS Photothèque / Roland Graille - Chaitin - CNRS Photothèque / Alexis Chetiere - CNRS Photothèque / Anais Marshall

▲ Aussi inimaginable que cela puisse paraître, l'humain cultive la terre en des endroits bien inhospitaliers.

Ici on peut voir la production d'asperges dans un désert côtier du Pérou.
→ VOIR P. 17 De la ressource aux cultures et à l'élevage

12

L'EAU DONT L'HUMAIN USE ET ABUSE

L'EAU SEMBLE PARTOUT, FACILEMENT ACCESSIBLE PARCE QU'INDISPENSABLE. L'EAU COULE DE NOS ROBINETS POUR NOUS PRIVILÉGIÉS OCCIDENTAUX DU 21^e SIÈCLE. IL EN EST BIEN DIFFÉREMMENT À TRAVERS LES TEMPS ET LES LIEUX. DE L'EAU VIVÉ QUE L'HUMAIN COMMENCE PAR CHERCHER JUSQU'À L'EAU CANALISÉE QUE L'HUMAIN TENTE DE MAÎTRISER... TOUT UN MONDE ET DES GÉNÉRATIONS SE SONT ÉGRAINÉS. POUR LE PIRE ET LE MEILLEUR DE L'HUMANITÉ ? POUR LE MEILLEUR ET LE PIRE DE L'EAU ?

■ L'EAU ENTRE LES MAINS DE L'HUMAIN

La formalisation de la composition de l'eau, initiée en 1781 par Cavendish, complétée successivement par Lavoisier, Laplace, Meusnier, Carlisle, Nicholson, Gay-Lussac, Humboldt a été parachevée soixante ans plus tard par Dumas avec la célèbre formule H_2O . L'avènement de cette formule marque le début d'une nouvelle aventure de la connaissance.

L'eau est depuis cette découverte éclatée en multiples champs spécialisés de la recherche. De moins en moins perçue comme naturelle, l'eau s'est progressivement imposée comme une question sociale placée à l'intersection de différentes disciplines. Et cela dans un contexte de mondialisation de la question de l'eau et de mobilisation croissante de l'opinion publique.

■ L'INTERACTION EAU/SOCIÉTÉ

L'eau contribue à l'instauration d'un rapport social fondamental. Quelque soit le milieu, la disponibilité et la qualité de l'eau douce ont un effet structurant sur la vie sociale : schémas de localisation des populations, regroupement des habitants dans des villages et des cités.

Réciproquement, la nature de la société a une influence déterminante sur la fonction et la valeur attribuées à l'eau. Historiquement dans toutes les civilisations –qu'elles soient avec ou sans État– l'organisation sociale se caractérise par un certain type d'accès à l'eau. Les techniques de l'eau nous parlent de la société et des humains qui les mettent en œuvre.

Chasseurs, cueilleurs, pêcheurs, dépendaient des ressources superficielles et des variations du climat et leurs installations, souvent temporaires, ne s'éloignaient jamais de l'eau. L'innovation dans la gestion de l'eau est contemporaine de l'apparition des sociétés agricoles. De multiples techniques de captation, de transport et de distribution de l'eau voient le jour : cultures en terrasses, canaux le long de fleuves méandres, puits et bassins pour retenir l'eau et contenir les inondations, tunnels pour



© CNRS Photothèque / Claude Delhayre



© CNRS Photothèque / Hervé Thiéry

▲ Ci-dessus, deux situations où l'eau n'est pas maîtrisée par l'humain.
En haut, bidonville dans la plaine d'inondation de la Yamuna à New Delhi.
En bas, crue de mousson au Népal.



© CNRS Photothèque / Hervé Thiéry

▲ Canaux d'irrigation à Tipón au Pérou. Sur ce site (12 km de Cuzco) douze terrasses sont irriguées par un système de canaux extrêmement soignés, un remarquable travail de génie hydraulique. On pense que certaines de ces fontaines servaient à des cérémonies du culte de l'eau et de ses divinités.

► L'immeuble Copan, d'Oscar Niemeyer à São Paulo, est aujourd'hui le plus grand immeuble du Brésil, avec 1 160 appartements, divisés en six blocs, 115 000 m², 5 000 habitants, 20 ascenseurs, et une consommation d'un million de litres d'eau par jour.

transporter l'eau en zones arides (Khanat en Iran, Karez en Chine, Khetara/Foggara au Maghreb). Encore aujourd'hui, le Nord tropical du Sri Lanka apparaît comme un paysage de réservoirs qui témoigne d'un dispositif d'eau élaboré impliquant la conjonction d'un pouvoir politique, d'une administration et de main d'œuvre.

La distribution de l'eau pour la consommation humaine implique en effet la mise en place de dispositifs de répartition, de réglementation et de contrôle. Les premières grandes cités qui voient le jour affichent toutes, dès l'origine, un rapport originel et spécifique avec l'eau. Citons entre autres exemples Mohenjo-Daro célèbre pour ses bains et ses équipements sanitaires, Angkor Wat qui est un exemple sophistiqué d'organisation de l'irrigation ou l'île-cité de Tenochtitlan (actuelle Mexico). Et plus proche de nous, les villes de l'Empire romain desservies par des réseaux d'aqueducs.

■ L'ÉMERGENCE DU MODÈLE DE RÉSEAU

La révolution industrielle au 19^e siècle figera les rapports complexes entre l'eau et la société, en imposant un modèle, celui du réseau technique. Dans un contexte de forte urbanisation cette mise en réseau de l'eau, va de pair avec celles de l'énergie, des transports et des communications : ces processus parallèles sont constitutifs de la modernité urbaine. Cette notion est indissociable des mouvements de réforme sociale et des préoccupations d'hygiène qui se font jour dans le gouvernement des villes.

Le nouveau modèle de fourniture de l'eau et d'assainissement s'inspire des principes de la production industrielle : l'exploitation d'une matière première (considérée comme étant gratuite et inépuisable), sa transformation puis sa distribution via un dispositif technico-commercial en vue d'aboutir à la diffusion d'un bien de grande consommation standardisé, l'eau potable. La gestion de ce système est soumise à des impératifs de productivité et de rentabilité.

Le réseau rassemble autour de lui une multiplicité d'acteurs –entreprises, banques, pouvoirs publics– et génère un corpus de principes et de règles juridiques destiné à assurer la continuité, l'égalité et l'adaptabilité du service.

Le bilan chiffré confirme cette analyse. Sur le total de la population mondiale (6,4 milliards d'habitants en 2004 dont environ la moitié est considérée urbaine), seulement 83 % ont accès à l'eau (dont 54 % via le réseau)



© CNRS Photothèque / Hervé Thiéry

Le réseau constitue un mode universel d'accès à l'eau dans les pays développés où il dessert 97 % de la population (OMS – Unicef 2006). À l'inverse dans les pays en développement l'accès à l'eau par le réseau ne couvre qu'une fraction minoritaire de la population (44 %) qui tend au demeurant à décroître en raison, notamment, de l'explosion démographique et urbaine.

Aujourd'hui en 2008, il apparaît que la mise en réseau n'a pas tenu, et de loin, ses promesses. Signe des temps, les Nations unies dans leurs *Objectifs de développement du millénaire* limitent leur ambition, en première approche, à l'horizon 2015, à la réduction de moitié du nombre de personnes n'ayant pas accès à une eau rendue potable (avec ou sans accès au réseau)⁽¹⁾. Les chiffres qui précèdent donnent la mesure du défi qui reste à relever. L'eau à usage humain –et majoritairement urbain– soulève une problématique complexe au terme de laquelle l'innovation qualitative (innovation, sécurité, régularité, pollution, égalité d'accès) prendra naturellement le pas sur la seule dimension quantitative. **G. S.-M.**

1. World Resources Institute (Washington) annual report in coll. With the World' Bank, 2007/2008.

► Filets de captation du brouillard à La Ventosa (Chili). Chaque filet fait 4 m de haut et 12 m de long. Le site est constitué de 10 collecteurs à une altitude de 800 m.

BROUILLARD ET ROSÉE, DES SOURCES D'EAU ALTERNATIVES

Aux sources d'eau classiques tels les lacs, sources et cours d'eau... s'ajoutent maintenant de nouvelles ressources... venant du ciel. Il s'agit des nuages ou brouillard, dont l'eau peut être captée naturellement par les arbres ou artificiellement (filets) sur des crêtes, comme au Chili. Les rendements journaliers peuvent varier entre 1 à 10 L/m². Mais ces nouvelles ressources comptent aussi la rosée. Si le brouillard est composé de gouttelettes d'eau liquide, la rosée quant à elle provient de la condensation passive de l'humidité atmosphérique sur des objets soumis au refroidissement radiatif nocturne.



©Photo FagQuest/Daniel Jizat

L'humidité de l'air – l'eau sous forme de vapeur – est une ressource très importante qui n'a été jusqu'ici que peu ou pas du tout exploitée. L'atmosphère contient en effet environ 13 000 km³ d'eau douce, dont 98 % sous forme de vapeur et 2 % comme eau condensée (nuages), un chiffre comparable aux ressources en eau liquide renouvelables sur les terres habitées. Pour condenser une eau de bonne qualité et potable, une surface peut être traitée par des peintures et revêtements spéciaux et ainsi optimisée pour permettre un refroidissement maximum et une bonne collecte des gouttelettes. Les recherches menées actuellement ont pour but d'augmenter le rendement en eau et concernent à la fois la création de nouveaux matériaux, moins chers à fabriquer, plus performants, plus durables et les plus écologiques possibles, et la conception de nouvelles formes architecturales.

Une association internationale a été créée avec pour objectif de coordonner ces recherches dans le monde (www.opur.u-bordeaux.fr). Des supports déjà existants peuvent être utilisés pour collecter l'eau (toits, comme dans l'île de Bisevo, en Croatie) ou de nouvelles structures, de véritables usines à rosée, comme à Satapar, en Inde du Nord-Ouest. Cette technique, est simple, robuste, et son fonctionnement n'est pas altéré par la dégradation partielle du support. Le rendement est faible (au maximum 0,8 L/m²) mais cette énergie de condensation qui entre en jeu est une énergie propre, renouvelable et surtout gratuite. Dans de nombreux endroits du globe, quand l'eau potable manque, cette nouvelle technologie a le potentiel de donner une réponse adaptée à une population en manque conjoncturel de ressource. **D.B.**

■ INGÉNIERIE DE POINTE AU SERVICE DE L'EAU POTABLE

En France, 63% de l'eau potable provient des eaux souterraines qui s'accumulent dans des réservoirs naturels⁽¹⁾. Les 37% restant proviennent des eaux de surface (rivières, lacs, fleuves). Le choix de la source de prélèvement pour la consommation, dépend des ressources locales, et porte en général sur les réservoirs les moins exposés aux contaminants afin de bénéficier d'une eau brute ayant la meilleure qualité possible.

Vers le tout membrane ? La première étape de la production d'eau potable est le pompage de l'eau brute dans une nappe souterraine (par des forages jusqu'à 700 m de profondeur) ou dans les fleuves et rivières, ressources superficielles. L'eau brute est acheminée ensuite vers une usine de production d'eau potable où elle subit plusieurs traitements adaptés à sa qualité initiale. L'eau est transportée par des conduites d'adduction (souterraines et sous pression) du captage au traitement.

D'une façon générale, les étapes pour rendre l'eau potable sont : le dégrillage⁽²⁾, le tamisage, la décantation, la filtration et enfin la désinfection. Selon sa qualité initiale, les procédés de traitement d'une eau brute sont classés en trois catégories combinant des procédés physiques et chimiques plus ou moins poussés.

À la sortie de l'usine de traitement, l'eau est distribuée aux usagers. Des réservoirs de stockage sont souvent prévus aux abords de l'usine de traitement. Après usage, les eaux sont recueillies pour être conduites vers les usines de dépollution (stations d'épuration). Dans la pratique, des normes de rejets sont fixées de manière à garantir les différents usages de l'eau (eaux à rendre potables, eaux de baignade...). Les premières stations d'épuration visaient à réduire principalement la pollution visible telle que les matières en suspension, ensuite la pollution organique a été prise en compte. Aujourd'hui, de plus en plus de stations d'épuration travaillent à éliminer le phosphore (provenant des engrais, des détergents et des poudres à laver) et l'azote (provenant des engrais et des urines). Tous deux jouent effectivement un rôle très important dans le métabolisme des cellules vivantes.

D'autre part, de nouveaux risques de contamination microbiologiques sont apparus récemment, mobilisant la communauté scientifique sur deux niveaux. Le premier est la mise au point de capteurs capables de détecter de nouveaux agents pathogènes et insensibles aux traitements de désinfection classiques. Le second a été de développer de nouveaux procédés de traitements. C'est dans cette optique, par exemple, que des techniques membranaires mises au point par les laboratoires du CNRS ont été développées. Elles constituent une barrière de protection efficace. Des projets nationaux, européens (réseau d'excellence Nanomempro) et internationaux (un programme de recherche en réseau avec la Chine et le programme Arcus, sur la ges-



© CNRS Photothèque / Jean-Georges Harmelin

▲ Macrodéchets en surface, à proximité du débouché en mer de l'émissaire d'une grande cité méditerranéenne (région marseillaise), après un orage. Les macrodéchets rejetés en mer ne sont que la partie la plus spectaculaire de la pollution résultant de l'urbanisation de plus en plus grande du littoral. Cette photo correspond à une situation ancienne (1975), avant la mise en fonctionnement d'une station d'épuration. Toutefois, la gestion des apports brutaux occasionnés par les orages est un problème difficile à résoudre dans les pays méditerranéens.



© CNRS Photothèque / Mathieu Spérandio

◀ Exemple de bassin décanteur-clarificateur utilisé lors du traitement des eaux usées.

tion de la ressource en eau) intégrant une approche pluridisciplinaire ont été bâtis sur cette problématique. Toutefois, la question d'un traitement « tout membrane » et de son accessibilité au plus grand nombre, peut se poser à moyen terme.

À l'assaut des biofilms ! Ce cycle de l'eau de consommation mettant en œuvre les étapes de captage, transport, production et distribution, collecte et dépollution nécessite, par ailleurs d'énormes infrastructures. Chaque année, en France, environ 5,6 milliards de m³ sont distribués par un réseau de canalisations compris entre 800 000 et 850 000 km². À chaque étape de ce cycle, la qualité de l'eau est contrôlée par les traiteurs d'eau et les pouvoirs publics. En effet, l'eau est un milieu favorable au développement de la vie et dans la plupart des réseaux d'eau potable, le transport de l'eau s'accompagne d'une multiplication du nombre de micro-organismes qui disposent là d'un milieu favorable pour s'accrocher sur les parois des canalisations. L'interface eau-matériau constitue le lieu privilégié d'accumulation de matières organiques et de multiplication des bactéries qui s'agrègent et forment ainsi un biofilm. La constitution de ce biofilm est inévitable, mais s'il se développe trop, les bactéries se décrochent, partent au fil de l'eau et rejoignent le réseau de distribution de l'utilisateur. Le CNRS a donc initié en 2003 le pôle national à implantation régionale Biofilms (www.biofilms-pnir.org/fr/), regroupant les chercheurs de plusieurs communautés : biologie, ingénierie, chimie, hydrologie, science des matériaux... créant ainsi un espace réellement pluridisciplinaire pour traiter cette question. **B. B.**

1. « La qualité de l'eau et l'assainissement en France », rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n° 215, mars 2003.

2. Le dégrillage est un procédé qui permet de retirer des objets de taille conséquente (troncs, bouteilles, feuillages...) d'une eau destinée à être traitée.



© CNRS Photographique / Laurence Médard

▲ Le Turboxal est un oxygénateur de surface, commercialisé par Air Liquide, destiné au traitement biologique des eaux usées.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET GESTION DE L'IRRIGATION : UNE APPROCHE DE MODÉLISATION ÉCONOMIQUE

Depuis le début des années 2000, l'agriculture française a connu des sécheresses rapprochées. Il en résulte des pertes importantes de rendement et une inquiétude sur la durabilité de certains systèmes de production. Selon le ministère de l'Écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, le coût d'une sécheresse annuelle pour l'agriculture serait d'environ 240 millions d'euros. L'évaluation d'un tel coût doit cependant s'effectuer en tenant compte des possibilités d'adaptation des exploitants agricoles. La modélisation économique du comportement d'un producteur faisant face à un risque climatique permet de mieux comprendre, mais également de simuler, les réponses que le secteur agricole peut apporter à des phénomènes de réchauffement climatique.

Une expérience prometteuse conduite dans des régions spécialisées en cultures fortement consommatrices en eau (le maïs dans le Sud-Ouest) consiste à coupler un modèle micro-économique de l'exploitation agricole avec un module agronomique simulant la croissance de la plante, en fonction notamment des apports en eau. Les assolements et les calendriers optimaux d'irrigation (prenant comme pas de temps la décennie) sont construits en optimisant une mesure de rentabilité économique, fonction des prix et paiements compensatoires publics, d'un calibrage pédoclimatique et des besoins en eau de la plante. Cette approche permet également de considérer des comportements plus réalistes d'aversion au risque, et d'intégrer au modèle des contraintes réglementaires telles les restrictions temporaires de prélèvement.

L'impact économique d'une sécheresse est alors simulé en comparant la situation initiale (années climatiques observées) avec la mesure de rentabilité d'une exploitation qui adapte son calendrier d'irrigation suite à une modification des paramètres climatiques introduits dans le modèle. Le modèle permet d'aller cependant plus loin, en donnant à l'agriculteur la possibilité de modifier son système de cultures pour privilégier des productions plus économes en eau. La modélisation micro-économique fournit une réponse cohérente à un arbitrage complexe faisant intervenir la rentabilité économique comparée des cultures, la probabilité de sécheresse, le souhait de se couvrir contre le risque climatique, et l'incidence des politiques de protection de la ressource.

Des premiers résultats sur la région Midi-Pyrénées montrent qu'un agriculteur irriguant qui anticipe une sécheresse et modifie son système de cultures en privilégiant par exemple le sorgho au maïs, limitera en moyenne la perte économique à 5% si la probabilité de sécheresse double, alors que cette perte s'élèverait à 12 % sans une telle flexibilité de ses cultures. Cela pose naturellement d'autres problèmes tels que, la mise en place de filières permettant de commercialiser ces cultures. **A.R. et A.T.**

POLLUTIONS INSOUÇONNÉES : LES MÉDICAMENTS

Parmi toutes les sources de pollution des eaux, il en est une qui devient de plus en plus préoccupante : celle due à la consommation de médicaments par l'humain et par les animaux d'élevages. On trouve de tout dans les rivières : des hormones issues des traitements contraceptifs, des anticancéreux, des opioïdes, des anti-inflammatoires, des antibiotiques. Ce nouveau type de contamination s'explique par l'augmentation de la population et de la consommation de ces produits. Et les stations d'épuration des eaux usées bien que de plus en plus sophistiquées n'arrivent pas à épurer la totalité des composés qui leur arrivent via les eaux usées. Une partie de ces médicaments passent donc des urines aux rivières. Certains y arrivent dégradés, d'autres, sous leur forme initiale. S'il est avéré que ces molécules sont maintenant présentes dans quasiment tous les cours d'eau à proximité d'une présence humaine, leur impact sur la faune et la flore demeurent largement méconnus. Des équipes du CNRS travaillent à lever le mystère. **H. B.**



© CNRS Photothèque / Laurent Robin

► Comprimés et gélules de médicaments, source de bien des pollutions invisibles et aux conséquences pourtant parfois importantes.

■ DE LA RESSOURCE AUX CULTURES ET À L'ÉLEVAGE

Depuis une cinquantaine d'années, l'agriculture a connu, partout dans le monde, des bouleversements d'une ampleur considérable. Si l'extension de l'agriculture irriguée a des conséquences évidentes en termes de ressources en eau, l'agriculture pluviale, qui reste la forme dominante d'agriculture dans les pays tempérés, n'affecte pas significativement le bilan hydrique. Elle n'en est pas moins à l'origine de graves menaces sur la qualité de l'eau.

Le recours aux engrais industriels. Les systèmes agricoles traditionnels dépendaient, pour assurer la restitution au sol des éléments exportés par la récolte, d'un équilibre étroit entre des processus naturels se déroulant dans un paysage diversifié. La capacité de l'industrie à se substituer à ces processus naturels par la production d'engrais de synthèse a certes permis de multiplier par dix les rendements agricoles, mais a aussi entraîné des pertes considérables d'éléments fertilisants vers les eaux souterraines et les cours d'eau. Les aquifères sous-jacents aux grandes zones agricoles sont aujourd'hui contaminés par les nitrates, souvent au-delà de la limite de potabilité, et cela pour des décennies étant donné la grande inertie de ces systèmes.

L'enrichissement des rivières par les substances nutritives comme l'azote et le phosphore, issus du lessivage et de l'érosion des sols agricoles, se manifeste par un surdéveloppement de végétaux, pouvant prendre la forme de floraisons explosives d'algues planctoniques. Les zones marines côtières, recevant les apports fertilisants mais déséquilibrés des grands fleuves, voient aussi se développer des algues indésirables, parfois toxiques, qui ne partici-

▼ Le monde de l'agriculture de précision utilise des cartes de rendement pour la préconisation des semis, des apports azotés, de l'irrigation, etc.



© CNRS Photothèque / Michel Dabas



© Jean Weber / Inra

▲ Traitement de pesticide sur parcelle de céréales dans l'Eure-et-Loire.



© Catherine Héroult / Inra

▲ Chambres de mesures de flux de gaz. Ces dispositifs sont constitués d'enceintes placées à la surface du sol dans lesquelles s'accumule le gaz ; malgré la perturbation introduite par la chambre, ce dispositif permet de mesurer en continu, des flux très faibles dans les conditions de la pratique agricole.

pent pas aux chaînes alimentaires menant aux poissons. Accumulation de mousses sur le littoral, empoisonnement des coquillages, risques d'intoxication pour l'humain, sont quelques-unes des manifestations de ce phénomène.

Le recours aux pesticides. Ce qui caractérise aussi l'agriculture moderne c'est la diminution de ses besoins en main d'œuvre : là où une famille de 5 personnes exploitait une ferme de 15 ha, un seul agriculteur gère aujourd'hui une exploitation de 100 ha. La mécanisation y a joué un rôle, mais la chimie y est aussi pour beaucoup, l'emploi d'herbicides s'étant substitué à l'arrachage manuel des mauvaises herbes. Ces substances ne sont qu'imparfaitement dégradées ou retenues dans les sols. Elles sont entraînées par les eaux de pluie vers les nappes souterraines et les rivières. Leurs molécules ou les produits de leur dégradation microbienne, souvent encore plus toxiques, se retrouvent dans les ressources d'eau à rendre potable. La multiplication des molécules utilisées dans l'agriculture, parfois très difficiles à détecter dans les eaux, est un réel problème pour les distributeurs d'eau dans les régions d'agriculture intensive.

La spécialisation et la simplification du paysage. Labourage et pâturage ne sont plus aujourd'hui aussi indissolublement liés qu'ils ne l'étaient dans l'agriculture traditionnelle où le bétail jouait un rôle majeur dans la fertilisation des sols. Des régions entières peuvent se spécialiser dans les grandes cultures et exclure alors toute activité d'élevage. C'est le cas par exemple des régions centrales du bassin parisien, de la Beauce, la Brie et la Champagne. D'autres peuvent au contraire se tourner exclusivement vers l'élevage, basé alors largement sur l'importation d'aliments pour le bétail produits ailleurs. Dans ce type de situation qui est celle de beaucoup de régions

d'Europe comme la Bretagne et les Flandres, les terres cultivées n'ont plus pour fonction essentielle que l'élimination des déchets animaux. Ces sols émettent des quantités massives d'ammoniac et d'oxyde nitreux qui participent à la pollution atmosphérique tandis que les eaux qui s'en écoulent sont gravement contaminées.

Il existait dans le paysage rural traditionnel nombre de milieux qui conféraient au système régional agricole une certaine protection vis-à-vis des inévitables pertes d'éléments nutritifs engendrées par l'agriculture. Étangs, zones humides riveraines plantées d'arbres, assuraient une fonction de zones tampons entre les terres agricoles et les cours d'eau, retenant par exemple jusqu'à 80% des nitrates en provenance du lessivage des sols arables. Le comblement des étangs, le drainage et l'assainissement des prairies humides de fonds de vallées ont conduit à la perte d'une grande partie de ce pouvoir tampon et à une contamination accrue des cours d'eau.

La campagne, fabrique d'eau potable. Pendant des siècles, les territoires ruraux ont assuré, au bénéfice de ses habitants comme de ceux des villes alentour, les fonctions multiples de production de nourriture, d'énergie et d'eau de boisson. C'est toujours aujourd'hui la campagne environnante qui fabrique l'eau des villes, car l'eau se transporte sur de moins grandes distances que la nourriture ou l'énergie. Pourtant, en maints endroits, cette fonction semble aujourd'hui compromise par une intensification extrême de l'agriculture. Dans le contexte de la mondialisation des marchés agroalimentaires, l'eau du robinet est aujourd'hui bien souvent le dernier lien qui unit les villes à leur hinterland rural. L'exigence citoyenne d'une eau de distribution de bonne qualité reste ainsi un puissant incitant pour une gestion plus équilibrée de l'activité agricole. **G. B.**

TECHNIQUES ET CULTURES DE L'EAU EN MÉDITERRANÉE

À l'heure où les technologies de pointe se multiplient, le développement de modèles exportables de gestion de l'eau revêt une importance majeure sur le plan international. Pour autant, dans un contexte de préoccupation de l'environnement et du développement durable, pour agir, reconsidérer les pratiques traditionnelles de gestion de l'eau s'impose.

Des études menées en divers endroits de l'espace méditerranéen montrent combien l'articulation entre le social et les techniques préside au choix des méthodes et des outils retenus et utilisés pour la gestion de la ressource eau. En d'autres termes, les choix techniques ne sont pas seulement liés à des données objectives (nature, quantité, qualité de l'eau, type de sol, climat, etc.) mais aussi à des données objectivables, c'est-à-dire aux éléments qu'une culture est en mesure ou non d'accepter. Les techniques et les cultures de l'eau sont attachées à des valeurs et à des principes qui font sens pour les sociétés dans lesquelles elles prennent forme.

Plusieurs projets de recherche sont menés, parmi lesquels, le programme lusofrançais Fysen qui porte sur les instruments de mesure. La permanence d'une irrigation réalisée à l'aide de cannes de roseau graduées est expliquée au regard d'un principe d'équité vivement revendiqué dans la distribution de la ressource.

Dans un programme portant sur la notion de risque lié à l'eau en Méditerranée, les recherches montrent que des agriculteurs tunisiens maîtrisant parfaitement les techniques de l'irrigation, reviennent aux cultures sèches moins productives mais plus sûres pour la collectivité. Dans certains secteurs, en effet, la politique de l'offre généralisée en matière d'eau peut devenir un handicap dans la gestion des environnements sensibles.

Un peu partout en Méditerranée, comme en d'autres endroits du monde, une combinaison des pratiques traditionnelles avec des technologies de pointe s'opère. Aussi est-ce dans la confrontation des enseignements du passé avec les perspectives d'avenir que sont recherchées aujourd'hui les conditions d'un développement durable dans la gestion et le partage de l'eau. **F.W.**

► Bassin, réservoir et canne de roseau graduée (au premier plan) utilisée dans la mesure des volumes d'eau au Nord-Ouest du Portugal



© Fabienne Wateau

■ DE LA SOURCE À L'USINE

Utilisations par grands secteurs industriels. L'eau est utilisée par l'industrie pour de multiples applications : le nettoyage, le chauffage et le refroidissement des installations, la génération de vapeur, ou encore le transport de substances dissoutes ou de particules. L'eau sert aussi comme une matière première, en tant que solvant, ou en tant que l'un des constituants du produit fini (par exemple dans l'industrie des boissons). Ainsi 1,4 milliard de litres d'eau sont par exemple nécessaires pour produire la quantité mondiale de papier journal utilisé au cours d'une seule journée⁽¹⁾.

La consommation d'eau par l'industrie est souvent mesurée en termes d'eau soutirée plutôt que d'eau consommée. Il convient de faire la distinction entre la disponibilité de l'eau, les prélèvements d'eau et les consommations d'eau. L'eau disponible représente la quantité des ressources en eau renouvelables pour satisfaire les besoins d'une population humaine. Les prélèvements d'eau correspondent à la quantité d'eau prise dans les ruisseaux ou les rivières et pompée dans les nappes souterraines pour les besoins humains, mais pas forcément consommée. Une partie de l'eau prélevée est renvoyée dans la nature après usage ; elle est donc restituée à l'environnement. La quantité qui n'est pas rendue à la nature correspond à l'eau consommée, autrement dit l'eau évaporée ou utilisée dans les produits et les organismes, si bien qu'elle est temporairement indisponible pour d'autres usagers.

PRÉLÈVEMENTS ET CONSOMMATION D'EAU

Par secteur	Prélèvements d'eau	Consommations d'eau
Agriculture	66 %	93 %
Industrie	20 %	4 %
Usage domestique	10 %	3 %
Évaporation des réservoirs	4 %	-

Source : rapport de l'Unido, 2003



© CNRS Photothèque / Hervé Théry

▲ Exercice de contrôle de la pollution à la raffinerie Petrobras de Manaus. Une fois le pop-corn (qui simule une nappe de pétrole) rassemblé, il est pompé par une machine spécialement conçue. Cela permet une étude des impacts environnementaux de l'exploitation de l'Amazonie.

► Microphotographie électronique à balayage colorisée d'un matériau silicone poreux préparé par une technique originale à partir d'une émulsion concentrée aqueuse (porosité totale : 85 %). Ce matériau monolithique rigide microcellulaire est utilisable en chimie verte, catalyse hétérogène, isolant phonique et thermique, biocapteurs, filtre à particules, dépollution.

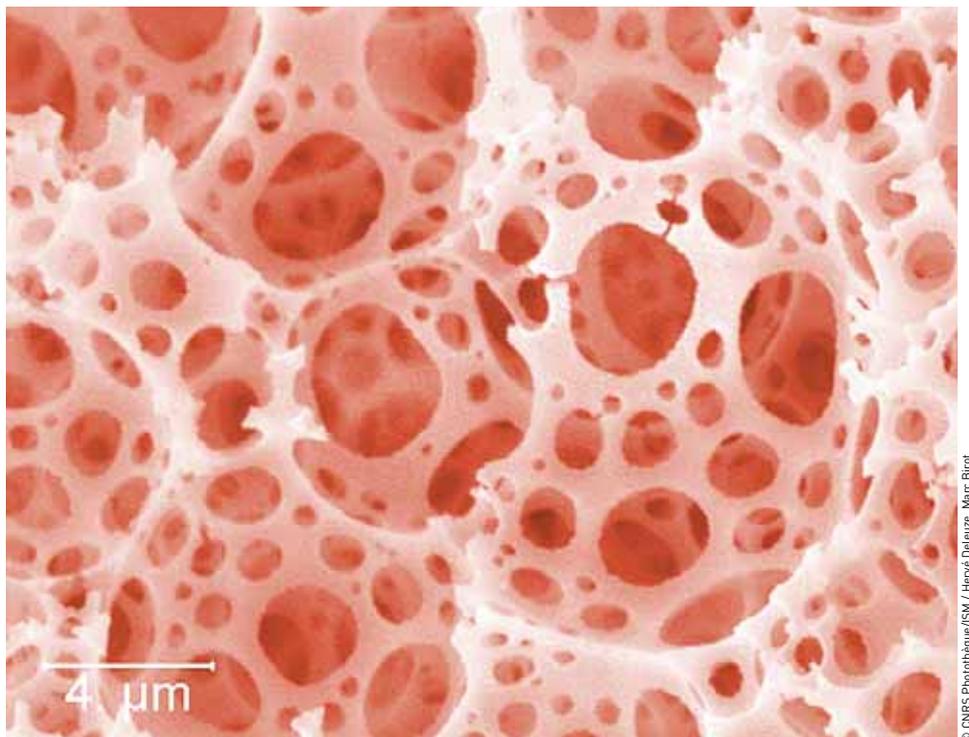
Certaines industries pompent elles-mêmes les eaux destinées à leurs fabrications. Elles doivent, dans ce cas, déclarer à l'agence de l'eau le volume prélevé. Tout prélèvement d'eau est en effet soumis à une autorisation préalable et à des limitations afin de ne pas engendrer de déséquilibre dans la répartition des eaux. Par exemple, un prélèvement abusif dans un cours d'eau peut conduire à un débit insuffisant pour toute utilisation de l'eau voire une impossibilité de développement de la faune et de la flore aquatiques à l'aval.

En France, les quatre branches industrielles les plus consommatrices d'eau sont la chimie de base (production de fibres, fils synthétiques), l'industrie du papier et du carton, la métallurgie, la parachimie et l'industrie pharmaceutique.

La tendance actuelle en Europe (depuis 1980) est à la baisse de la consommation industrielle¹. Cependant si la demande a diminué en quantité, elle est plus exigeante sur la qualité de l'eau. Ainsi si une eau peu traitée peut suffire pour le refroidissement et le lavage, une eau potable est indispensable pour une production alimentaire. Et pour les circuits électroniques, une eau ayant subi des traitements plus poussés que pour la consommation est nécessaire.

C'est pourquoi, les industriels se sont associés à la recherche menée dans les laboratoires du CNRS sur le traitement de l'eau et des effluents issus de leur fabrication. La difficulté alors pour les chercheurs est d'intégrer toutes les échelles de connaissance depuis le réacteur industriel jusqu'au micro-organisme dans une stratégie de commande ou une stratégie décisionnelle. Ainsi, de nouvelles études du CNRS en partenariat avec d'autres établissements publics et les industriels concernés portent sur des approches statistiques multivariées, de logique floue ou de modèle capteur logiciel.

Conséquences des usages industriels. L'impact de l'activité industrielle sur la qualité des eaux est très différent selon que l'on considère l'activité en cours ou l'activité passée (héritage). L'activité industrielle en cours émet de la pollution liée à l'énergie consommée (en particulier aux hydrocarbures), aux matériaux transformés (minerais) et aux procédés de fabrication utilisés (solvants et autres produits toxiques). L'impact de cette activité concerne surtout les eaux de surface, les cours d'eaux, les mers et les océans. La pollution de l'eau provient de l'usage et des rejets de l'eau. Les rejets industriels sont des matières en suspensions, liées en particulier aux matières organiques, des métaux lourds (cadmium, cuivre, plomb, mercure...) et des polluants organiques persistants comme les hydrocarbures, les acides et les bases qui modifient le pH de l'eau. Ainsi, une première étape d'épuration de l'eau avant rejet, peut



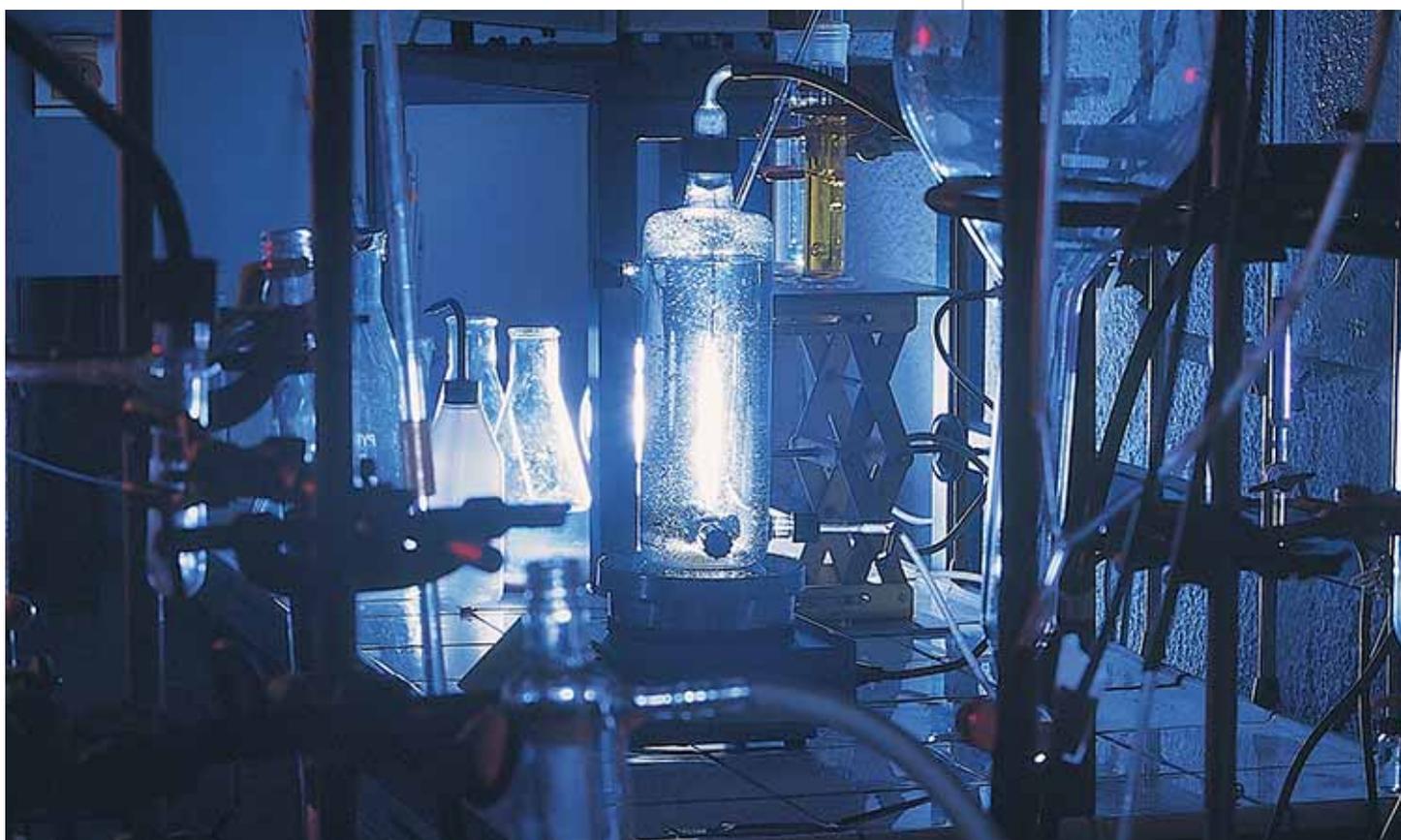
© CNRS Photothèque/ISM / Hervé Deteuz, Marc Birot

se faire sur le site même de la production, le reste des eaux usées étant ensuite dirigé vers les systèmes de traitements municipaux. Mais pour de nombreuses unités de production, les eaux usées retournent dans un cours d'eau sans retraitement préalable. Parmi les industries considérées traditionnellement comme rejetant des matières particulièrement polluantes pour l'eau, on trouve les industries agroalimentaires, papetières, la chimie, les traitements de surface, l'industrie du cuir.

La pollution provenant de notre passé industriel est différente, elle se manifeste surtout par la présence de résidus, concentrés sur des espaces réduits : résidus miniers ou substances dangereuses et toxiques entreposées et pouvant contaminer les eaux de surface ou les eaux souterraines par l'infiltration des eaux de pluie.

Rien de pire que la pollution biologique. Les principaux polluants de l'eau sont les déchets consommateurs d'oxygène (essentiellement les substances organiques dont la décomposition entraîne un épuisement de l'oxygène) ; les agents contaminants, les tensioactifs, le pétrole, les composés chimiques, les substances radioactives provenant des activités nucléaires. Les systèmes de refroidissement de l'eau des industries et des centrales nucléaires représentent également une source de pollution par réchauffement de la température de l'eau.

▼ Dispositif d'ozonation catalytique pour la dégradation d'un polluant en solution aqueuse dans un réacteur de laboratoire. L'objectif de la recherche est l'étude des mécanismes réactionnels d'ozonation catalytique de molécules modèles et la mise au point de procédés de dépollution de l'eau.



Une eau avec une teneur en substances organiques élevée est souvent trouble et est caractérisée par une croissance rapide d'algues et de vase. La croissance de ces organismes provoque une diminution du niveau d'oxygène dans l'eau. Il est alors plus difficile pour les poissons, les insectes, les amphibiens et beaucoup d'espèces de plantes aquatiques, de vivre et de se reproduire dans une telle eau pauvre en oxygène. Lorsque le rejet d'eau industrielle est encore chaud, cette pollution thermique affecte également les écosystèmes aquatiques en amont, qui doivent s'ajuster à une température supérieure à la normale.

Le volume d'eau concerné par la pollution est bien supérieur à celui rejeté par les industries. En effet, si la dispersion de la décharge dans les rivières ou réservoirs provoque un effet de dilution des contaminants, la multiplication des usines réduit quant à elle, considérablement cet effet.

La pollution de l'eau par une activité industrielle peut avoir des conséquences sur la santé des humains si le rejet du courant pollué se trouve à proximité d'un lieu de baignade ou de pêche. De même, lorsque ce rejet est proche d'un point de soutirage d'eau utilisée par les agriculteurs pour irriguer leur récolte ou d'une zone de captage d'eau brute pour l'usage domestique. Les traitements peuvent alors devenir plus compliqués et plus coûteux. Se pose alors le problème fondamental de savoir comment éliminer tel ou tel polluant, qui a peut-être des dimensions très petites ou qui résiste à différents traitements. Les stations d'épuration existantes basées sur des procédés biologiques ou physicochimiques, présentent des insuffisances et atteignent leurs limites face à la variabilité et à la fugacité de ce type de polluants.

Pour ce qui concerne les autres sources de pollution de l'eau par l'activité industrielle, les substances dangereuses et toxiques concentrées dans le sol et pouvant contaminer les eaux de surface ou les eaux souterraines par l'infiltration des eaux de pluie ont été citées. Mais il faut également signaler la pollution atmosphérique. En effet, certaines industries émettent dans l'atmosphère des quantités de composés sulfurés ou azotés (SO_x ou NO_x) qui peuvent se dissoudre dans les gouttes de pluie et retomber en pluies acides. De nombreux courants, rivières et lacs en Europe sont plus acides que ce qu'ils seraient sans ce processus. D'autres composés comme les dioxines ou les furanes peuvent aussi être relâchés dans l'atmosphère à partir de cheminées industrielles

et ensuite entrer dans le cycle naturel de l'eau. Le tableau ci-dessous fournit les quantités de benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes directement ou indirectement transmises dans l'eau pour huit pays européens en 2003.

ACTIVITÉ REJETANT BENZÈNE, TOLUÈNE, ÉTHYLBENZÈNE ET XYLÈNES

En kg/an	Directement dans l'eau	Indirectement dans l'eau
Installations de combustion (> 50 MW)	967	2 830
Raffineries de pétrole	67 486	880
Fours à charbon	390	
Usines de gazéification et liquéfaction du charbon	1 020	
Industrie métallurgique et installations de fonte des métaux	16 080	8 080
Produits chimiques organiques de base	40 328	127 158
Produits chimiques inorganiques de base et fertilisants	57 996	
Biocides et explosifs	6 170	365
Produits pharmaceutiques	1 282	7 550
Installations de traitement de déchets toxiques (> 10 t/jour)	2 300	2 136
Usines de prétraitement de fibres et de textiles (> 10 t/jour)	707	
Installations pour le traitement de surfaces ou produits utilisant des solvants organiques (>200 t/an)	3 773	
TOTAL	194 019	153 479

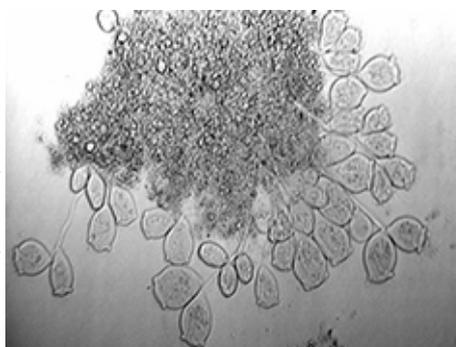
Source : rapport de l'Unido, 2003

La lutte contre les substances toxiques est l'un des challenges de la recherche du 21^e siècle. En particulier, les micropolluants présents à de très faibles concentrations (micro-, nano- voire picogramme par litre), s'attaquant à des fonctions biologiques de base (bioaccumulables et rémanentes) nécessitent des outils de détection (analyse chimique ou analyse des effets) et de capture spécifiques. **B.B.**

1. Rapport de l'UNIDO, 2003, « World Water Development report » (United Nations Industrial Development Organization www.unesco.org/water/)



▲ La pollution de l'eau par des graisses exige un traitement spécifique.



▲ Macrophoto d'un flocc composé de bactéries et de protozoaires qui sont des pollutions biologiques.

LES ENJEUX DE LA DIRECTIVE CADRE SUR L'EAU DE L'UNION EUROPÉENNE

L'eau fait depuis longtemps l'objet de recherches pluri- voire interdisciplinaires larges. Le CNRS a conduit des programmes sur le thème de l'eau. Parmi ces grands programmes, le CNRS a piloté le Programme interdisciplinaire de recherches sur l'environnement (Piren), puis le plus ambitieux Programme environnement, vie et sociétés (Pevs). Les efforts du Pevs se prolongent au niveau territorial avec les zones-ateliers (ZA), dont plusieurs apportent leur concours à certaines agences de l'eau, qui les financent pour obtenir des connaissances liées à la mise en œuvre des programmes d'action. Plus généralement, dans l'action publique, les experts appelés à donner leur avis comprennent de plus en plus souvent des chercheurs en sciences sociales. En effet, l'intervention de ces chercheurs pour conduire une gestion intégrée et participative de l'eau dans la perspective du développement durable, comme le préconise la Directive cadre sur l'eau (DCE) de l'Union européenne, adoptée à l'automne 2000 (2000/60 CE) est nécessaire. La directive cadre sur l'eau constitue un saut qualitatif, un changement d'échelle, dans la politique européenne menée sur l'eau. Pour la première fois, en effet, l'Union européenne va plus loin que la seule contrainte faite aux Pays membres et leurs entreprises de respecter les mêmes règles d'environnement. Par la DCE, l'Union européenne fait de la reconquête de la qualité des milieux aquatiques de toute l'Europe un objectif en soi.

La triple ambition de la DCE

- Atteindre, pour chacun des districts hydrographiques établis par les états membres, y compris ceux qui sont internationaux, un bon état écologique d'ici à 15 ans. Il s'agit en fait de se rapprocher d'un état de référence qui n'est pas nécessairement l'état naturel d'avant l'humanisation de l'Europe, mais qui doit traduire un respect certain de l'écosystème. Les exceptions (masses d'eau dites fortement modifiées) doivent être motivées par des analyses environnementales et économiques justifiant les retards.
- Se rapprocher du financement des politiques de l'eau par ses bénéficiaires, secteur par secteur, grâce à une tarification appropriée des divers usages, qui prenne en compte l'amortissement des investissements, les coûts environnementaux et les coûts de la ressource. Dans un premier temps, établir un bilan du taux de recouvrement des coûts par les recettes.
- Donner la possibilité au public de participer à l'élaboration des politiques, et, à tout le moins, lui donner l'information correspondant aux deux points ci-dessus, et le consulter à chaque étape des plans et programmes d'action renouvelés tous les six ans.

Les ambitions de la DCE laissent transparaître les trois axes de la durabilité couramment évoqués : environnement, économie, éthique. Et il est ambitieux de vouloir satisfaire ces trois axes en même temps, même pour un pays comme la France qui peut avoir l'illusion d'avoir servi de modèle avec son approche par groupes de bassins versants.

Les recherches à venir sur le thème de l'eau devront renouveler leur approche en la fondant sur des investissements technologiques et sur la résolution de problèmes ponctuels, par des approches territoriales et plus intégrées. Les grands instituts de recherches ont réussi, en partenariat avec le ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'aménagement du territoire à lancer en 2008 un programme appelé Eau et territoires, auquel on souhaite une longue vie comme aux zones ateliers. **B. Ba.**

L'EAU DONT L'HUMAIN USE ET ABUSE

- Bernard Barraqué
Centre international de recherche sur l'environnement et le développement, CNRS / école nationale des Ponts et Chaussées / Cirad / EHESS
- Daniel Beysens
Directeur de l'équipe CNRS-CEA-ESPCI du Laboratoire de physique et mécaniques des matériaux hétérogènes ; président de l'organisation pour l'utilisation de la rosée (Opur)
- Gilles Billen
UMR Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux, CNRS / université Pierre-et-Marie-Curie / ParisTech Mines Paris / EPHE

- Béatrice Biscans
Laboratoire de génie chimique, CNRS / INPT / université Toulouse-III
- Hélène Buzdinski
Directrice du Laboratoire de physico- et toxicochimie des systèmes naturels, Institut des sciences moléculaires, CNRS / université Bordeaux-I
- Arnaud Reynaud et Alban Thomas
Laboratoire d'économie des ressources naturelles, UMR Inra / université Toulouse-I
- Graciela Schneier-Madanes
Deputy Director, UMI 3157 Water, Environment and Public Policy, CNRS / University of Arizona
- Fabienne Wateau
Laboratoire d'ethnologie et de sociologie comparative, CNRS / université Paris-X

L'EAU DANS TOUS SES ÉTATS

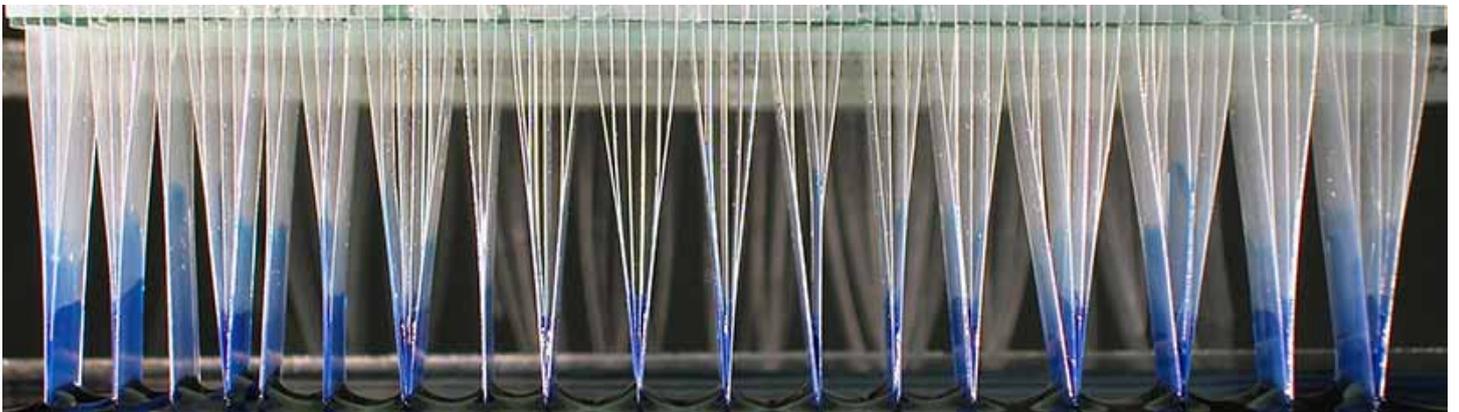
POURQUOI LES LIQUIDES ET L'EAU TOUT SPÉCIALEMENT TENDENT À FORMER DES GOUTTES ? À CAUSE DE LEUR SURFACE ? ET POURQUOI CES GOUTTES SONT-ELLES SPHÉRIQUES ? COMMENT PEUT-ON TIRER PARTI DE L'EXISTENCE DE LA TENSION SUPERFICIELLE DE L'EAU ? ET AINSI METTRE AU POINT DES MATÉRIAUX QUI REPOUSSENT L'EAU, CONFÉRANT À CETTE DERNIÈRE UNE MOBILITÉ SANS PAREILLE ? ÉTUDIER LA PHYSIQUE DE L'EAU PERMET NOTAMMENT DE RÉPONDRE À CES QUESTIONS.

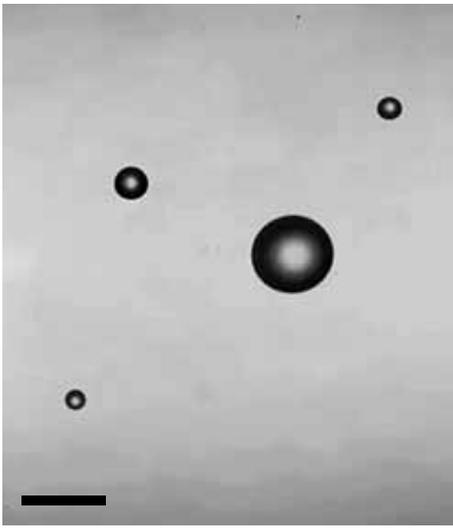
■ L'EAU SUPERFICIELLE OU LE TRIOMPHE DES FORMES

Avec l'eau, de la cohésion naît la tension ! Entre autres bizarreries, l'eau est remarquablement cohésive. La cohésion de l'eau se manifeste par une température d'ébullition bien plus élevée que ce qu'on pourrait attendre d'une aussi petite molécule. Ce phénomène est dû à l'existence de liaisons hydrogène, qui accrochent les molécules entre elles de façon électrostatique, de l'hydrogène de l'une à l'oxygène d'une autre. L'hydrogène sulfuré H_2S , un proche parent de l'eau, mais pour lequel seules les liaisons de van der Waals participent à la cohésion, bout à -60 °C au lieu des 100 °C que l'on connaît pour l'eau. À cause des liaisons hydrogènes, l'eau ne se comporte pas comme d'autres molécules qui lui sont similaires. Et sa forte cohésion lui confère une tension superficielle élevée.

Comment expliquer cette propriété ? Nos molécules d'eau, comme nous l'avons vu, au lieu d'être libres sont liées. Or, pour amener une molécule du fond du récipient dans lequel on la fait bouillir jusqu'à sa surface, il faut la séparer de la moitié de ses voisines. Cette séparation implique de couper des liaisons hydrogène, ce qui néces-

▼ Brosse utilisée par les chercheurs pour comprendre l'agrégation des poils mouillés. Ces travaux s'appliquent à la fabrication de nombreux systèmes miniatures comportant des picots flexibles : les revêtements anti-pluie, qui imitent les feuilles de plantes hydrophobes, ou encore les adhésifs biomimétiques, qui fonctionnent comme les pattes poilues des coléoptères.





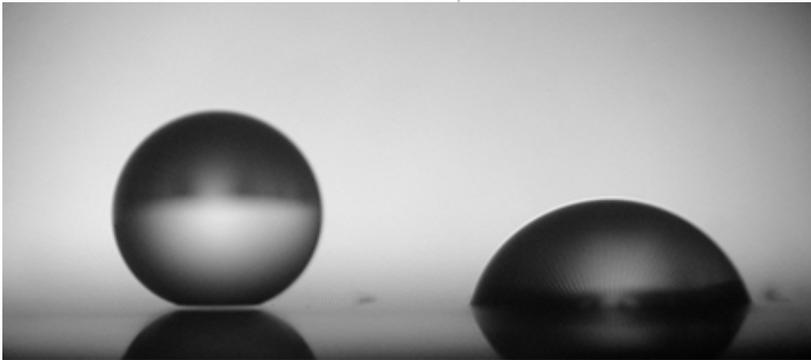
▲ 1 Pluie élémentaire, faite de quatre gouttes de taille différente. Même si la vitesse de chute de ces objets dépend de leur taille (les gouttes tombent en régime stationnaire d'autant plus vite qu'elles sont grosses), leur forme, elle, n'en dépend pas : la forte tension superficielle de l'eau les rend sphériques en dépit du frottement de l'air. La barre indique 5 mm et la vitesse de chute vaut entre 10 et 20 km/h selon la taille des gouttes.

site de fournir de l'énergie. Cette énergie, définie par unité de surface de la frontière du liquide, est appelée tension superficielle, reflet direct de la cohésion du liquide. L'hydrogène sulfuré à son point d'ébullition a une tension de 30 mN/m alors que l'eau a une tension de 60 mN/m à 100 °C.

À cause de leur tension superficielle, les liquides ont tendance à se mettre en boule. Cette configuration leur permet de rendre aussi petite que possible leur surface, et donc l'énergie qui lui est associée. Ce sont les gouttes qui nous sont familières. Cette tendance est renforcée pour l'eau qui même quand elle tombe en pluie garde cette forme, en dépit du frottement de l'air (1).

On a là un bon exemple de la distance qui peut séparer un préjugé (la pluie fait des larmes) de la réalité (ce sont des perles). Un peu plus grosses, ces sphères certes se déforment un peu, mais au contraire de ce qu'on croit : à cause de l'air qui vient sur elles quand elles tombent, elles s'aplatissent un peu à l'avant, tout en restant sphériques à l'arrière.

Lentilles ou billes selon les besoins. Posées sur des solides, les gouttes y font des petites lentilles qui ne sont plus que des portions de sphère, autant de loupes qui sur une vitre distordent notre vision. Cette forme de lentille n'est pas un effet de la pesanteur, qui n'aplatit la goutte que quand elle est vraiment grosse (centimétrique ou plus). Ce sont les interactions du liquide avec le solide qui font les lentilles. Ainsi un solide hydrophile (comme le verre propre) rend-il favorable l'étalement de l'eau, malgré l'augmentation de la surface eau/air qu'un tel processus suppose. Pour le verre, ce sont la présence de groupes chimiques appelés silanol à sa surface qui promeuvent l'étalement. Cette situation est aussi favorisée sur le verre par le dépôt d'une mince couche d'oxyde de titane qui rend l'hydrophilie durable en présence de rayons ultraviolets. Grâce à ce dépôt, l'eau de pluie filmifie spontanément sur un tel solide. Une fois cette propriété acquise par le support, et pour peu qu'il soit en pente, l'eau s'écoule alors en emportant les saletés qui s'y trouvent. On a là un des secrets des verres autonettoyants, commercialisés depuis quelques années pour nos pare-brise ou nos vitrages.



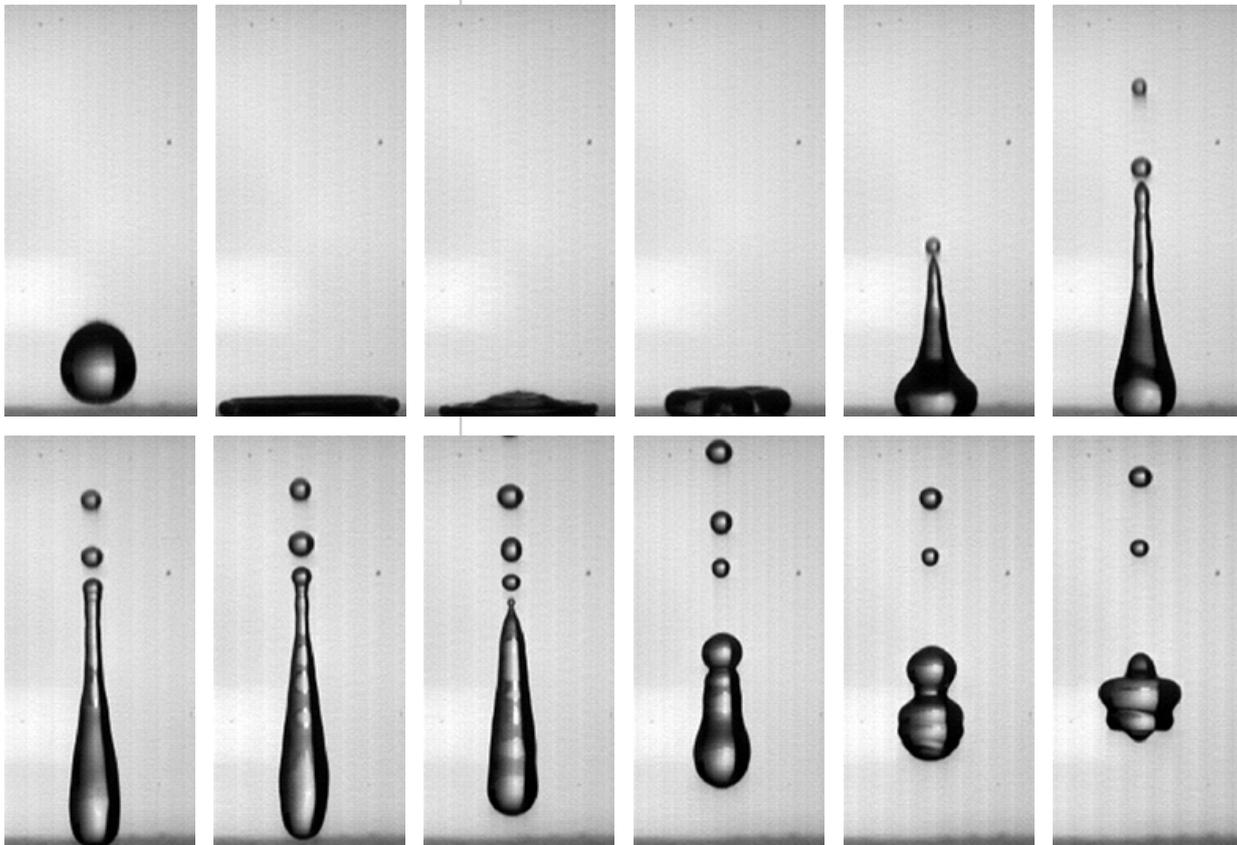
▲ 2 Gouttes d'eau millimétriques sur un solide. On voit à droite la situation banale où une goutte forme une lentille qui rejoint le support avec un angle d'autant plus petit que le matériau qui le constitue est hydrophile. À gauche, la présence de petits plots hydrophobes détache la goutte du support, qu'elle ne touche plus que par les sommets des plots. C'est l'effet lotus.

Dans d'autres cas, on cherchera au contraire à préserver la forme sphérique des gouttes (2), malgré la présence d'un support solide. On parle alors de mouillage nul. On attend que la moindre pente ou le moindre souffle chasse une goutte aussi peu adhésive. Cet effet est souvent appelé l'effet lotus, en référence aux feuilles de cette plante qui ont cette propriété. L'observation au microscope électronique de ces feuilles (et de plus de deux cents autres qui partagent avec le lotus d'être superhydrophobes) montre que leur surface est couverte de petits plots d'une dizaine de micromètres de haut et donc invisibles à l'œil nu. La texture seule ne suffit pas à faire perler

l'eau, il faut aussi qu'elle soit couverte d'une mince couche hydrophobe, comme une cire (ou un téflon, pour les matériaux artificiels). C'est la conjonction de cette chimie particulière et de la rugosité qui produit l'effet recherché. La surface étant hostile au contact solide/liquide, l'eau choisit de se placer au sommet des petits plots, ce qui la met, littéralement, sur coussin d'air. Comme on l'a vu plus haut, c'est bien une forme de sphère qu'on attend alors pour les gouttes.

La fabrication de ces matériaux propres à repousser l'eau a été l'objet d'une recherche particulièrement active depuis cinq ans, un peu partout dans le monde. Il existe de nombreux moyens de produire la texture nécessaire, par exemple via un dépôt de microsphères solides (telles des suies) ou par une attaque chimique hétérogène. Si ces surfaces sont pour la plupart superhydrophobes, elles sont aussi superoléophiles : l'huile, à cause de sa moins grande cohésion, envahira la texture comme du sable. Mais certains dessins astucieux de texture (en microchampignons ou en nanofils) permettent même de repousser l'huile.

Au-delà des applications potentielles (textiles ultra-imperméables, bétons hydrofuges, matériaux anti-buée), une des raisons de l'engouement actuel pour ces surfaces vient des dynamiques spectaculaires de l'eau en leur présence, comme le montre la discussion qui suit.



© Denis Richard, Christophe Clanet et David Quéré

▲ 3 Goutte d'eau millimétrique frappant un matériau super-hydrophobe, à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde. La goutte s'étale, à cause de sa vitesse élevée, avant de se recomposer et de décoller, manifestant le caractère superhydrophobe de son support. Les grandes déformations de la goutte provoquent sa fragmentation partielle et sa vibration vigoureuse, après son décollage. L'intervalle entre images est de 2 millisecondes.

Quand l'eau ressemble à une tortue. À cause de sa forte cohésion, l'eau devrait être visqueuse, c'est-à-dire résister fortement aux écoulements qu'on lui impose. Le glycérol, qui tire aussi sa grande cohésion de liaisons hydrogène, a d'ailleurs une viscosité mille fois supérieure à l'eau. Quand un liquide coule, les différences de vitesse entre des plans adjacents de molécules obligent ces dernières à sortir de la cage que leur font leurs voisines, ce qui est d'autant plus malaisé que la cage est fermée, c'est-à-dire que le liquide est cohésif. En ce sens, il est normal que le glycérol soit visqueux et très surprenant que l'eau le soit si peu.

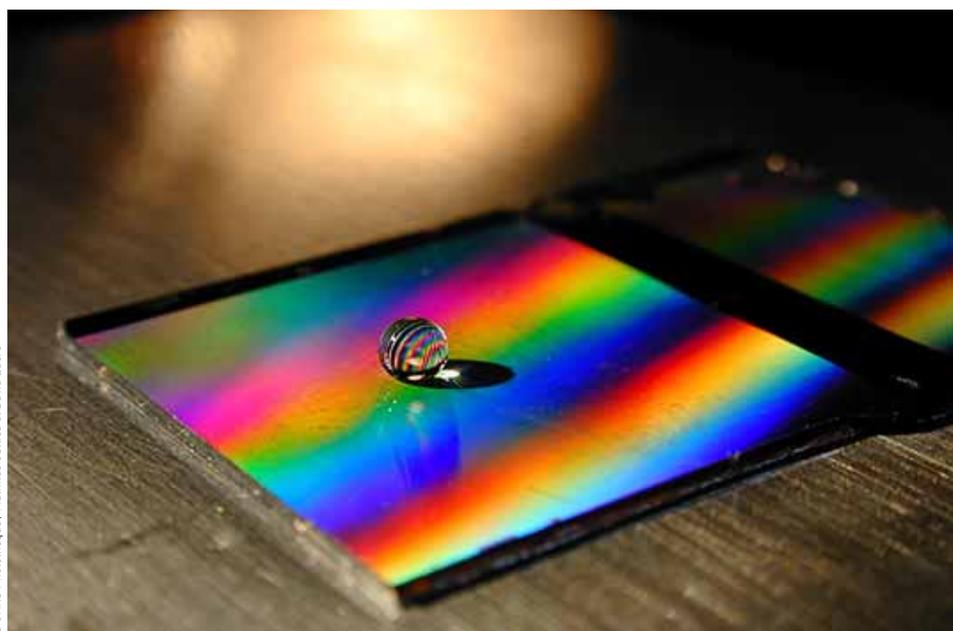
Aux grandes échelles des rivières ou du robinet qu'on ouvre, cette faible viscosité de l'eau est heureuse : elle assure son transport rapide. Cependant, il peut en être autrement : l'eau sur un plan incliné coule beaucoup moins vite en goutte qu'en rivière. Ceci vient d'un frottement spécial, objet de recherches acharnées, qui a lieu près des bords de la goutte, au voisinage de la ligne de contact qui la borde. À cet endroit, la hauteur de liquide devient très faible et comme ce sont les gradients de vitesse qui fixent l'amplitude de la force visqueuse ; cette dernière diverge ! D'où l'allure de tortue qu'auront souvent ces petites carapaces fluides.

Les matériaux superhydrophobes tirent à la fois partie de la faible viscosité de l'eau, et de la propension de cette dernière à y rester en boule, et donc à ne pas faire ces coins liquides où le frottement est exacerbé. L'eau retrouve ainsi, même à l'échelle des gouttes, la vivacité qu'on lui prête quand elle tombe en pluie ou en cascade. Ceci est à l'origine des propriétés antipluie des matériaux superhydrophobes (3). Une goutte millimétrique arrive à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde et s'étale inertielllement sur cette surface. Sur un support normal, elle s'arrêterait rapidement, à cause du frottement. Mais là, une fois atteint un rayon maximum, elle se recompose et repart vers là d'où elle est venue, tout en vibrant vigoureusement à cause de l'extrême déformation subie pendant l'impact. On voit là une eau qu'on peut qualifier d'élastique. Ce comportement se déduit directement des principes énoncés plus haut. En se déformant, c'est-à-dire en augmentant sa surface, la goutte d'eau augmente son énergie de surface, en proportion de l'énergie cinétique qu'elle doit stocker. C'est donc un véritable ressort que cette goutte, et d'autant plus élastique que les pertes visqueuses sont faibles dans le mouvement d'étalement et de rétraction. Une

sorte de loi de Hooke peut même s'appliquer ici : la force de rappel du ressort est proportionnelle à sa déformation, et la raideur de ce ressort est la tension superficielle de l'eau (dont on a vu plus haut qu'elle s'exprime en N/m, qui est bien l'unité pour une telle quantité).

Jusqu'à des textures optimisées pour matériaux intelligents. Les matériaux superhydrophobes sont aussi susceptibles d'être superglissants. Quand de l'eau coule sur un solide, la fraction de volume qui est au voisinage du solide est quasiment à l'arrêt, ce qui est à l'origine d'une résistance visqueuse d'autant plus grande que la couche d'eau est mince. L'eau aura donc la propriété d'avancer difficilement dans les microcanaux tels qu'ils sont produits pour la microfluidique. Or dans l'état superhydrophobe, le liquide est au contact principalement avec de l'air sur lequel il glisse presque parfaitement : la résistance visqueuse à l'écoulement est donc très amoindrie dans cet état, et on a montré qu'on pouvait atteindre sur ces surfaces des réductions de pression de l'ordre de 50 %, pour faire avancer l'eau à un débit donné. On cherche aujourd'hui à amplifier encore ces propriétés, par exemple en optimisant la forme des textures de surfaces.

D'une façon plus générale, la question de l'optimisation des textures en fonction d'une propriété recherchée (pouvoir antigivre, antibuée, antipluie, ou au contraire superhydrophile) est le secteur le plus actif de la recherche sur ces *smart materials* que sont les solides texturés. **D.Q.**



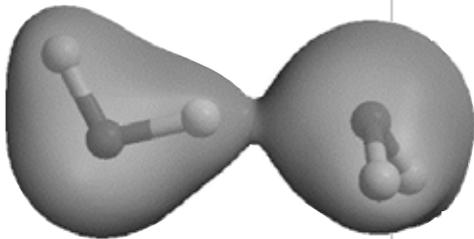
© CNRS Photothèque / Mathilde Callies et David Ouéré

◀ Goutte d'eau millimétrique sur un substrat texturé hydrophobe : la goutte garde la forme d'une perle (on dit du matériau qu'il est superhydrophobe). La texture est un réseau de plots régulièrement organisés à l'échelle du micron, ce qui confère au matériau ses couleurs. Cette propriété superhydrophobe est appelée l'effet lotus.

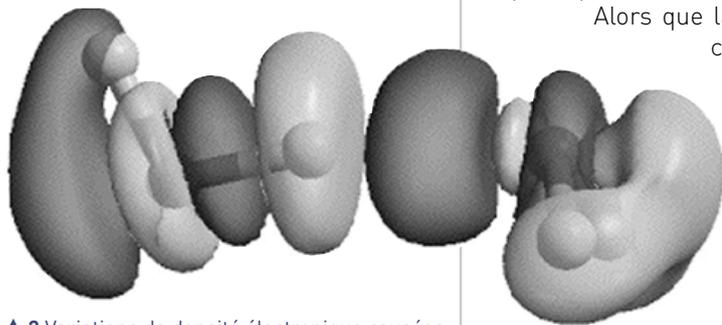
■ L'EAU, CE LIQUIDE QUI FAIT RÊVER

Vous ne verrez peut-être plus l'eau de la même façon ! Celle que l'on connaît comme le liquide le plus abondant à la surface de la Terre, celle qui coule pour certains d'un robinet, a des propriétés qui défient celles des autres liquides et matériaux. Ce n'est pas un hasard si les glaçons flottent sur l'eau. De même il y a des raisons à l'apparition de la vie dans l'eau.

La molécule d'eau, une molécule pas comme les autres. L'eau est un liquide très cohésif : ses températures de cristallisation et d'ébullition sont très élevées pour un liquide qui n'est ni ionique, ni métallique, et dont la masse molaire est faible. Ainsi, l'eau reste incroyablement liquide à pression atmosphérique jusqu'à 100 °C. Alors que l'extrapolation de la série H_2S , H_2Se , H_2Te donnerait une température d'ébullition de - 80 °C pour l'eau si elle se comportait comme les molécules qui lui ressemblent.



▲ 1 Densités électroniques du dimère, obtenues par calcul des orbitales localisées via la mécanique quantique. Le « pont » de densité électronique qui joint les deux molécules est la « signature » de la liaison H.



© R. Valtierra

▲ 2 Variations de densité électronique causées par les interactions des deux molécules du dimère, par rapport aux densités électroniques de molécules isolées. Les régions où la densité électronique du dimère est excédentaire sont ombrées en gris, celles qui ont perdu de la densité électronique en blanc. L'alternance régulière de régions contenant un excès et un défaut de densité électronique crée une polarisation des molécules, qui augmente le moment dipolaire du dimère.

Cette cohésion est assurée par les liaisons hydrogène entre molécules d'eau. L'eau fait ainsi partie, avec les alcools et les amines, d'un petit groupe de liquides qu'on appelle liquides associés (1). Parmi ces liquides, la cohésion de l'eau est remarquable. Par exemple, l'eau a des températures de fusion et d'ébullition très supérieures à celles de l'ammoniac, qui fait des liaisons hydrogène plus faibles que celles de l'eau, et à celles de l'acide fluorhydrique, qui fait des liaisons hydrogène spatialement moins développées que celles de l'eau.

De la chaleur spécifique de l'eau à la régulation thermique du climat. La cohésion de l'eau se traduit également par une chaleur spécifique énorme. Il faut trois fois plus d'énergie pour réchauffer de l'eau que pour réchauffer la même masse de pentane. Et il en faut même dix fois plus que pour la même masse de fer. Cette chaleur spécifique de l'eau liquide est aussi deux fois plus élevée que celle de l'eau solide.

Alors que la plupart des liquides ont des chaleurs spécifiques proches de celles des solides correspondants. La rupture de liaisons hydrogène absorbe en fait beaucoup de chaleur. Et cette chaleur absorbée n'est alors pas disponible pour augmenter l'énergie cinétique des molécules. L'élévation de température s'en trouve ainsi réduite.

Cette résistance aux variations de température, qui de prime abord semble bien abstraite, a des conséquences climatiques importantes. Les océans, le plus grand réservoir d'eau liquide sur Terre, jouent ainsi le rôle de régulateur thermique du climat grâce à leur importante capacité calorifique.

Une constante diélectrique bien pratique. L'enchaînement des molécules d'eau par des liaisons hydrogène donne aussi à l'eau liquide des propriétés diélectriques tout à fait remarquables. En effet, les molécules ainsi liées se polarisent mutuellement (2). Cette polarisation mutuelle augmente énormément la réponse du liquide à un champ électrique appliqué. Ainsi, la constante diélectrique de l'eau liquide est bien plus élevée que celle qu'on attendrait pour un liquide non associé sur la base du moment dipolaire de la molécule isolée (3).

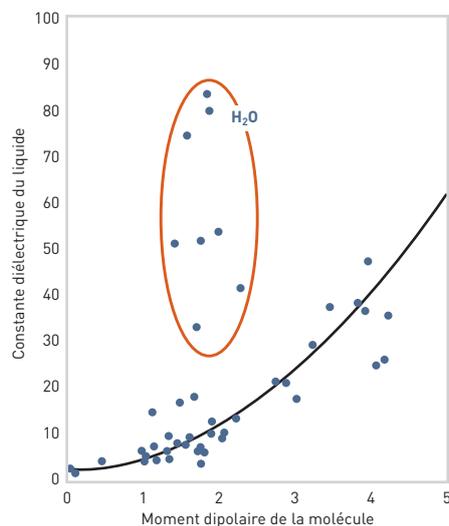
C'est grâce à cette constante diélectrique exceptionnelle que la vie a pu se développer dans l'eau. La plupart des molécules biologiques sont en effet ioniques, et les processus biochimiques requièrent la dissociation des paires d'ions et l'écrantage des charges électriques. C'est la polarisation des molécules d'eau autour d'un ion qui compense le champ électrique créé par l'ion. Et cela permet ainsi la dissociation des paires d'ions et la dissolution des cristaux ioniques. C'est ainsi que nous pouvons dissoudre 360 g de sel de table par litre d'eau, tandis que l'eau de mer, pourtant bien salée, n'en contient que 17 g.

Un liquide plein de vides. Dans l'eau liquide, chaque molécule n'a que 4,5 voisines en moyenne. L'arrangement des molécules laisse donc beaucoup de cavités, qui jouent un rôle important pour la dissolution des gaz dans l'eau. C'est ainsi que les poissons respirent. L'eau est donc, dans les conditions usuelles de température et de pression, un liquide peu dense. Sa masse volumique ($1\ 000\ \text{kg/m}^3$) est relativement peu élevée pour un liquide aussi cohésif. À titre de comparaison, le néon, avec le même nombre de protons et d'électrons, a une masse volumique de $1\ 200\ \text{kg/m}^3$.

Ainsi l'eau présente toute une série d'anomalies liées aux variations de son volume. Tout d'abord, la variation en température de sa masse volumique est anormale à basse température. Pour presque tous les liquides, le volume occupé diminue régulièrement lorsqu'on abaisse la température, par suite de la réduction du désordre et surtout du nombre de lacunes excitées thermiquement. Au contraire, l'eau se dilate quand on la refroidit en dessous d'une température appelée température du maximum de densité (TMD = $+4\ ^\circ\text{C}$ pour H_2O). L'eau liquide à basse température est un liquide peu dense par rapport à ce qu'on attendrait d'après sa densité à haute température (4).

Pour presque tous les liquides, le volume occupé se réduit d'environ 10 % lors de la cristallisation, car les atomes ou les molécules sont empilés de manière plus efficace dans le cristal. Au contraire, l'eau se dilate d'environ 9 % en cristallisant. Cette augmentation de volume, qui fait flotter la glace sur l'eau, a des conséquences environnementales considérables. Si la glace était plus dense que l'eau liquide, toute la

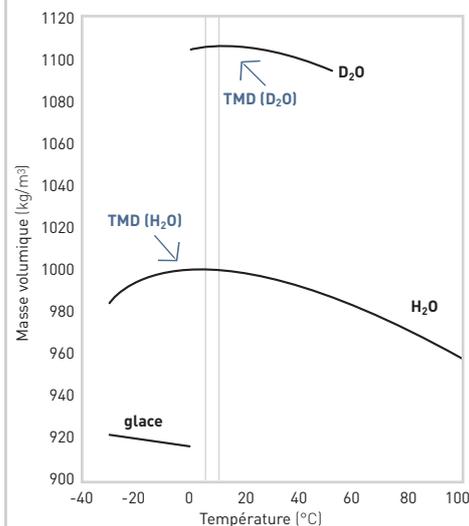
► **3** Constantes diélectriques relatives des liquides polaires usuels (variation parabolique en fonction du moment dipolaire de la molécule isolée) et de liquides associés points situés très au-dessus). La valeur anormalement élevée de la constante diélectrique de l'eau est due à la polarisation mutuelle des molécules dans le liquide



glace formée dans les régions arctiques coulerait au fond des océans au lieu de former une banquise qui les isole thermiquement des températures extérieures. La production de glace continuerait alors jusqu'à la congélation complète des océans !

Pied de nez de l'eau bâillonnée. Les propriétés de l'eau confinée dans des pores ou des films nanométriques diffèrent aussi de celles des autres liquides. La plupart des liquides se stratifient lorsqu'ils sont confinés entre deux surfaces planes, et ils résistent comme des solides lorsqu'on essaie de les faire s'écouler. Au contraire, l'eau reste fluide même dans des géométries extrêmement confinées. Cette résistance à la solidification semble être due aux anomalies volumiques de l'eau, qui devient plus fluide lorsqu'elle est soumise à une pression. La persistance de l'état fluide de l'eau est capitale pour le fonctionnement des cellules biologiques. En effet, de nombreux processus requièrent le déplacement de couches d'hydratation avant le contact entre macromolécules. De même le passage des ions à travers les canaux qui traversent les membranes des êtres vivants n'est possible que grâce à la fluidité de cette eau confinée.

L'eau, un solvant différent. Les propriétés de l'eau comme solvant sont également très surprenantes. On comprend bien que les molécules polaires ou ioniques se dissolvent facilement dans l'eau, tandis que les molécules apolaires se dissolvent beaucoup plus difficilement. Cette préférence est à l'origine de phénomènes physicochimiques comme la micellisation des molécules de tensioactifs, la formation des membranes biologiques, et le repliement ou la dénaturation des protéines. Cependant le passage dans l'eau de ces molécules hydrophobes ou amphiphiles se fait de manière tout à fait anormale. Alors que la dissolution dans n'importe quel solvant est un processus défavorable du point de vue des énergies, mais favorisé par l'entropie, c'est l'inverse qui se produit pour la dissolution des molécules apolaires dans l'eau. Ces effets varient fortement avec la température. Et on trouve que les solubilités augmentent aussi bien quand on va vers les basses températures, les poissons qui respirent l'oxygène dissous en profitent, que lorsqu'on va vers les températures élevées, auxquelles on retire aisément la gênante caféine grâce à de l'eau supercritique.



▲ **4** Variation de la masse volumique de l'eau liquide avec la température. Pour les liquides « normaux », la masse volumique décroît de manière monotone. La température du maximum de densité de l'eau vaut 4 °C dans H₂O, 11,2 °C dans D₂O et 13,4 °C dans T₂O. La décroissance de la densité à basse température résulte d'un changement de la structure du liquide, qui crée systématiquement des liaisons et des cavités.



◀ De la cerise de café (ici sur un plan de café au Brésil) à votre tasse de décaféiné, il y en a des étapes, dont une qui a lieu grâce aux fluides supercritiques : l'extraction de la caféine !

À quand une théorie pour rassembler toutes ces incroyables propriétés ? Les théories anciennes attribuaient toutes ces anomalies au fait que les molécules d'eau sont liées par des liaisons H. En ce sens, l'eau devrait avoir des propriétés « en ligne » avec celles d'autres liquides associés (éthanol, glycols, formamide). Pour les propriétés de cohésion, c'est une bonne hypothèse de départ – bien que les propriétés de l'eau (densité d'énergie cohésive, constante diélectrique) soient supérieures à celles des liquides comparables. Pour les autres propriétés, cette explication n'est pas suffisante : les autres liquides associés ne partagent pas les propriétés volumiques anormales de l'eau, ni son polymorphisme, ni son comportement comme solvant.

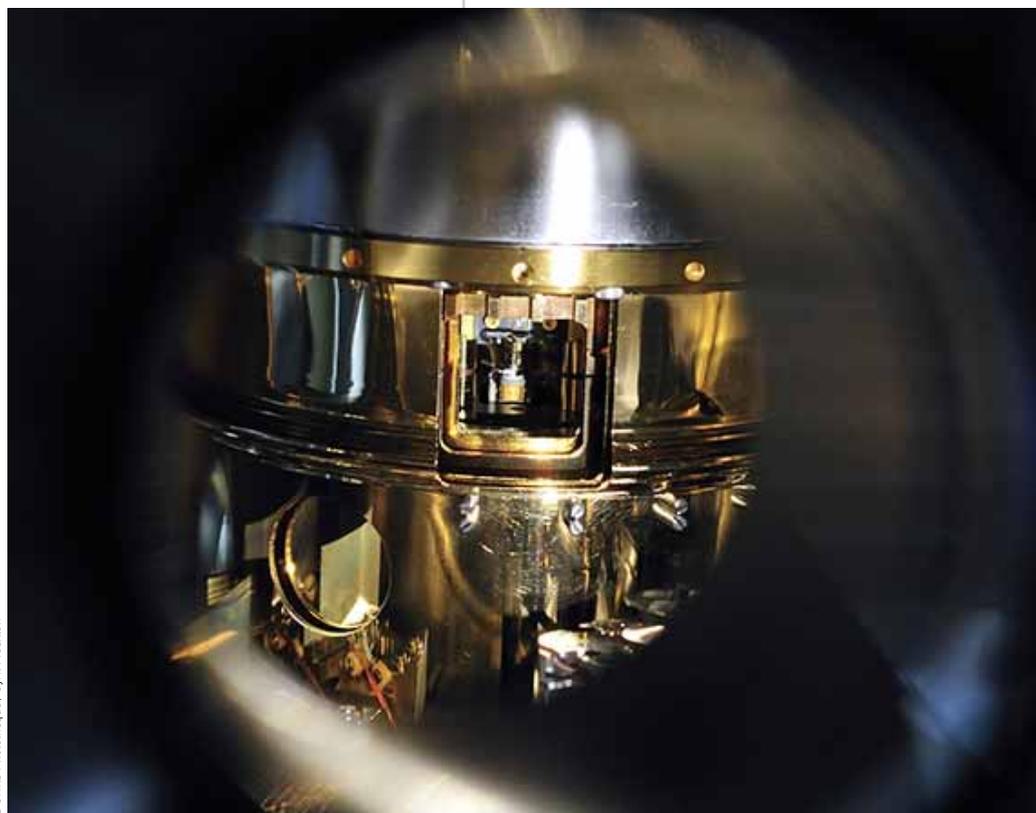
Nous découvrirons peut-être un jour que chacune des propriétés anormales de l'eau existe aussi dans un autre liquide. Cependant il est remarquable qu'un seul liquide rassemble autant d'anomalies. Il y a donc un besoin d'explication, auquel ne répondent pas les théories développées pour les liquides simples.

On ne compte plus les théories proposées pour expliquer telle ou telle anomalie de l'eau, et abandonnées parce qu'elles n'expliquent que certaines anomalies, mais pas l'ensemble des propriétés de l'eau. On peut ainsi citer la théorie des icebergs dans sa version liquide pur (l'eau liquide serait formée de petits groupes de molécules ayant la structure de la glace, séparées par un liquide désordonné) et dans sa version solvant (les molécules d'eau se réorganiseraient autour d'un soluté apolaire pour former plus de liaisons hydrogène que l'eau pure, ce qui expliquerait le coût

entropique de l'introduction du soluté). De nombreuses théories ont aussi postulé des structures particulières, comme des structures de type clathrates, semblables aux cages que forment les molécules d'eau dans les hydrates de gaz cristallins. On discute actuellement une série de modèles qui postulent que l'eau serait formée de deux liquides mélangés dans des proportions qui changeraient avec la température et la pression, mais ne se sépareraient que dans des conditions de température inaccessible aux expériences.

Il peut sembler paradoxal qu'une civilisation qui comprend la physique de l'infiniment grand et de l'infiniment petit, et qui est capable de prouesses technologiques considérables, n'arrive pas à décrire le liquide dans lequel tous les systèmes vivants fonctionnent. En fait, il s'agit d'un problème dur. Les verrous tiennent, pour une part, à une limitation des

informations expérimentales. En effet, nous ne savons pas mesurer, dans un liquide, les fonctions de corrélation qui décrivent les arrangements de petits groupes de molécules (trois ou plus). Depuis un demi-siècle, nous sommes limités aux fonctions de corrélation de paires. Ils sont aussi dus à notre incapacité à simplifier correctement la description d'un liquide dans lequel les molécules forment des liaisons ayant un fort caractère orientationnel. Nous savons, bien sûr, décrire ces liaisons, et nous pouvons simuler numériquement les mouvements des molécules soumises à ces interactions et à l'agitation thermique. Nous pouvons ainsi reproduire certaines propriétés du liquide (mais pas toutes à la fois !) Par contre, nous ne savons pas, actuellement, construire une théorie de l'eau en utilisant les outils de la physique statistique. De formidables découvertes sont encore en perspective. **B.C.**



© CNRS Photographique / Cyril Fesillon

▲ Image du cryostat du microscope à effet tunnel permettant d'atteindre une température limite de 4,5 kelvin. Ce microscope est dédié à l'observation de molécules isolées déposées sur des surfaces métalliques.



◀ Pilote (à gauche) de traitement de la matière organique dans un réacteur (à droite) utilisant l'eau supercritique comme milieu favorisant la transformation chimique. L'objectif de cette recherche est d'optimiser les paramètres opératoires pression-température pour comprendre et contrôler la réactivité chimique des molécules organiques dans l'eau supercritique. Par exemple, pour des pressions de l'ordre de 25 à 30 MPa, la transformation de la biomasse peut alors être envisagée pour produire dès 400 °C des molécules valorisables en vue d'applications en chimie fine, ou pour générer à plus haute température (600 à 700 °C) de l'hydrogène en vue d'applications en énergie.

EAU SUPERCRITIQUE

L'eau est dite supercritique pour des pressions et des températures supérieures à celles de son point critique liquide-vapeur, c'est-à-dire supérieures à une pression d'environ 22 Mpa et une température de 374 °C.

Pour un fluide supercritique, les notions de liquide ou de vapeur deviennent inappropriées : l'eau supercritique peut alors ressembler à l'eau liquide (en étant presque aussi dense) ou acquérir des propriétés comparables à celles de la vapeur d'eau (viscosité, diffusion thermique).

Dès lors, comprendre le comportement des fluides lithosphériques dans leur environnement géologique, ou optimiser l'utilisation à haute pression et haute température des mélanges de fluides contenant de l'eau, sont autant de démarches qui nécessitent une connaissance approfondie des propriétés physicochimiques des milieux aqueux supercritiques.

Ainsi, la densité élevée de l'eau supercritique permet de solubiliser à plus haute température des oxydes insolubles dans l'eau liquide. Une valeur très faible de sa constante diélectrique est responsable de la précipitation des sels habituellement dissous dans l'eau liquide. Une diffusivité élevée autorise la formation d'une flamme froide aux environs de 500 °C et 25 MPa lors de l'oxydation complète d'un alcane dans un mélange eau-oxygène supercritique.

Au-delà de ces exemples, ce sont aujourd'hui les propriétés particulières de réactivité chimique qui confèrent à l'eau supercritique un intérêt majeur pour développer une chimie inscrite dans un schéma de développement durable. Après avoir permis de mettre en œuvre des voies alternatives dans le retraitement des déchets par oxydation en eau supercritique, la recherche d'une meilleure compréhension des réactions chimiques complexes en milieu aqueux supercritique autorise maintenant de nouvelles voies de synthèse de matériaux, de nouveaux procédés d'élaboration de nanomatériaux structurés et fonctionnalisés, ou encore une transformation originale de la biomasse utilisée comme ressource organique renouvelable. **Y.G.**

L'EAU DANS TOUS SES ÉTATS

■ Bernard Cabane

Laboratoire de physique et mécanique des milieux hétérogènes (PMMH), CNRS, École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI), universités Paris VI-VII

■ Yves Garrabos

Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux (ICMCB), CNRS

■ David Quéré

Physique et mécanique des milieux hétérogènes, École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI)

L'EAU OU LE CUMUL DES FONCTIONS

EN CES TEMPS DE MODIFICATIONS CLIMATIQUES, L'ÉTUDE DES INTERACTIONS ENTRE L'EAU ET LE CLIMAT EST UNE NÉCESSITÉ DE PLUS EN PLUS PRÉGNANTE POUR RÉPONDRE À DES QUESTIONS SOCIÉTALES LÉGITIMES ET ESSENTIELLES CONCERNANT L'ENVIRONNEMENT ET LE DÉVELOPPEMENT DURABLE. CETTE ÉTUDE SE FAIT CHAQUE JOUR DANS LES LABORATOIRES ASSOCIÉS CNRS EN PARTENARIAT AVEC DE NOMBREUX ORGANISMES ET DANS UNE INTERDISCIPLINARITÉ GRANDISSANTE. PHYSICIENS, CHIMISTES, HYDROLOGUES, MATHÉMATICIENS, GÉOGRAPHES, SOCIOLOGUES TRAVAILLENT DE CONCERT POUR MIEUX COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME TERRE.



▲ Vue du paravent aval du barrage-voûte du Monteynard de l'aménagement hydroélectrique EDF du Drac (Isère). Hauteur et volume du barrage, 153 m et 457 000 m³, respectivement. Volume de la retenue : 275 hm³.

■ LA FONCTION HYDROÉCOLOGIQUE, L'EAU ET LE CLIMAT

Une des structures particulièrement féconde pour fédérer l'activité de recherche a été le programme national multiorganismes Écosphère continentale : processus, modélisation et risques environnementaux (Ecco).

Ecco, tout un programme... aux résultats nombreux et heureux. Le programme Ecco a contribué à l'émergence et à la consolidation d'actions d'envergure destinées à structurer et fédérer les communautés scientifiques des surfaces et interfaces continentales autour de problématiques prioritaires. Ces communautés ont convergé sur la nécessité :

- d'acquérir sur le long terme des observations fiables et spatialisées permettant l'identification des tendances évolutives, la détection des ruptures d'équilibre, l'occurrence des phénomènes extrêmes ;
 - d'assurer une standardisation aussi poussée que possible des méthodes de mesure, des stratégies d'échantillonnage, et de la constitution de bases de données ;
 - de développer et tester de nouveaux capteurs et traceurs environnementaux ; de dégager la meilleure synergie possible dans le triptyque observations / expérimentations / théories-modèles ;
 - de valoriser les données communes par la modélisation et l'échange de codes numériques ;
 - de mutualiser les savoir-faire dans l'étude et la gestion des sites et des crises.
- Parmi les actions de recherche ayant émergé d'Ecco dans le domaine de l'eau, on citera de façon non exhaustive :
- le développement d'approches mécanistes intégrant les transferts d'échelle nécessaires à la compréhension de l'hydrodynamique et l'hydrochimie des bassins versants et des réservoirs souterrains ;
 - l'étude du ruissellement, de l'infiltration, de la dynamique des états de surface du sol et du transfert de sédiments à différentes échelles spatiales et temporelles, dans différents contextes géologiques, pédologiques, hydrologiques et édaphiques ;
 - la caractérisation des circulations hydriques de subsurface, dans le sous-sol et la

ECCO EN QUELQUES CHIFFRES

125 projets de recherche soutenus en 4 ans

450 équivalents temps plein chercheurs et enseignants chercheurs

150 équivalents temps plein ingénieurs, techniciens, administratifs

680 publications dans des revues internationales à comité de lecture

780 communications à divers congrès et colloques nationaux et internationaux

300 thèses soutenues ou en cours

modélisation hydrogéologiques 4D par méthodes géophysiques non destructives ;

- les approches multiéchelles et pluriannuelles de la variabilité du fonctionnement des hydrosystèmes et des écosystèmes ;
- la mise en œuvre du couplage atmosphère-hydrosphère pour la modélisation et la prévision des phénomènes de crues rapides ;
- l'étude de la dynamique des virus dans le fonctionnement des réseaux trophiques lacustres.

Les recherches sur l'eau et le climat, quel devenir ? Il est maintenant acquis qu'une meilleure compréhension et modélisation de la structure, du fonctionnement des hydro-écosystèmes et de la dynamique des surfaces et interfaces continentales, qui sont par essence hétérogènes, complexes, non linéaires et socialement marquées, requièrent une approche intégrée, pluridisciplinaire, de type systémique. Ces prochaines années, les principaux objectifs scientifiques à atteindre, dans le domaine de l'eau et des flux

associés viseront notamment à :

- améliorer et hiérarchiser la représentation et la modélisation des processus physiques, chimiques, biologiques et leur couplage selon les différentes composantes des milieux et selon les échelles ;
- mieux décrire, représenter et modéliser les relations entre la structure et le fonctionnement des écosystèmes ;
- comprendre, estimer, et prévoir les impacts environnementaux des changements globaux (climatique et anthropique), notamment à l'échelle régionale ou du paysage ;
- comprendre et modéliser les échanges de matières et d'énergie aux interfaces de différents compartiments de l'écosphère continentale et côtière ;
- approfondir la connaissance des phénomènes qui gouvernent la présence de multicomposants chimiques dans les milieux (sources et introduction), de

leur transfert et transformations, ainsi que celle des effets toxiques associés ;

- quantifier et surtout réduire les incertitudes de la modélisation, notamment des extrêmes environnementaux ;
- encourager les approches et analyses rétrospectives, notamment de la biodiversité, des changements globaux, des crises hydrologiques et environnementales ;
- évaluer la vulnérabilité des hydrosystèmes et des écosystèmes, de leurs services associés, et d'élaborer des méthodes et outils de mitigation, de restauration, de remédiation et de gestion, incluant l'ensemble des parties prenantes.

Tous ces objectifs sont notamment au service d'une meilleure compréhension du rôle de l'eau dans les changements climatiques permettant des prévisions et préventions accrues des aléas naturels en vue de développer des stratégies d'anticipation, de résistance et de résilience des systèmes physiques et sociaux. **M.V.**



▲ Bassin versant rural de l'Orgeval de 104 km² (Seine-et-Marne).



▲ Jaugeage par dilution chimique pour la mesure de débit des cours d'eau, par injection d'un traceur (ici la fluorescéine). Méthode bien adaptée aux cas des écoulements turbulents en torrents et rivières à forte pente, ainsi qu'aux milieux karstiques.



◀ Échelle limnimétrique à ultrasons pour l'enregistrement en continu du niveau de l'eau et permettant d'établir sa relation avec le débit d'un cours d'eau.

■ LA FONCTION BIOLOGIQUE, EAUX CONTINENTALES ET BIODIVERSITÉ

La biodiversité des eaux continentales se réduit dramatiquement depuis de nombreuses décennies. L'eau a souvent été mise au service des sociétés sans que l'on se préoccupe du maintien de cette diversité du vivant et d'un équilibre durable entre le fonctionnement des écosystèmes et les activités humaines. Depuis la Convention internationale de 1992 à Rio, l'objectif de la stratégie européenne est d'enrayer le déclin de la biodiversité d'ici à 2010. La Directive cadre sur l'eau de l'Union européenne vise quant à elle à un bon état écologique des écosystèmes aquatiques en 2015. Les recherches actuelles doivent fournir les bases scientifiques pour quantifier, limiter, voire inverser le processus d'érosion de la biodiversité et atteindre ce bon état écologique.

Une biodiversité menacée. Bien que représentant une fraction négligeable des eaux de la planète, les eaux douces abritent une biodiversité considérable, avec 12 % des espèces connues dont 25 % des vertébrés continentaux. Cette biodiversité est très menacée. Environ 20 % des espèces de poissons d'eau douce sont en voie d'extinction ou ont disparu, et 30 à 40 % des oiseaux menacés en Europe dépendent des zones humides.

La destruction des milieux naturels représente la première cause de régression de la biodiversité. La flore et la faune aquatiques ont diminué de 50 % en 30 ans du fait de la surexploitation et de la dégradation des habitats. La moitié des zones humides ont disparu en un siècle. Une rivière sur deux est gravement polluée et 60 % des grands cours d'eau ont été canalisés, régulés et fragmentés par des barrages. Ceci a entraîné l'uniformisation de leurs biocénoses et la perte des espèces les plus sensibles aux perturbations.

Les introductions d'espèces représentent la deuxième cause de régression. La jacinthe d'eau du Brésil a envahi de nombreux écosystèmes en Afrique. Elle gêne fortement la pêche et favorise certains vecteurs d'épidémies. Les tortues de Floride ont été exportées massivement dans le reste du monde, et notamment en Europe entre 1975 et 1997. Elles menacent d'exclure des espèces autochtones comme la cistude d'Europe. La mise en relation des réseaux hydrographiques et les introductions ont favorisé l'expansion de certaines espèces résistantes et peu exigeantes. Des travaux récents ont

démonstré que l'établissement de poissons exotiques dans les fleuves de la planète résulte essentiellement des activités humaines.

Comprendre la biodiversité. Certaines recherches concernent la caractérisation génétique, phylétique et écologique des organismes, dont de nombreux groupes, comme les micro-organismes, sont encore mal connus. D'autres recherches visent à identifier les points chauds du globe en terme de diversité ou de sensibilité aux perturbations de l'environnement et aux invasions d'espèces. Des chercheurs s'intéressent aux déterminants de la biodiversité, et notamment aux effets à court et à long terme des perturbations anthropiques, comme la modification des communautés piscicoles, l'eutrophisation des eaux ou le réchauffement climatique. Des analyses de séries chronologiques en rivières et en lacs démontrent la raréfaction de certaines espèces sensibles au profit d'espèces plus thermophiles, mais aussi les modifications des pics de développement des espèces et des changements en conséquence des réseaux d'interaction au sein des communautés. De telles recherches nécessitent parfois la mise en place de systèmes expérimentaux complexes, allant de microcosmes de quelques dizaines de millilitres à des macrocosmes in situ de plusieurs dizaines ou centaines de mètres cube.



© CNRS Photothèque / Jean-Yves Pontalier

▲ Capteurs de rayonnement direct, diffus et réfléchi placés sur une « tour à flux » destinée à mesurer les échanges de carbone (sous forme de gaz carbonique) et de vapeur d'eau entre une forêt de chênes et l'atmosphère (forêt domaniale de Barbeau, Seine et Marne).



© CNRS Photothèque / Hervé Thiéry

▲ Le barrage d'Itaipù, sur le Paraná, est le plus puissant au monde (même après la mise en service de celui des Trois-Gorges, en Chine) car son alimentation est plus régulière. Il fournit à lui seul près du quart de l'énergie électrique consommée par le Brésil.



Développer une exploitation durable des ressources. Conserver la biodiversité nécessite des actions de conservation sur certaines espèces et des pratiques durables d'exploitation des ressources. Des recherches visent par exemple à comprendre l'impact de la sélection directionnelle liée à l'exploitation des poissons (les pêcheries ciblent préférentiellement les plus grands individus) sur l'évolution des caractéristiques démographiques des populations. Face à l'augmentation de la pression sur les ressources, des stratégies alternatives sont recherchées, par exemple à travers une aquaculture intégrée, optimisant la production et limitant les pollutions génétiques et chimiques des milieux aquatiques environnants.

Restaurer et recréer les écosystèmes. Le maintien de la biodiversité suppose aussi la protection des milieux, notamment des zones humides et des zones riveraines, et la réduction de la pollution par les pesticides et autres substances chimiques actives, qui affectent la majorité des eaux superficielles. Il est parfois nécessaire de recréer la nature. Des zones inondées sont réaménagées. On élargit le lit de certaines rivières pour leur permettre de divaguer et pour diversifier les habitats. Des recherches sont menées pour que les systèmes aquatiques artificiels créés pour les besoins de l'humain, assurent au mieux les fonctions écologiques des milieux naturels, par exemple en termes de conservation de la biodiversité, de régulation des eaux, ou de recyclage des éléments.

Construire les bases de l'ingénierie écologique. Des travaux scientifiques pluridisciplinaires sont développés à l'échelle des bassins versants ou des bassins hydrographiques pour une gestion écologique des espèces et des écosystèmes aquatiques. Cela nécessite par exemple de comprendre le rôle de la diversité des paysages et des voies de circulation entre des espaces naturels de plus en plus fragmentés par les activités humaines. D'autres recherches visent à comprendre le couplage entre diversité taxonomique et diversité fonctionnelle, afin de maintenir les services rendus par les écosystèmes. De manière globale, il s'agit d'établir les bases scientifiques de l'ingénierie écologique pour concilier maintien de la biodiversité et développement soutenable de la planète. **G. L.**

▼ Échantillonnage aléatoire dans le cadre de recherches menées pour l'optimisation d'élevages extensifs et semi-extensifs de juvéniles de poissons en marais salés charentais.



© CNRS Photothèque / Hubert Raguet

▼ Lac d'altitude de la Puna d'Atacama, un plateau andin à presque 4 000 m d'altitude qui s'étend sur environ 80 000 km², dominé par des alignements volcaniques.



© CNRS Photothèque / Hervé Thiéry

■ LA FONCTION CHIMIQUE, L'EAU SOLVANT RÉACTIONNEL

L'eau peut être considérée comme le solvant réactionnel le plus répandu sur Terre. Toutes les transformations biochimiques effectuées au sein des organismes vivants se déroulent dans un environnement aqueux. Et pourtant utiliser l'eau comme solvant n'est pas une mince affaire.

L'eau, un composé à la structure épatante. Le rôle clef de l'eau dans ces processus biologiques s'explique incontestablement par la structure unique de l'eau (→ L'eau dans tous ses états, page 24) qui induit des propriétés remarquables comme l'effet hydrophobe. Celui-ci est responsable, par exemple de la formation et de la stabilisation des membranes cellulaires et joue un rôle important dans tous les processus de reconnaissance moléculaire. L'eau en tant que solvant permet aux assemblages biologiques de se structurer et d'avoir une activité biologique.

Bien que l'eau soit le solvant par excellence de toutes les réactions biochimiques rencontrées dans la nature et de quelques procédés industriels qui l'utilisent à la fois comme solvant et réactif depuis de longues années, le développement de l'eau comme milieu réactionnel ne s'est fait que très tardivement.

Une explication à cela : la faible solubilité des molécules organiques dans l'eau et l'instabilité de certains réactifs ou intermédiaires dans ce milieu ont dissuadé les chimistes pendant de nombreuses années. Ce n'est que dans les années 1980 que l'intérêt de ce solvant naturel est réellement perçu. En effet, Ronald Breslow montre que

les réactions peuvent être plus rapides dans l'eau qu'en solvant organique. Et son confrère Émile Kuntz que des complexes organométalliques peuvent être solubilisés dans l'eau.

Les travaux de ces deux chercheurs ont connu des développements extrêmement rapides et importants au cours de ces vingt dernières années. De très nombreuses réactions de la chimie organique (réaction de Diels-Alder, cycloadditions, réarrangements de Claisen, aldolisation, oxydation, réduction...) ou nécessitant un catalyseur organométallique (hydrogénation, hydroformylation, carbonylation, métathèse, télomérisation, oligo- ou polymérisation, couplage carbone-carbone...) ont pu être conduites avec succès dans ce solvant ou dans un système biphasique eau / solvant organique.

L'eau, un liquide aux propriétés insoupçonnées.

En outre, la possibilité de solubiliser dans l'eau des complexes organométalliques a ouvert la voie au développement de procédés industriels plus économiques et respectueux de l'environnement. Le premier de ces procédés fut développé conjointement par les sociétés Rhône-Poulenc et Ruhrchemie dès 1984 pour synthétiser le butanal à partir du propène (par une réaction d'hydroformylation) avec une capacité de 100 000 t/an. En 2005, environ 890 000 tonnes de butanal étaient produites dans le monde par l'intermédiaire de ce procédé, soit 13 % de la production mondiale. Cette réaction est en fait catalysée par un complexe du rhodium immobilisé dans une phase aqueuse à l'aide d'une phosphine très hydrosoluble et non toxique : le sel de sodium de la triphénylphosphine trisulfonée. Le butanal est récupéré en fin de réaction par simple décantation du milieu réactionnel et des analyses montrent que cette phase ne contient que des traces infimes de métal.

▼ Usine Oxea GmbH qui synthétise le butanal à partir du propène en utilisant un catalyseur hydrosoluble.



Pourvu que les réactifs et les produits de la réaction soient stables dans un environnement aqueux, l'eau apparaît de nos jours comme une alternative réaliste aux solvants organiques. En effet, sa grande disponibilité, son faible coût, son absence de toxicité et la possibilité d'utiliser des additifs pour solubiliser des quantités importantes de molécules organiques hydrophobes (tensioactifs ou récepteurs moléculaires par exemple) font de l'eau un milieu réactionnel de plus en plus privilégié par le chimiste. D'autre part, ce solvant étant polaire, il est particulièrement propice à l'utilisation de micro-ondes ou d'ultrasons, qui permettent, dans de nombreux cas, de diminuer considérablement les conditions réactionnelles (température, temps de réaction) tout en améliorant les sélectivités des réactions.

L'eau liquide, c'est bien mais l'eau supercritique c'est encore mieux. L'eau a un potentiel important et pas seulement dans son état liquide. La plupart des études portent sur l'eau liquide comme solvant, mais l'eau dans son état supercritique (à une température de 374,2 °C et une pression de 22,1 MPa) a un comportement très différent de l'eau liquide. Sa constante diélectrique est particulièrement intéressante. Dans ces conditions, elle se rapproche en effet de celle de certains solvants organiques. La réactivité des molécules organiques dans l'eau supercritique est généralement différente de celle observée dans l'eau liquide. Dans le futur, l'eau supercritique offrira incontestablement de nouvelles opportunités aux chimistes. **E. M.**

■ LA FONCTION HYDRAULIQUE, L'EAU SOURCE D'ÉNERGIE

Les gisements d'énergie hydroélectrique, à l'inverse des gisements minéraux (houille, pétrole, gaz) non renouvelables, revêtent la forme d'un flux inépuisable constamment entretenu par le cycle naturel de l'eau. En outre, leur utilisation, si elle exige des investissements initiaux parfois considérables, ne demande plus par la suite qu'un effort modéré d'entretien et de renouvellement. L'hydroélectricité représentait, en 2002, 19 % de toute l'énergie électrique produite dans le monde (rapport UNIDO, 2003). Sur la même période d'autres énergies renouvelables se sont développées (géothermique, photovoltaïque, éolienne).

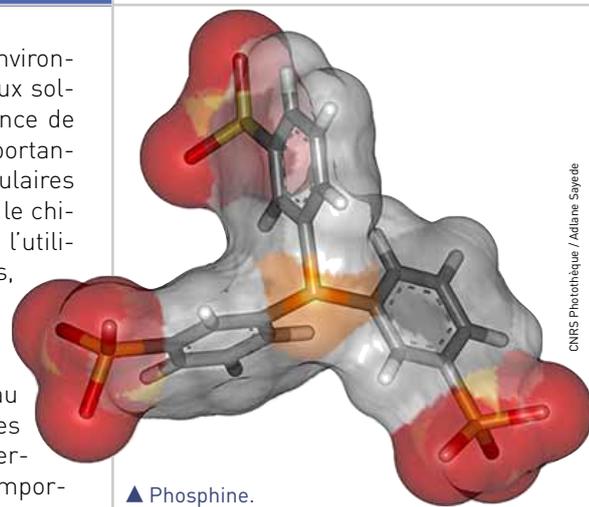
L'eau, une énergie renouvelable parmi tant d'autres ? L'énergie hydraulique est reconnue comme une source d'énergie renouvelable. Son rôle dans la production d'électricité est crucial. Il existe différents types d'installations délivrant une puissance hydraulique, selon les besoins et les conditions présentes : les réservoirs type barrage, les stockages pompés (deux réservoirs ayant une différence de hauteur importante) et le fil de l'eau qui utilise un courant d'eau sans stockage.

La structure générale d'un complexe hydroélectrique dépend des caractéristiques hydrologiques, géologiques et topographiques du milieu. Certains pays comme la Chine, ont construit des centrales hydroélectriques de petite taille dont les capacités de production varient entre 1 kW et 1 MW. Cela a permis de fournir de l'électricité dans des zones rurales. Les centrales hydroélectriques de petite taille présentent des avantages de coût mais permettent également de contrôler plus facilement les inondations, l'irrigation, le stockage et l'approvisionnement en eau. Les centrales hydroélectriques contribuent également à combattre la pauvreté à travers un développement socio-économique, en créant des opportunités d'emplois locaux et en améliorant le confort de la vie rurale.

La question des énergies renouvelables est traitée depuis plusieurs années au CNRS. Des recherches ont été engagées sur les biocarburants, le photovoltaïque, l'éolien. Un programme interdisciplinaire de recherche du CNRS sur l'énergie existe depuis 2002 et tient compte de l'évolution récente des enjeux dans ce domaine et vise en particulier :

- l'indépendance énergétique et la sécurité de l'approvisionnement ;
- la maîtrise de la demande d'énergie ;
- la préservation de la santé humaine et de l'environnement, entre autres en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre.

Les orientations retenues par le programme Énergie se déclinent en trois grands axes : l'amélioration de l'efficacité énergétique, la production d'énergie en limitant les émissions de CO₂, la promotion et la complémentarité des vecteurs hydrogène, électricité et chaleur.



▲ Phosphine.
Représentation de la triphénylphosphine trisulfonée



© MétéoFrance.

▲ Pluviomètre totalisateur agréé par Météo France.

L'utilisation d'énergie provenant d'une source hydraulique plutôt que de sources non renouvelables est globalement positive pour l'environnement. Cependant les impacts environnementaux peuvent être très importants, surtout lors de la mise en place de structures souvent lourdes permettant la récupération d'énergie hydraulique. En effet, quelle que soit la taille de l'installation, il faut faire de sérieuses études d'incidence sur l'environnement avant de construire une installation hydraulique. Par le passé, les barrages construits ont conduit au dépeuplement des rivières en espèces migratrices comme les anguilles ou les saumons.

Certaines recherches récentes émettent de très sérieux doutes sur le bilan en gaz à effets de serre des systèmes hydroélectriques. L'activité bactériologique dans l'eau des barrages (surtout en régions tropicales) relâcherait d'énormes quantités de méthane (gaz ayant un effet de serre 20 fois plus puissant que le CO_2). C'est pourquoi, l'avenir de l'électricité d'origine hydraulique est principalement focalisé sur la petite hydraulique.

La force houlomotrice, une énergie qui ne fait pas de vagues. D'autres sources d'énergie hydraulique ne présentant pas ces inconvénients sont désormais envisagées. Les vagues à la surface des mers peuvent également fournir de l'énergie. Ces vagues sont créées par le vent. La quantité d'énergie générée est faible ($1 \text{ W/m}^2/\text{an}$) soit 200 fois moins que d'énergie solaire directe. Mais comme les vagues se déplacent de manière très économe, on peut espérer récupérer presque toute l'énergie créée sur de vastes surfaces marines en installant des capteurs le long des côtes.

Il existe trois types de dispositifs pour récupérer l'énergie des vagues : des bouées en mouvement, des colonnes oscillantes, des débordements de chenal.

Une centrale électrique, destinée à récupérer l'énergie des vagues, est en train de voir le jour dans l'archipel portugais des Açores. La turbine de cette centrale pilote européenne sera actionnée par air comprimé par la montée et la redescente de l'eau de mer dans une chambre étanche, sous l'effet de la houle.

Depuis 2003, le Laboratoire de mécanique des fluides de Nantes (UMR CNRS 6598) développe un ingénieux système appelé Searev (Système électrique autonome de récupération de l'énergie des vagues) qui utilise l'énergie de la houle. L'appareil ressemble à un petit sous-marin et sera immergé à une dizaine de kilomètres des côtes.

Pour constituer une ferme houlomotrice, une flotte de plusieurs dizaines de modules Searev soigneusement balisée pour ne pas gêner la navigation, sera ancrée en formation serrée, par 30 à 50 m de fond, à 5 ou 10 km des côtes. En cas d'avarie à bord d'un des modules, les autres continueront à produire de l'électricité. Facile à décrocher et à remorquer, l'unité en avarie pourra être réparée dans un chantier naval portuaire, puis remise en place.

L'impact sur l'environnement ? Depuis la côte, la ferme houlomotrice, dont les flotteurs se trouvent au ras de l'eau, sera quasiment invisible, contrairement aux éoliennes en mer, une pollution visuelle qui déclenche des réactions de rejet de plus en plus nombreuses. Et bien sûr, pas de gaz à effets de serre. Ce dispositif pourrait se développer sur toutes les côtes européennes. **B. B.**



© LTHE / CNRS

◀ L'Isère, une rivière peu tranquille. Dans la nuit du 29 au 30 mai 2008, suite à une pluviométrie abondante (200 mm) et à la fonte des neiges, le débit mesuré à la station hydrométrique de Grenoble Campus a atteint $895 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une valeur très proche de la crue décennale estimée à $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$.

UNITÉ MIXTE INTERNATIONALE UMI 3157
« WATER, ENVIRONMENT AND PUBLIC POLICY »
CNRS / UNIVERSITY OF ARIZONA ETATS UNIS

À l'initiative des Départements SHS, EDD et de l'INSU a été créée une UMI unité mixte internationale entre le CNRS et l'University of Arizona (Tucson) en date du 1^{er} Octobre 2007 pour quatre ans renouvelables.

La mission de l'UMI est de développer la recherche interdisciplinaire, comparative internationale sur l'eau. Son objectif est de créer de nouveaux partenariats entre des scientifiques des sciences humaines et sociales, de sciences de l'Univers et de l'environnement travaillant ensemble sur des problèmes communs pour développer les opportunités de recherche et mettre en place des recherches communes dans le monde.

Un comité scientifique international assure le suivi de ses activités.

Directeur : Prof. Robert Varady, University of Arizona

Directeur adjoint : Dr. Graciela Schneier-Madanes

■ L'EAU, OBJET SOCIAL COMPLEXE

Ressource ou réseau, l'objet eau a une signification sociale qui dépasse son aspect technique. La notion de réseau est généralisée, dans les années 1830, par les saint-simoniens. Les partisans de ce mouvement ont œuvré au 19^e siècle pour le développement d'un grand système de voies, d'institutions qui irriguent la société. Les saint-simoniens sont notamment les initiateurs du chantier du Canal de Suez et du premier chemin de fer.

Mais un siècle plus tard, dans les années 1930 un débat oppose archéologues et ethnohistoriens à propos d'une explication déterministe de l'apparition d'un état hydraulique. En effet, pour organiser la construction des réseaux d'irrigation, cette notion, devait nécessairement émerger mais fut contredite par de nombreux exemples mésoaméricains.

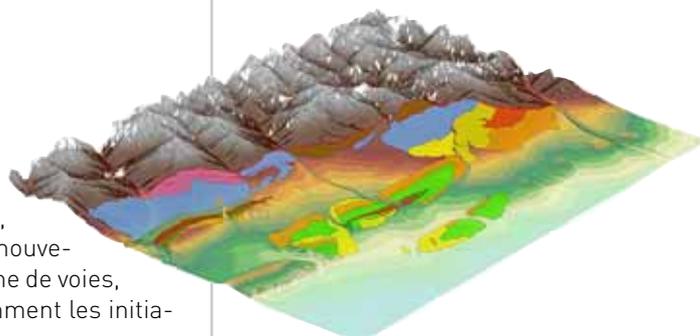
Ces débats internes à la science sont aujourd'hui nourris par une pensée en provenance des milieux institutionnels, tant économiques que politiques. La publication en 1987 du rapport Bruntland sur l'environnement marque le début d'une institutionnalisation au niveau mondial d'une réflexion sur l'eau, privilégiant la ressource. De ce débat sont issus des thèmes aujourd'hui largement diffusés et reconnus par la communauté scientifique, tels que la crise, la pénurie ou encore les pratiques locales de gestion de l'eau.

Plus que dans d'autres domaines, la recherche sur l'eau soulève la question de la participation du chercheur à la vie de la cité. Celui-ci est un expert mobilisé par les médias, par l'école, par les acteurs économiques ou encore par le pouvoir politique. Il doit en permanence préserver un équilibre difficile entre sa vocation de chercheur et la pression de la demande sociale.

Nombreuses sont désormais les recherches qui s'efforcent de penser l'eau autrement. Les mouvements d'idées qui traversent le champ des sciences sociales se reflètent ainsi peu ou prou dans les recherches sur l'eau.

L'objet eau est en effet un bon outil d'analyse pour comprendre les mécanismes de la mondialisation. Ainsi de nombreuses équipes du CNRS et associées travaillent sur la dimension économique de l'eau avec l'analyse de l'offre et de la demande ainsi que la stratégie des grands groupes ou encore les notions de marché et marchandisation de la ressource.

D'autres en revanche se sont spécialisés dans les aspects juridiques pour définir le statut de l'eau et des notions telles que le droit de l'eau et le droit à l'eau, ou dans l'étude des services de gestion, comme les services publics, leur régulation ou le développement international du modèle français.



▲ Cartographie géologique du bassin d'avant pays du Jungar (front nord du Tian Shan, Chine) drapée sur le modèle numérique d'altitude (vue depuis le Nord-Est).

© CNRS Photothèque / Charles Gumiaux

▼ La ressource en eau douce est très irrégulièrement répartie sur la surface de la Terre. Pour y accéder, de nombreux systèmes sont mis en place selon les cultures. Les femmes jouent dans certains endroits un rôle important dans la gestion de l'eau comme ici au Bénin.



© CNRS Photothèque / Claude Delhayre

La territorialité de l'eau est étudiée à plusieurs échelles et dans le temps grâce aux avancées de la géographie et des sciences politiques sur les systèmes d'information géographique, la modélisation, l'analyse d'archives. La Directive cadre européenne, adoptée en octobre 2000 constitue une avancée méthodologique majeure concernant l'articulation entre processus mondiaux et dimensions nationales ou locales. Son application sur les milieux aquatiques a suscité la convergence de multiples démarches de recherche.

Parallèlement, de nombreux programmes de recherche sur les conflits de l'eau, les usagers ou encore la participation ont inévitablement fait appel aux travaux pionniers menés depuis une vingtaine d'années sur l'acteur et les mouvements sociaux. À l'instar de ce qu'il est advenu dans d'autres champs thématiques, nous voyons se dessiner une nouvelle approche axée sur la figure du sujet. Cette orientation de la recherche sur l'eau connaît des développements tels que « L'eau et le corps », « L'eau et l'individu ». Les pratiques culturelles autour de l'eau ainsi que les représentations individuelles et collectives sont alors au centre des recherches.

Ce second versant de la recherche sur l'eau entre notamment en résonance avec la stratégie marketing de développement des nouvelles eaux, en bouteille, désignées par des marques qui s'affrontent sur le marché mondial.

L'eau, un banc d'essai pour l'interdisciplinarité.

Aujourd'hui, l'émergence d'une pensée environnementale, qui fait de l'approche intégrée un modèle d'analyse, suscite un changement de paradigme dans les recherches sur l'eau. Ce modèle eau-environnement brouille les frontières entre l'eau des champs et l'eau des villes. Il semble prendre le pas sur d'autres et pourrait amener à reconsidérer l'eau comme objet complexe.

Ce modèle d'analyse qui prédomine désormais est en fait basé sur une approche intégrée (préservation de la ressource, distribution équitable et consommation raisonnée, gestion active de la pollution et des eaux usées) et sur l'intégration des actionnaires dans le processus de

gestion de l'eau. Les principes d'épuisement et de vulnérabilité de l'eau, l'approche participative dans le développement et la gestion de l'eau par les femmes, ou encore la reconnaissance de l'eau comme un bien économique constituent le socle de la pensée internationale sur l'eau. **G. S.-M.**

REMONTER L'HISTOIRE POUR MIEUX COMPRENDRE LES RIVIÈRES

Une rivière est un objet transitoire, produit des flux d'eau et de matières qui circulent dans un bassin hydrologique donné. Son cours, sa pente, son débit dépendent de facteurs climatiques, sédimentaires et topographiques qui sont en interaction. Les recherches menées au CNRS depuis une trentaine d'années ont permis de mieux connaître l'histoire des cours d'eau pour expliquer leur physionomie contemporaine. L'eau est devenue un objet juridique dès l'époque romaine et depuis cette date, le droit de l'eau et la gestion des rivières ont nourri une volumineuse masse d'actes, de rapports, de cartes, de minutes de justice, de circulaires et de décrets. Ces documents constituent des données précieuses pour l'analyse rétrospective des paysages et de usages fluviaux. Tout l'enjeu est de parvenir à assembler et à mettre en relation les données physiques acquises sur le terrain et les données d'archives.

Ces archives sont d'autant plus intéressantes que parmi les facteurs régulant les systèmes fluviaux, l'un d'eux a gagné en importance depuis une quinzaine de milliers d'années : l'humain. Si les sociétés traditionnelles avaient de nombreux usages des rivières, l'industrie en a inventé de nouveaux en même temps qu'elle intégrait les rivières dans le système industriel lui-même. Au cours du XIX^e siècle, l'eau des rivières est en fait devenue un facteur de production, au même titre que la main d'œuvre ou le capital. En remettant en cause l'évidence historique par le recours aux archives, en replaçant les sociétés parmi les facteurs régulant le fonctionnement des objets naturels, les recherches menées à l'heure actuelle au CNRS permettent aujourd'hui une compréhension fine car interdisciplinaire des atteintes à l'environnement et des enjeux politiques dont les rivières sont à l'origine. **R. G.**

SYMBOLES D'EAU, À BOIRE !

L'eau, un des quatre éléments primordiaux avec le feu, la terre et l'air, véhicule de multiples symbolismes particulièrement forts, parfois contradictoires et variant selon les espaces traversés, les peuples et les religions. Qu'ils soient sacrés ou profanes, ces symboles sont inscrits dans des mythes, des rites ou encore des croyances. Considérées comme matrices de toutes les possibilités d'existence, ces eaux et leurs symboliques imprègnent chaque individu et participent à la construction des représentations individuelles et collectives que chacun en a. Qu'elle jaillisse d'une source, dévale un torrent, emplisse un plan d'eau, coule au robinet d'une pompe ou directement dans l'évier de la cuisine, l'eau acquiert des valeurs spécifiques que chacun se réapproprie en fonction de ses besoins, de ses usages et de la relation qu'il établit avec elle. En effet, outre son caractère vital, elle est source de régénération et de purification – par immersion dans le Gange malgré la pollution importante de ses eaux –, créatrice et source d'éternité, elle permet aussi le passage d'un état à un autre – le baptême ouvre au sacré, ou encore le Styx permet de passer de la vie à la mort. Là, sa qualité intrinsèque n'est pas essentielle, la dimension symbolique est clairement prépondérante.

© CNRS Photothèque / Agathe Euzen



▲ D'où vient l'eau du robinet ? Présente dans l'air à l'état gazeux, l'eau se transforme en, neige ou en pluie, s'écoule pour rejoindre les rivières et alimenter les nappes souterraines où elle peut être captée pour se retrouver au robinet après avoir été traitée pour satisfaire aux normes de qualités requises.

Lorsqu'il s'agit de la boire, il en est autrement. Si la priorité est pour certains d'avoir d'abord accès à l'eau pour satisfaire les besoins vitaux, la question de la qualité est prégnante pour ceux dont le robinet est régulièrement alimenté. Cela est, par exemple, le cas en France où des normes européennes régissent la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Cela confère à l'eau domestique une qualité sanitaire en permanence surveillée et contrôlée par les experts en présence. Cependant la qualité de l'eau produite par les professionnels en réponse aux décrets d'application ne satisfait pas toujours les exigences de qualité des buveurs d'eau qui s'appuient non seulement sur leurs perceptions sensorielles, mais aussi sur l'idée qu'ils se font d'une bonne eau. Ainsi, la richesse du calcium recherchée pour ses bienfaits pour la santé est rejetée lorsque ce même calcium se transforme en calcaire. Ainsi, l'analyse des entretiens qualitatifs menés auprès des consommateurs montre que dans l'acte d'absorption, les buveurs d'eau incorporent non seulement l'eau en tant qu'élément vital, mais aussi les représentations qu'ils en ont et le plaisir que cela peut procurer. Consciemment ou non, chacun cache ainsi derrière l'eau du robinet des valeurs symboliques à l'aune de ses pratiques et de la confiance qu'il peut avoir en l'eau qu'il consomme et en tous ceux qui y sont plus ou moins directement associés. La singularité des perceptions de l'eau et la diversité des pratiques individuelles et collective montrent la nécessité de considérer l'être humain à travers une approche anthropologique, tout en considérant le milieu dans lequel il vit grâce à la dimension environnementale. **A. E.**



© CNRS Photothèque / Agathe Euzen

▲ Détail de la fontaine du jardin de Darcy à Dijon

L'EAU OU LE CUMUL DES FONCTIONS

- Béatrice Biscans
Laboratoire de génie chimique, CNRS / INPT / université Toulouse-III
- Agathe Euzen
UMI 3157 Water, Environment and Public Policy, CNRS / University of Arizona
- Romain Garcier
University of Sheffield (Department of Geography)
- Éric Monflier
Unité de catalyse et de chimie du solide, CNRS / université Lille-I / école nationale supérieure

- de chimie de Lille / école centrale de Lille / université d'Artois
- Gérard Lacroix
Laboratoire Biogéochimie et écologie des milieux continentaux, CNRS / ENS / Inra / université Paris-VI / ENSPC / Agro Paris tech INA-PG
- Graciela Schneier-Madanes
Deputy Director, UMI 3157 Water, Environment and Public Policy, CNRS / University of Arizona
- Michel Vauclin
Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, CNRS / INPG / IRD / université Joseph-Fourrier, Grenoble

FOCUS #6

Août 2009

3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
Téléphone : 01 44 96 46 78
Télécopie : 01 44 96 53 10

Directeur de la publication :
Arnold Migus

Directrice de la rédaction :
Marie-Hélène Beauvais

Directeur adjoint de la rédaction :
Fabrice Impériali

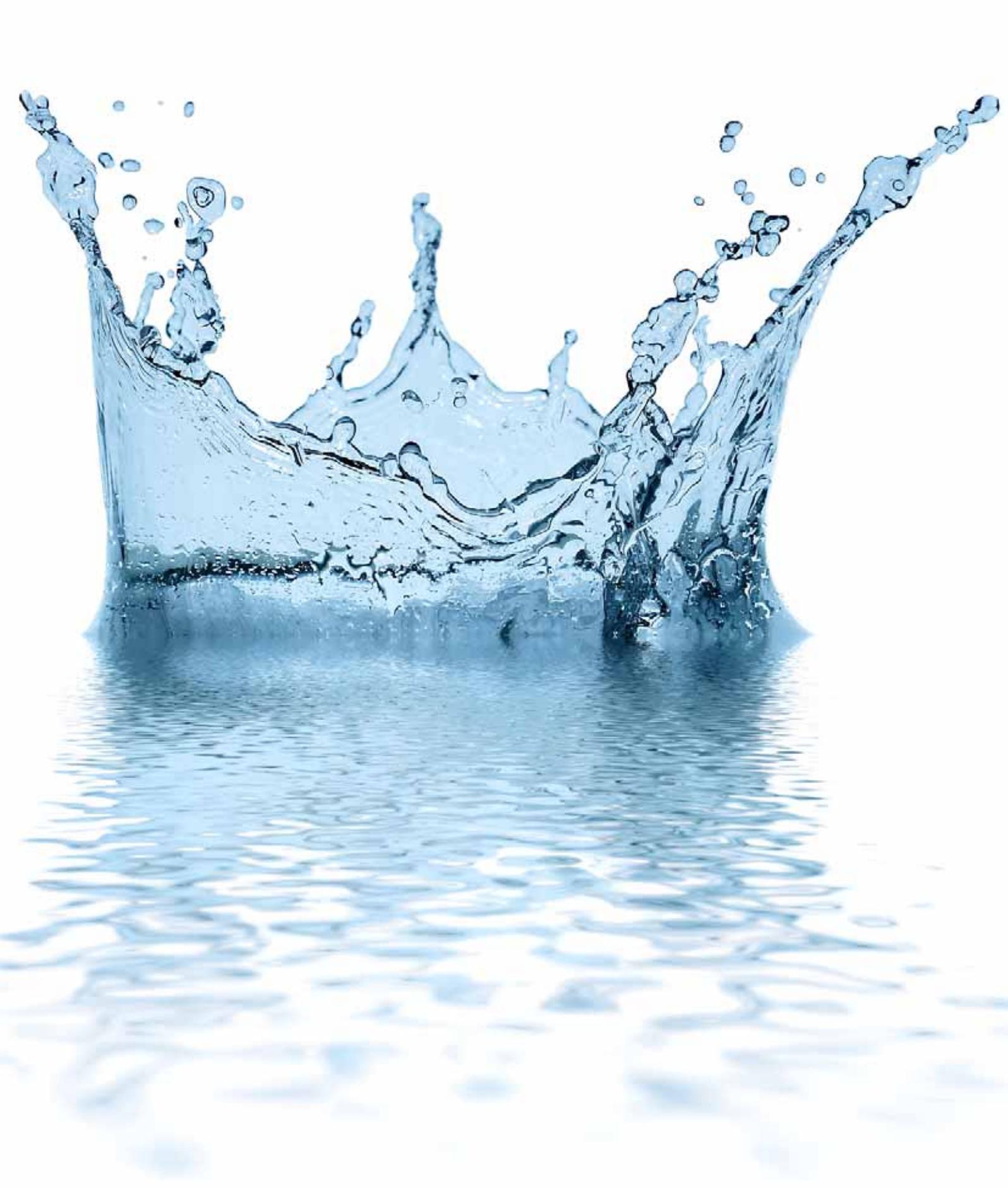
Rédactrice en chef :
Anne-Solweig Gremillet

Auteurs :
Bernard Barraqué
Daniel Beysens
Gilles Billen
Béatrice Biscans
Hélène Buzdinski
Bernard Cabane
Agathe Euzen
Romain Garcier
Yves Garrabos
Gérard Lacroix
Éric Monflier
David Quéré
Arnaud Reynaud
Graciela Schneier-Madanes
Alban Thomas
Michel Vauclin
Fabienne Wateau

Conception graphique :
Sarah Landel
Réalisation : **e2**

Iconographe :
Christelle Pineau
phototheque@cnrs-bellevue.fr

Couverture :
© Andrey Armyagov / Fotolia.com



CNRS

3, rue Michel-Ange
75794 Paris cedex 16

T 01 44 96 40 00
F 01 44 96 53 90