

7- 8 novembre 2013 • Les journées de l'eau du CNRS

Parmi les nombreux sujets qui sont liés à l'eau, celui de la remédiation et des usages fait l'objet de cette première journée d'échanges, afin de mobiliser autour d'un même objet des communautés scientifiques aux horizons disciplinaires variés et complémentaires, et d'envisager chaque thématique sous ses multiples facettes. La mission pour l'interdisciplinarité du CNRS propose ainsi de croiser et mettre en perspective les réflexions de tous, d'avoir une meilleure vision de l'état des connaissances et d'évaluer le potentiel de recherche, tout en identifiant les principaux verrous scientifiques et technologiques associés.

En renforçant les synergies existantes, de nouvelles dynamiques interdisciplinaires pourront émerger autour de questions de recherche à revisiter ou à initier. Compte rendu...

L'ensemble des visuels présents dans ce document sont issus des supports des intervenants

Modèles et propriétés physique, chimique et biologique de l'eau et ses interactions,

par Damien Laage (Laboratoire Pasteur, Paris)

Toute essentielle qu'elle soit, l'eau n'a commencé à être étudiée que tardivement – Lavoisier (1743-1794), Cavendish (1731-1810), Monge (1746-1818), Watt (1736-1819) et d'autres encore...

Si l'on dresse un bilan actuel des connaissances chimiques et biologiques de l'eau, on voit que H₂O est une molécule coudée, ce qui lui confère des propriétés particulières :

D'une part, c'est un excellent solvant pour les espèces chargées (le four à micro-ondes, par exemple, agit sur cette polarité) ; elle est transparente – elle laisse passer la lumière, ce qui permet la vie sous-marine – et dispersive – la vitesse de la lumière y change selon sa longueur d'ondes ; en effet l'indice de réfraction est généralement moindre dans les infrarouges, ce qui joue sur l'effet de serre ;

De liaison hydrogène faible, l'eau est un peu électrostatique ; cette liaison est aussi covalente¹, c'est à dire que chaque molécule donne deux liaisons – reçoit deux liaisons hydrogène ; la

durée de vie de cette liaison est de 10⁻¹² s : elle se rompt, se reforme, etc. à cette fréquence.

Des propriétés intrinsèques de ses liaisons hydrogène découlent aussi le fait que lorsque l'eau change de forme et devient de la glace, son arrangement moléculaire est ordonné (structure cristalline). Ainsi, l'eau solide est moins dense que l'eau liquide, et c'est pour cela qu'elle flotte.

¹ Une liaison covalente est une liaison chimique dans laquelle deux atomes partagent deux électrons (un électron chacun ou deux électrons venant du même atome) d'une de leurs couches externes afin de former un doublet d'électrons liant les deux atomes. C'est une des forces qui produit l'attraction mutuelle entre atomes.
>>> http://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_covalente

Comment bougent les molécules d'eau ?

Diffusion ? très petits pas aléatoires

Sauts ? suggestion basée sur étude par simulation numérique

réactif état de transition produit

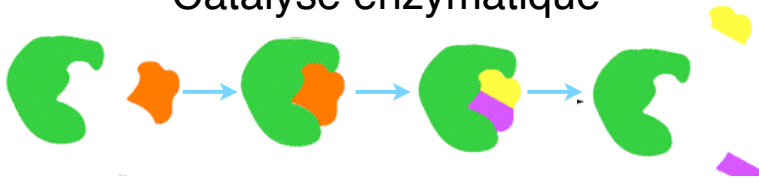
confirmation expérimentale Laage & Hynes Science 2006

Ji et al. Science 2010

Modèle prédictif

- hydrophile ou hydrophobe ?
- interface concave ou convexe ?

Catalyse enzymatique



Par ailleurs, l'eau est dynamique : sa réactivité chimique se voit notamment en biochimie avec les électrons qui se réorganisent, les charges qui bougent...

2 Voir les travaux de Jacques Benveniste, Marc Henry et Luc Montagnier

En revanche, nous ne savons pas encore avec certitude comment bougent les molécules d'eau : par diffusion –petits pas aléatoires –, par saut, d'une liaison hydrogène à une autre... Ces questions concernant l'eau pure, puisque les caractéristiques varient selon les produits dissous dans l'eau.

La mémoire de l'eau est étudiée, suscitant de vastes remous dans la communauté scientifique² : si sa structure se ré-organise à 10^{-12} s (picoseconde), peut-elle garder l'empreinte d'une molécule ?

nature 2005

Ultrafast memory loss and energy redistribution in the hydrogen bond network of liquid H₂O

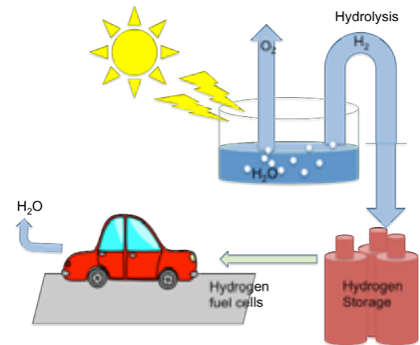
M. L. Cowan^{1*}, B. D. Bruner^{1*}, N. Huse^{2*}, J. R. Dwyer¹, B. Chugh¹, E. T. J. Nibbering², T. Elsaesser² & R. J. D. Miller¹

¹Departments of Chemistry and Physics, University of Toronto, 80 St George Street, Toronto, Ontario, Canada M5S3H6

²Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Max-Born-Strasse 2A, D-12489 Berlin, Germany

Le cytoplasme, c'est à dire l'eau de nos cellules, présente une forte concentration en sels, sucres, phospholipides, protéines, etc. C'est une eau « biologique », peu visqueuse : l'eau autour d'une protéine, d'un ADN dans nos cellules, n'est que modérément ralentie par rapport à de l'eau pure. Pour le vivant, l'eau agit aussi comme une sorte de « lubrifiant », permettant plus d'action dans la réorganisation des cellules (catalyse enzymatique). Qu'en est-il de la reconnaissance moléculaire ? Le milieu de l'eau permet-il des arrangements de molécules entre elles ?

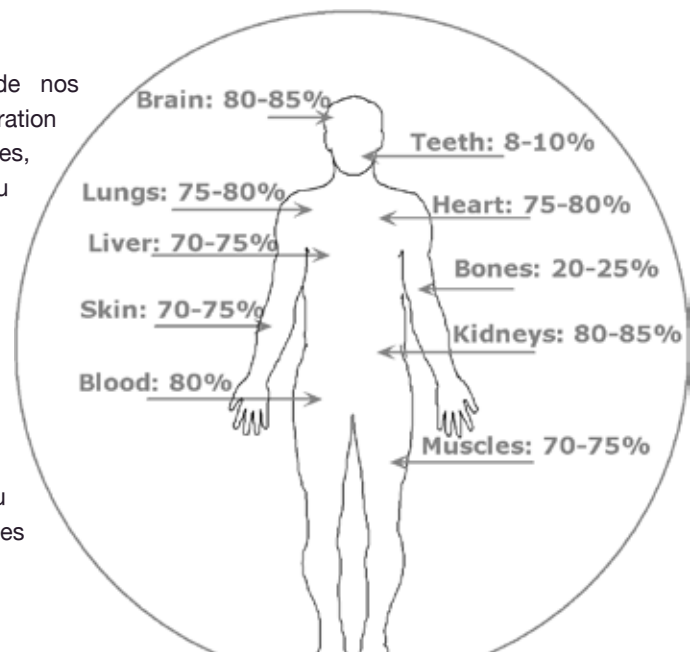
L'eau porte aussi son lot de défis énergétiques : en tant que source d'énergie – notamment au cours de la dissociation de l'eau pour en récupérer l'hydrogène.



Stanford

Les catalyseurs utilisés pour la dissociation de l'eau sont, pour la production de O₂ les oxydes de ruthénium (Ru) et le manganèse (Mn), et pour la production de H₂ le platine (Pt), le cobalt (Co), le nickel (Ni) et les hydrogénases. Ce système est encore assez mal connu et, pour l'instant en tous cas, très onéreux, pour un résultat peu satisfaisant.

En conclusion l'eau est, malgré sa petite taille, une molécule complexe, dont découlent d'importantes propriétés. Son comportement est mieux compris grâce aux techniques modernes, mais certaines de ses propriétés sont encore mal cernées, notamment à l'échelle de la physique quantique. Son rôle risque de s'avérer central dans les enjeux à venir liés à l'énergie et au vivant...



L'eau, un élément dans le vivant et dans l'environnement,

par Christophe Maurel (Biochimie et physiologie moléculaire des plantes, INRA/CNRS/Montpellier SupAgro)

Le statut hydrique est un équilibre constamment entretenu – apport/rejet – chez les animaux et les plantes (évapotranspiration)...

La relation eau-vivant se retrouve de la cellule à l'organisme : l'eau circule dans les cellules grâce aux aquaporines (AQP), protéines membranaires qui forment des « pores » perméables aux molécules d'eau dans les membranes biologiques. Il reste encore beaucoup à étudier dans ce domaine, dont les découvertes sont assez récentes.



Germination de la graine
Dessiccation-imbibition

Dans certaines conditions, l'équilibre hydrique peut être momentanément rompu, et un être peut perdre son poids en eau en quelques heures. C'est le cas de la graine, par exemple, qui se déshydrate et reste en semi-vie, puis se réhydrate à nouveau pour croître et changer d'état.

Les plantes sont la continuité entre le sol et l'atmosphère ; l'état physique et énergétique de l'eau varie selon le niveau au cours de cette continuité.

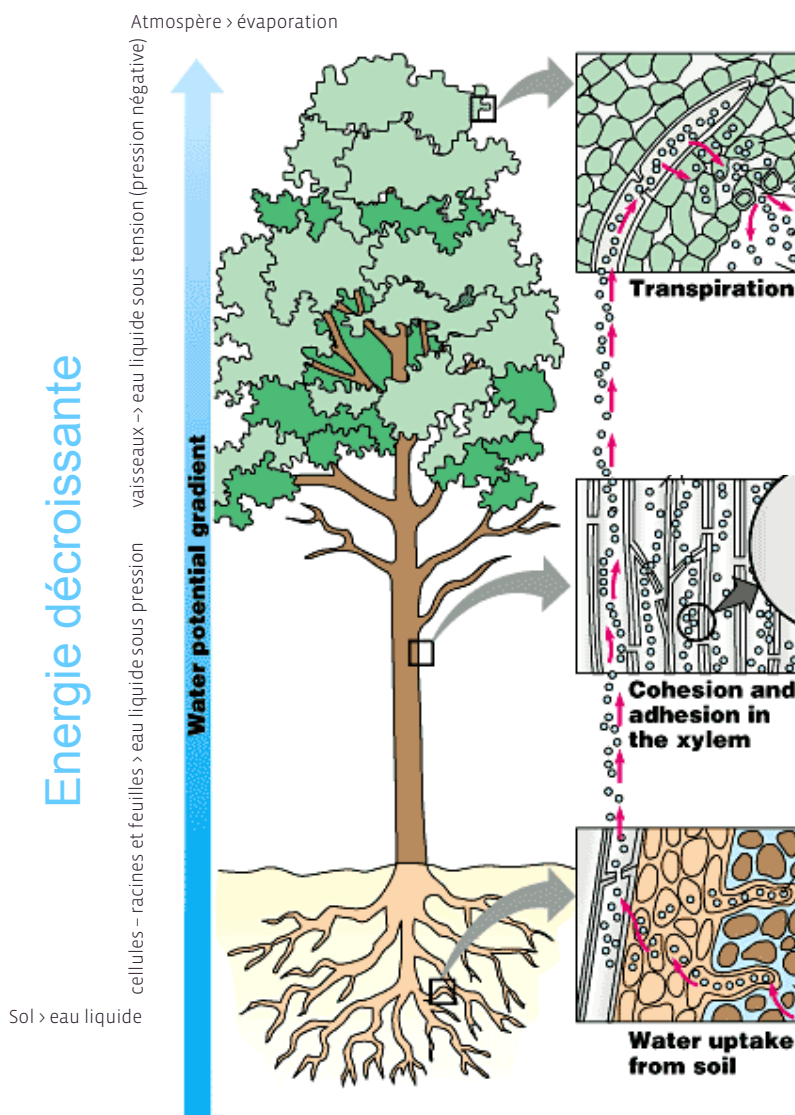
Les racines sont fondamentales pour l'équilibre de l'eau, tant dans le sol que dans la plante. Pour le riz, par exemple, on a découvert que l'évolution naturelle d'un seul gène (gène DRO₁) peut modifier le développement des racines (+/- profondes) pour que la plante puisse s'adapter aux conditions climatiques qui l'entourent.

La consommation d'eau dans le monde montre que 70 % de celle-ci est utilisée pour l'agriculture. Les enjeux que cela implique pour les sociétés sont énormes. A titre d'exemple, pour produire 1 kg de grains de blé ou d'orge, il faut à peu près 500 L d'eau : pour produire 1 kg de grains de maïs, 350 L.

Dans le cadre des échanges entre les différents domaines de la recherche, la biochimie moléculaire profiterait amplement des avancées que la physique et les SPI pourraient faire en matière d'imagerie non invasive à haute résolution – notamment pour étudier les flux d'eau, le potentiel hydrique (état énergétique de l'eau) et les milieux

denses –, ainsi que de nouveaux instruments pour des analyses à haut débit.

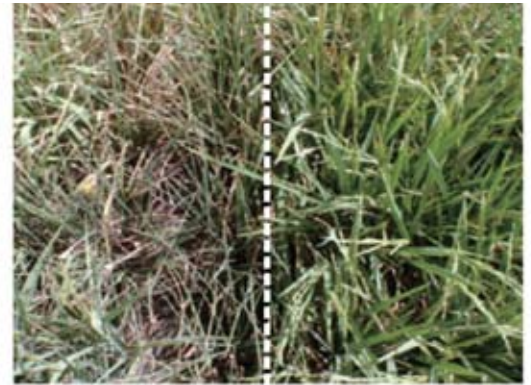
Un dialogue constructif avec la physique et les mathématiques appliquées en matière de modélisation serait probablement productif, ainsi qu'avec les sciences environnementales pour aborder les notions d'écologie fonctionnelle et de climatologie.



Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.



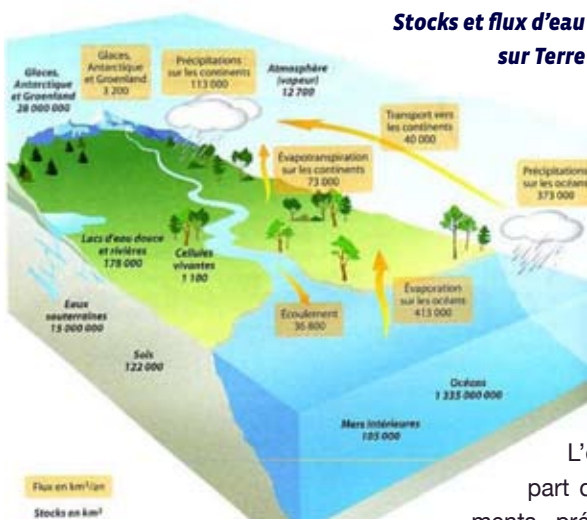
Uga et al., Nature Genetics, 2013



IR64

Dro1-NIL

Le gène *DRO₁* permet la modification du développement des racines des plants de riz afin de s'adapter aux conditions hydriques



Les usages au cœur du grand cycle de l'eau et ses interactions,
par Ghislain de Marsily (UPMC, Paris)

L'eau provient pour une part des flux d'eau (écoulements, précipitations), et d'autre part des stocks d'eau (« eau fossile ») – aquifères et glaciers. La fonte de ces derniers, avérée, est inquiétante, surtout en Amérique du Sud. Aujourd'hui surexploités au-delà de leur renouvellement, les aquifères ne pourront pas soutenir le rythme que nous leur imposons. En 2000, six pays pompent nettement au-delà de la capacité de leurs aquifères : Inde, USA, Chine, Pakistan, Iran, Mexique.

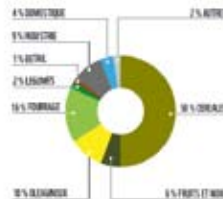
dans les faits, mais généralement ignorée –, eau bleue – la seule qui soit réellement comptabilisée –, eau grise.

En Tunisie, par exemple, le volume d'eau utilisé pour l'irrigation en 2004 représente 2000 km³, tandis que celui de l'agriculture pluviale, la même année, est de 8000 km³.

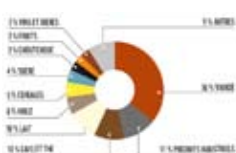
L'empreinte eau de production de la France



L'empreinte eau de production



L'empreinte eau de consommation



L'empreinte eau

L'empreinte eau verte : c'est la consommation des eaux de pluie, notamment par évaporation dans les cultures agricoles ;

L'empreinte eau bleue : c'est la consommation des eaux de surface et des eaux souterraines ;

L'empreinte eau grise : c'est le volume d'eau douce requis pour diluer les polluants dans des proportions suffisantes pour rejeter l'eau en suivant les normes de qualité en vigueur.

Les stocks d'eau utilisée peuvent être décomposés ainsi : eau verte – consommation majeure

Le changement climatique induit des variations de la pluviométrie qui différeront de pôle à pôle. En France, nous sommes dans une zone (+/- 1000 km) où l'incertitude pour l'avenir est la plus importante. Or si l'on regarde l'empreinte eau de production de la France, on voit que 18 % provient de l'eau bleue, 6 % d'eau grise et 76 % d'eau verte.

Bilan en eau de la Tunisie	Unité	2004	2025 Idem + Chgt Clim
Population	Millions	10	12,15
Demande alimentaire, équival eau/hab	m ³ /a	1450	1700
Demande alimentaire, volume total	km ³ /a	14,399	20,655
Demande directe, AEP et industrie/hab	m ³ /a	55	70
Demande directe, total	km ³ /a	0,546	0,851
Volume d'eau d'irrigation	km ³ /a	2,008	2,004
Agriculture pluviale, eau verte	km ³ /a	8,000	9,000
Eau virtuelle importée (blé, orge)	km ³ /a	4,591	9,900
Besoins en eau totaux	km ³ /a	14,945	21,506
Taux de dépendance en eau importée	-	31%	46%

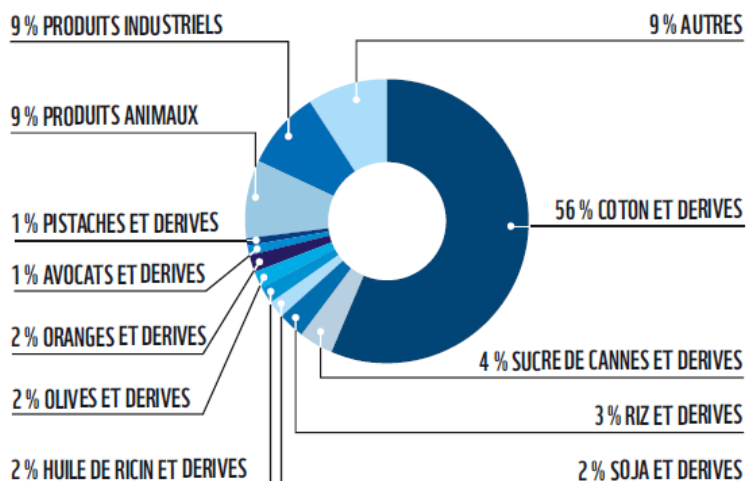
Importation d'eau bleue virtuelle

De plus, 47 % de l'eau consommée en France est importée, via les fruits, légumes, viandes... et le coton (56 % de cette eau vient du coton et de ses dérivés). Cette eau, aussi appelée « eau virtuelle », représente la quantité d'eau nécessaire pour la production de ces importations.

Qui dit changement climatique entend a priori raréfaction des ressources. Or, selon les projections, nous allons connaître une augmentation des besoins en alimentation (nous serons 9,5 milliards d'êtres humains sur la planète, en 2050), et il nous faut à tout prix protéger les ressources naturelles et les écosystèmes.

L'agriculture irriguée produit deux fois plus que l'agriculture pluviale, mais elle exigerait la construction de nombreux barrages pour gérer les flux. De plus, si l'agriculture se développe encore, cela nécessiterait d'utiliser plus de surfaces, notamment des zones non encore cultivées, qui induiraient un défrichement intense (dont peut-être la forêt tropicale).

Quant à la préservation de la qualité de nos ressources en eau, selon les contextes, les pollutions varient et la ressource n'est pas la même. On observe par exemple dans le nord de la France une teneur de Perchlorate des eaux particulièrement élevée, à cause des obus de 14-18. Et

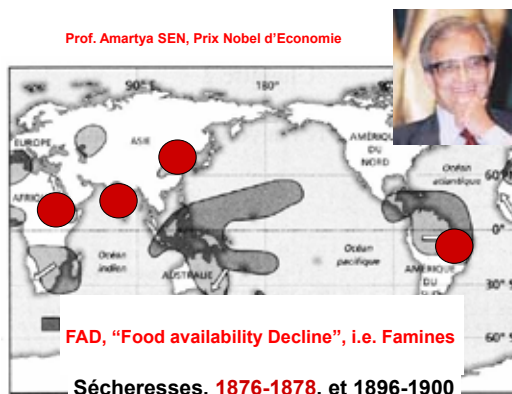


tout ceci, en sachant que les décisions pour les aménagements d'envergure prennent du temps. Par exemple en France, trois grands barrages ont été construits autour de Paris en 1970-1980 ; la décision de ces aménagements avait été prise en 1910.

Bilan en eau de la France (65 millions d'habitants)

	2005 m³/an/hab	2005 Cumul km³/an	part Consom- -mée	Conso- -mmée
Demande alimentaire, équival eau	1700	110	100%	110
Demande directe, eau potable/hab	97	10	14%	1,4
Demande directe Industrie/hab	58		14%	
Demande directe, énergie	300	19	2%	0,4
Volume d'eau d'irrigation	77	5	75%	3,8
Besoins en eau totaux	2140	139	80	112
Ressou : Evapotransp, eau verte	4600	300		
Ressou : Ecoulements, eau bleue	2700	175		
Eau virtuelle importée	650	42		

Type d'eau	Verte, km³/an	Bleue, km³/an	Grise, km³/an
Produits agricoles nationaux	43,7	1,4	3,8
Produits agricoles importés	36,7	4,6	2,1
Produits industriels nationaux		0,9	3,3
Produits industriels importés		0,6	6,3
Eau domestique		0,6	2,2
Total	80,4	8,1	17,7
Total Général	106,2 km³/an 47 % d'eau importée 76 % d'eau verte 87 % d'eau agricole		



Mortalité due au "FAD"

Pays	Période	Mortalité
Inde	1876-1879	10 millions
	1896-1902	20 millions
Chine	1876-1879	20 millions
	1896-1900	10 millions
Brésil	1876-1879	1 million
	1896-1900	?
Total		30 à 60 millions

NB : Population Mondiale : 1 milliard en 1820, 2 milliards en 1925...
-1,5 milliards en 1875, 60 millions = -4% de la population mondiale

Plusieurs options se présentent, qui sont déclinées selon la politique actuelle de la commission européenne :

Les transferts d'eau sont à l'étude en France, parfois sur de longues distances – se fait déjà, par exemple, des monts de l'Himalaya à Pékin – ou le retraitement des eaux usées, comme c'est le cas à Barcelone...

Dans le rapport Explore 2070³, du ministère de l'Écologie, on trouve une projection pour laquelle on étudie comment tirer profit de la formidable protection qu'offrent les Alpes, dont les montagnes constituent de véritables châteaux d'eau (les masses montagneuses attirent les précipitations et captent les plus importantes quantités d'eau pluviale).

³ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html>

Des symboles aux usages de l'eau, par Agathe EUZEN (LATTS, Marne-la-Vallée)

Ou comment les dimensions symboliques sont extrêmement présentes et interagissent dans les différents usages de l'eau.

Partout dans le monde, on trouve des divinités aquatiques, plus ou moins prégnantes selon les périodes ou les régions. Ces divinités sont souvent des monstres : on trouve celui du Loch Ness, le Léviathan (symbole marin du mal et de la destruction), la vouivre, sorte de dragon ailé avec escarboucle sur le front, qu'elle laisse sur la rive avant d'aller se baigner...

Ces monstres se retrouvent dans l'architecture, par exemple les gargouilles, dont l'utilité « fonctionnelle » consiste à évacuer l'eau de pluie, et l'utilité « symbolique », éloigner le mal.



L'eau charrie un univers imaginaire et figuré riche :

Elle est claire, douce, pure, courante, dormante, féconde, violente, sombre... Elle peut être traître si elle dort, ou révélatrice lorsqu'elle reflète (miroir du monde).

Elle est source de vie : liquide originel, eaux primordiales... C'est un instrument de purification (ablutions musulmanes, baptême chrétien) et le lieu de création de la vie.

Elle est source de mort : les déluges en sont la meilleure expression, sous toutes leurs formes : tsunami, inondation, orage... avec une vocation, dans les mythes, à re-crée ensuite (après le déluge, Dieu a prêté son aide à Noé pour tout recommencer à zéro). Rq. : Les inondations ne sont pas considérées de la même façon partout : si, en France, elles signifient dégâts des eaux – notamment parce qu'on construit n'importe où

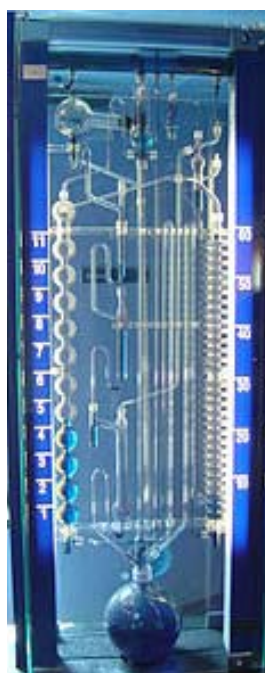


(en demandant ensuite à la collectivité d'en assumer la responsabilité), certaines crues sont, au contraire, nécessaires à l'agriculture et à la survie de populations entières (les crues du Nil, pour ne citer qu'elles).



L'eau coule et symbolise le temps qui passe. « On ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve », disait Sénèque. La clepsydre est d'ailleurs un instrument qui mesure le temps avec l'eau. Et, pour faire suite au paragraphe précédent le nilomètre permet d'évaluer l'abondance des récoltes selon l'importance de la crue, et marque ainsi les années.

L'eau est un passage d'un état à un autre, de la vie à la mort (à l'image du Styx, le fleuve qui mène au royaume des morts). Lors de rituels, d'étapes de purification, c'est le passage vers un nouveau statut social.



Clepsydre moderne, musée Noria, l'espace de l'eau (Saint-Jean-du Bruel)

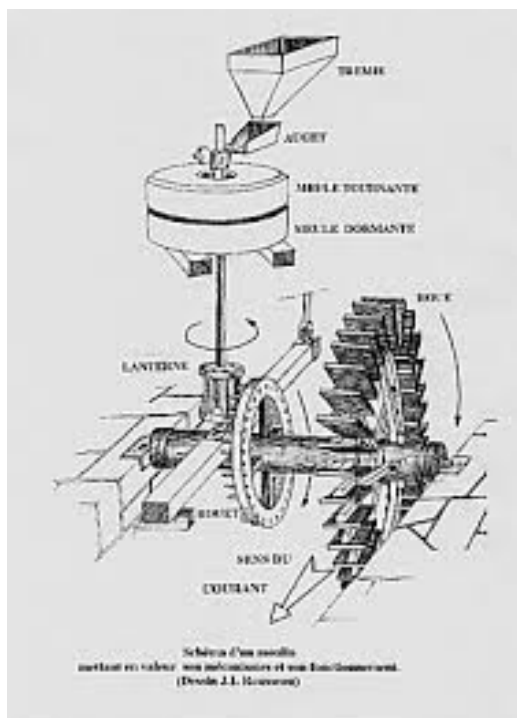
C'est aussi une symbolique propre aux rêveries et contemplations. « Contempler l'eau, c'est s'écouler, c'est se dissoudre, c'est mourir », écrivait Gaston Bachelard.

L'eau est un don sacré. On retrouve cette notion dans les actes de purification dans les pratiques religieuses (ablution, immersion, aspersion...) ; elle est aussi fécondante et nourricière, et cela se voit dans le lien entre les religions et la pluie, ou l'irrigation en règle générale. Ainsi les fleuves sont-ils personnalisés comme les « esprits » des lieux où ils coulent et où ils permettent la vie : nourriciers, sacrés...

L'eau est source d'éternité : mythe de la fontaine de jouvence, l'eau guérissante et thérapeutique, les eaux thermales... Entre croyances, bien-être et effets thérapeutiques, c'est tout cet imaginaire que les vendeurs d'eau en bouteille utilisent depuis 1960.

Évolution de la perception des eaux destinées à la boisson⁴

Dans les villes, jusqu'au Moyen-Âge, l'eau est perçue comme dynamique. Sa gestion suit la même voie : on développe l'hydraulique, notamment par l'usage des moulins à eau, qui permettent une productivité sans comparaison avec celle disponible dans l'Antiquité (passage de l'énergie animale ou humaine à l'énergie hydraulique).



Du XIVe au XVIIIe siècle, on développe au contraire les eaux stagnantes. D'une part pour se protéger – on construit des douves autour des fortifications –, et d'autre part pour développer certaines activités professionnelles – en utilisant le principe de fermentation notamment (tanneries, draperies...). Cet usage de l'eau eut pour conséquences l'apparition de nouveaux problèmes d'hygiène en créant de véritables foyers bactériens.



Au XVIIe siècle, les premiers doutes sur la qualité de l'eau apparaissent à Paris : de nombreux voyageurs tombent malades en l'ingurgitant ; on développe alors des systèmes de filtration, d'abord individuel puis collectif ; c'est le début des analyses de l'eau par des médecins.

⁴Évolution de la perception des eaux destinées à la boisson – Paris, du XVII^e siècle au XXI^e siècle, par A. Euzen et J.P. Haghe, 2005

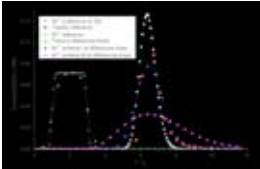
Au XVIIIe siècle, l'eau devient un élément que l'être humain se doit de maîtriser, d'évacuer et de contenir. Napoléon disait, par exemple : « L'eau doit désormais couler sans discontinuer dans la capitale ».

Au XIXe siècle, une nouvelle logique d'hygiénisme se développe : les eaux sont dynamiques, mais les réseaux d'acheminement sont enterrés.

Le XXIe siècle observe un retour vers l'eau, avec une vision dynamique : les aménagements urbains cherchent à la valoriser et on réouvre des rivières jusqu'alors enterrées.

De nombreuses difficultés auxquelles se confronte la gestion de l'eau sont les conséquences de cette dichotomie entre l'eau pure et l'eau usée, qui portent chacune des symboliques très différentes.

Celle-ci se retrouve encore exacerbée par l'idée de surpuissance de l'être humain sur son environnement : on survalorise l'ingénierie et on



refuse toute notion de risque (comme pour les habitations construites sur des zones inondables) ou d'acceptation. De fait, on tend vers l'idée que les innovations technologiques peuvent réparer n'importe lequel des dégâts que nos pollutions infligent à la ressource, et nous protéger de nous-mêmes. De plus, on constate une grande méconnaissance de l'eau : sa composition, son parcours dans le grand cycle, le petit cycle... Cette approche de l'eau et tout l'imaginaire qui l'accompagne sont à tenir en compte lors des décisions concernant la gestion de l'eau, pour que celles-ci soient

acceptées. On entrevoit clairement cet état des choses dans l'usage des eaux dites « eaux grises » (eaux pluviales...), même en la réservant à des usages spécifiques. Les réactions sont très nuancées : certains s'offusquent à l'idée de voir de l'eau qui n'a pas l'apparence de l'eau propre (transparente et incolore) chez eux, même dans leurs toilettes. Dans certaines villes, qui utilisent un double réseau d'eaux usées pour réutiliser l'eau de pluie, on a trouvé une solution pour la réutiliser pour les toilettes, en teintant l'eau grise en bleu (comme à la TV).

Interaction eau-milieu : la question des transferts,

par Jérôme Carrayrou (Laboratoire d'hydrologie et de Géochimie de Strasbourg)

Il s'agit d'étudier les réactions qui ont lieu lors des interactions entre l'eau et son milieu. L'eau s'écoule, se diffuse, et en son sein les éléments qui y sont dissous interagissent et se diffusent. C'est la notion de transport réactif. Par exemple, en milieu poreux, l'eau s'infiltré dans les interstices de la roche, y laissant son empreinte et se chargeant elle-même des minéraux de la roche. C'est une genèse des minéraux, via l'interaction eau-roches.

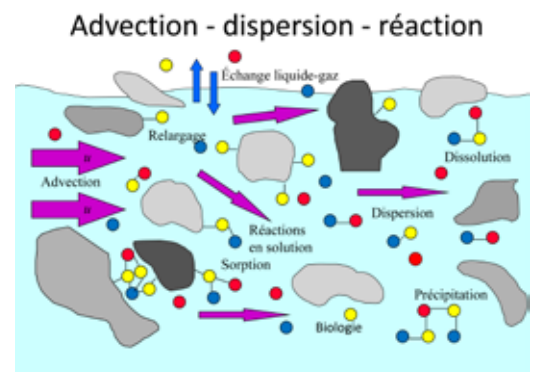
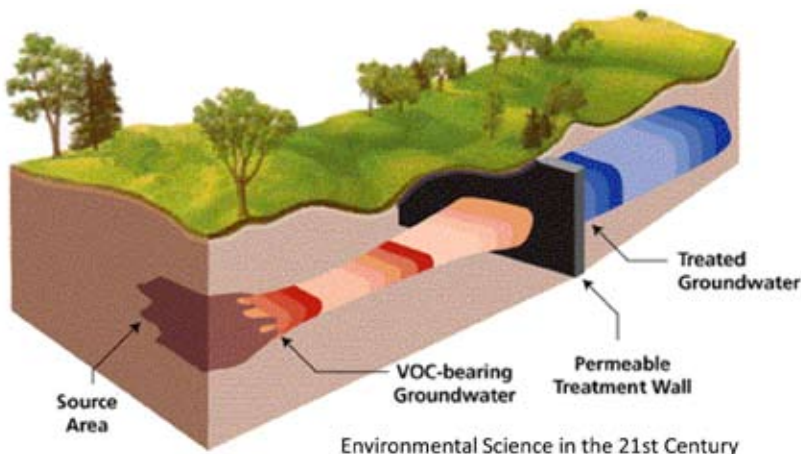


Lorsque l'eau s'infiltré dans les carrières minérales, la poche dans laquelle elle s'engouffre est en partie remplie par les minéraux de l'eau.

Le transport réactif est à l'équilibre, c'est à dire que les réactions se répartissent dans le milieu. De fait, ce transport réactif comporte tout un ensemble d'actions – advections, dispersions, réactions – qui sont à tenir en compte lors des études de situations.

Ce procédé peut être adapté dans le cadre de l'ingénierie environnementale. Par exemple dans le cas d'une dépollution des eaux souterraines : l'eau est passée par un « filtre » – souvent à base de limaille de fer – dans lequel se fait une réaction d'oxydo-réduction ; cette réaction provoque un dépôt, un relâchement de protons, qui induit une acidification.

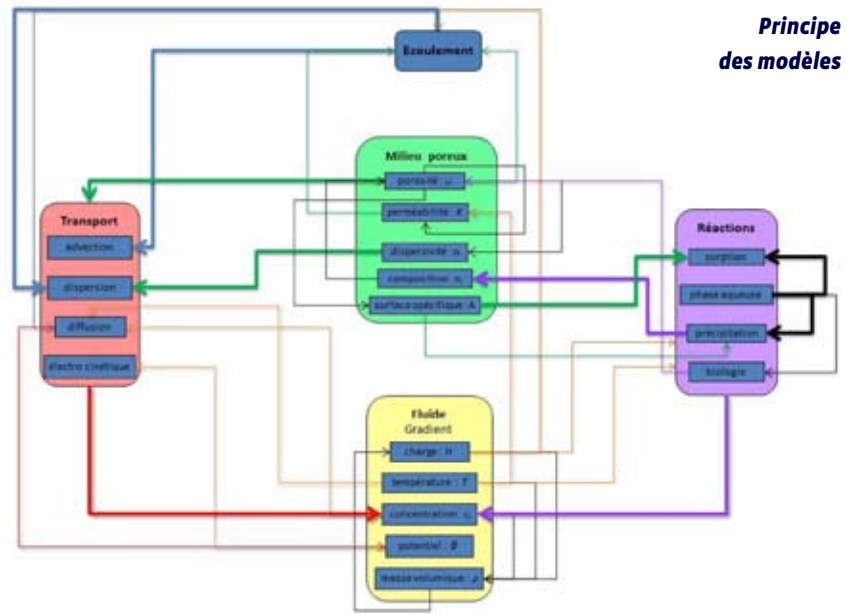
Or le bilan du transport et les réactions chimiques sont des opérations mathématiques qui sont incompatibles entre elles ; il n'y a pas de code permettant de tenir compte de toutes les interactions, notamment dans un milieu naturel. On obtient des modèles mathématiques par-



tiels, et donc des résultats incomplets. Alors que chaque action entraîne son lot de réactions, qui créent des précipitations, des advections ou des dispersions, elles-mêmes à l'origine de précipitations ou d'autre chose... La capacité actuelle des codes permettent d'étudier les processus séparément, mais sans pouvoir les aborder dans leur ensemble. Pour l'instant, il vaut mieux travailler processus par processus – hydrodynamique (écoulement, transport de traceur...), chimie (expériences en réacteur fermé, stérile), biologie (expérience en réacteur fermé) –, ne pas utiliser l'expérience maître pour caler des paramètres et s'assurer de la pertinence de la discrétisation ⁵.

Lorsque l'on traduit ces recherches en projet, il faut garder en tête que le travail de modélisation ne réduit pas les besoins expérimentaux ; il est toujours nécessaire de réaliser les expériences processus par processus, comme de réaliser l'expérience maître et de la décliner pour contrôle. De fait, la modélisation d'un système complexe ne se fait pas rapidement : il faut non seulement modéliser les expériences par processus, associer l'ensemble à un modèle, tester les choix de discrétisation et en vérifier la pertinence sur les expériences de contrôle.

Les verrous scientifiques ainsi identifiés se retrouvent sous différents aspects : numériques – par rapport aux temps de calcul, notamment,



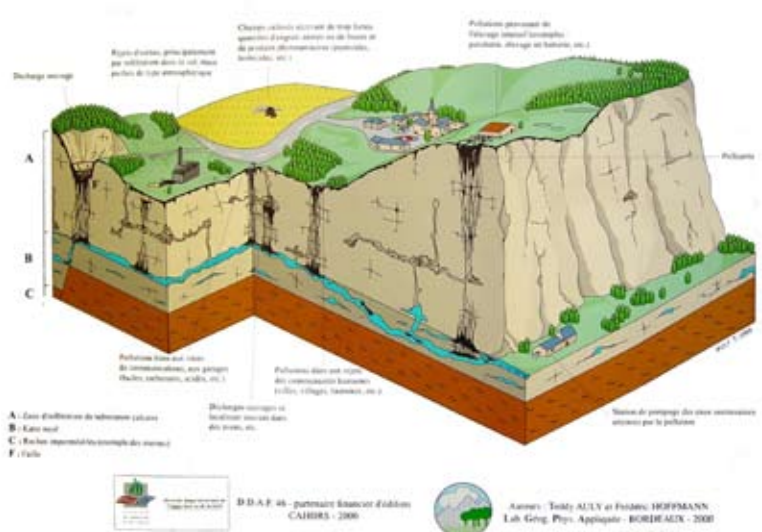
qui interroge sur la stabilité des méthodes, ainsi que dans la prise en compte de l'estimation des erreurs et d'une analyse de sensibilité –, au niveau des modèles – les réactions aux interfaces liquide/solide, la traduction d'une microbiologie mécanistique, des inter-/rétro-actions et le calage du modèle vs processus –, et au stade expérimental – les expériences sont totalement contrôlées (contrairement à ce qui se passe dans la nature), elles sont décomposées par processus pour être réalisées et l'expérience de contrôle devrait être post-modèle...

⁵ En statistiques, action de classification raisonnée de données. La discrétisation consiste à la fois au découpage de données en classes homogènes et en la justification mathématique de cette classification et du nombre de classes retenu.

La spécificité des milieux poreux dans les interactions eau-milieux, par Michel Quintard (Institut de Mécanique des Fluides, Toulouse)

Cette difficulté d'élaborer des modèles permettant d'étudier les interactions est d'autant plus vraie que, dans le cas d'une pollution d'une nappe d'eau, par exemple, il faut tenir compte de plusieurs échelles : la petite, c'est à dire les réactions physiques, chimiques qui interviennent, et la grande, c'est à dire l'impact à l'échelle environnementale, qui peut elle-même offrir plusieurs types d'environnements (aquifères « classiques », milieux fracturés, karsts, etc.). Cet aspect multi-échelles est un verrou récurrent dans cette démarche, qui se retrouve par ailleurs dans la compartimentation des domaines de recherches ; dans la plupart des cas il faudrait développer une étroite collaboration entre biochimistes, mécaniciens et écologues...

SCHEMA SYNTHETIQUE DE L'INFILTRATION DES POLLUTIONS EN MILIEU KARSTIQUE EN L'ABSENCE DE COUVERTURE -



6 Le karst est une structure géomorphologique résultant de l'érosion hydrochimique et hydraulique de formations de roches, principalement de formations calcaires. Les structures karstiques concernent environ le cinquième de la superficie continentale de la Terre. Les karsts présentent pour la plupart un paysage tourmenté, un réseau hydrographique essentiellement souterrain et un sous-sol creusé de nombreuses cavités : reliefs ruiniformes, pertes et résurgences de cours d'eau...

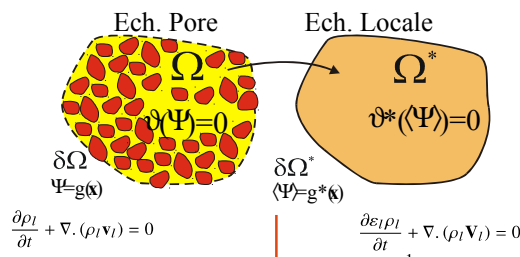
7 D'après Henri Darcy, 1856. Un darcy correspond à la perméabilité d'un corps assimilé à un milieu continu et isotrope au travers duquel un fluide homogène de viscosité égale à celle de l'eau à 20°C (une centipoise) s'y déplace à la vitesse de 1 cm/s sous l'influence d'un gradient de pression de 1 atm/cm. 1 Darcy = 0,97.10⁻²⁰ m².

8 Écosystème où s'accumulent d'importantes quantités de matière organique. Suivant certaines conditions climatiques et topographiques, les végétaux croissent et se décomposent lentement, et surtout de façon incomplète. Il se forme alors de la tourbe, c'est à dire une matière organique fossile. Ces zones humides jouent un rôle dans le cycle du carbone. On estime qu'en moyenne, les tourbières stockent 15 à 30 % du carbone piégé dans les sols. La tourbe est majoritairement constituée d'eau et de matière organique (principalement de la cellulose et de la lignine). La teneur en carbone compte pour 50 % du poids.

9 Mélange complexe d'algues, de cyanobactéries, de microbes hétérotrophes et de détritus. Il est plus ou moins attaché à des surfaces immergées dans la plupart des écosystèmes aquatiques. Ces surfaces peuvent être inertes (roches, bois mort, béton...), bioconstruites (coquillage) ou vivante végétale ou animale et éventuellement poreuse et filtrante (éponges).

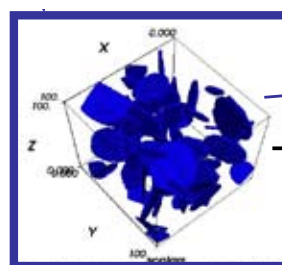
Dans le cas des milieux fracturés, comme les karsts⁶, les propriétés se retrouvent sous l'aspect du double-milieu, la notion de transport y est plurielle, et il faut tenir compte des actions de dissolution/précipitation dans un contexte d'instabilité potentielle.

Les modélisations mathématiques sont des outils, mais ils ne sont pas encore capables d'être déclinés à tous les sujets, mêmes partiels. Si on étudie les conséquences d'une infiltration d'eau polluée dans des karsts, on croise les difficultés suivantes : tout ce qui touche à l'écoulement – contexte en 3 dimensions, présence de singularités, de divers types d'écoulements (bas Re, haut Re, 2-phases...) –, le conflit entre une approche statistique ou des approches mécanistiques, le comportement de la ressource avec le changement climatique – quel type de modèle pour le traduire ? les modèles statistiques sont-ils assez robustes ? –, les éléments de morphologie, les dynamiques de dissolution, le transport multi-phasique et la pollution...

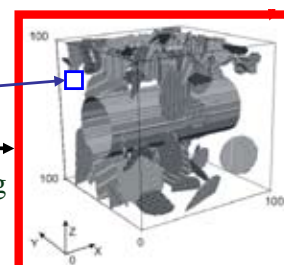


Aujourd'hui, nous ne savons même pas s'il est possible, dans l'absolu, d'avoir des modèles homogénéisés. Les modèles actuels sont très compartimentés, et souvent statistiques. Ce sont ces derniers qui sont utilisés dans les agences de l'eau. Or les statistiques ne tiennent pas compte des changements, comme ceux liés au climat, et leur pertinence, dans la gestion à long terme, reste limitée. C'est pourquoi nous avons besoin de développer des modèles mécanistiques nouveaux.

Obtenir les conductivités hydrauliques à l'échelle de Darcy

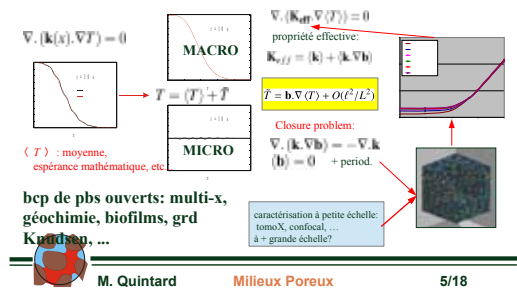


Upscaling



Injecter ces propriétés dans un modèle grande échelle avec discontinuités hydrauliques régionales.

Aspect multiéchelle: une introduction schématique (suite)



Les modèles correspondent généralement à des études à petites échelles. Est-il possible (et pertinent), pour étudier les réactions d'un aquifère karstique, d'obtenir les conductivités hydrauliques à l'échelle de Darcy⁷, puis d'injecter ces propriétés dans un modèle grande échelle avec les discontinuités régionales ? Les techniques pour calcul des propriétés effectives sont très coûteuses, et nous devons veiller à la pertinence des modèles utilisés ; certains modèles connus pour certaines réactions le sont généralement à très petite échelle.

Est-ce utile de vouloir modéliser selon des modèles physiques ? Peut-être trouverons-nous d'autres voies plus intégratives ? Dans l'état actuel des connaissances, nous ne savons pas s'il est même possible d'obtenir une homogénéisation des modèles ; il nous faut définir clairement les caractérisations (expérimentations, problème inverse...) et les types de modélisation.

Au niveau des recherches, les interactions multidisciplinaires (biochimie, géochimie, géologie, écologie, toxicologie...) sont plus que souhaitées, mais même le croisement de plusieurs domaines de compétences se heurte à la complexité des réactions et à cette notion de multi-échelles, difficile à appréhender dans son ensemble de manière fine. D'autant que les difficultés rencontrées pour les milieux karstiques se retrouvent ailleurs, comme dans les tourbières⁸ ou les periphytons⁹...

Les rôles du vivant à toutes les échelles,

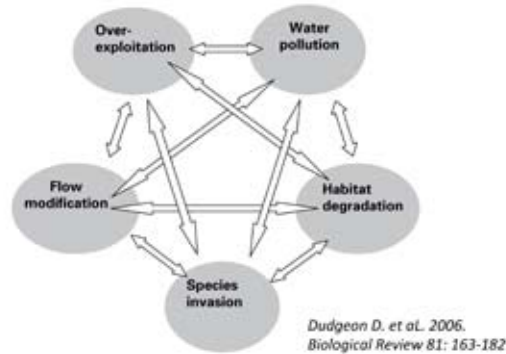
par Luc Abbadie (BIOEMCO – Biogéochimie et écologie des milieux continentaux –, Paris)

L'eau douce représente 0,01 % de l'eau libre planétaire et 0,8 % de la surface de la Terre ; elle contient 100 000 espèces aquatiques décrites (sur un total de 1 750 000 espèces décrites), 20 000 espèces de vertébrés (total décrit : 45 000) et 10 000 espèces de poissons (sur 25 000 espèces décrites)¹⁰. Or la biodiversité, sous la pression du changement environnemental, diminue.

Ces changements proviennent de la surexploitation des ressources, des pollutions (notamment par les nutriments, les perturbateurs endocriniens...), la dégradation des habitats, la modification des débits des flux d'eau (baisse d'étiage, barrages...). Se pose aussi la question des espèces introduites, qui peuvent perturber l'équilibre d'un milieu.

L'étude du phytoplancton dans la Loire de 1985 à 2008, par exemple, montre une importante réduction d'abondance (cellules/litre) et du biovolume ($\mu\text{m}^3/\text{L}^{-1}$) ; on note cependant une augmentation du nombre de genres de plancton.

La Loire a connu pendant cette période une baisse du phosphore qu'elle contenait, et une augmentation des pesticides. Une forme d'eutrophisation¹¹, dont les conséquences sont une

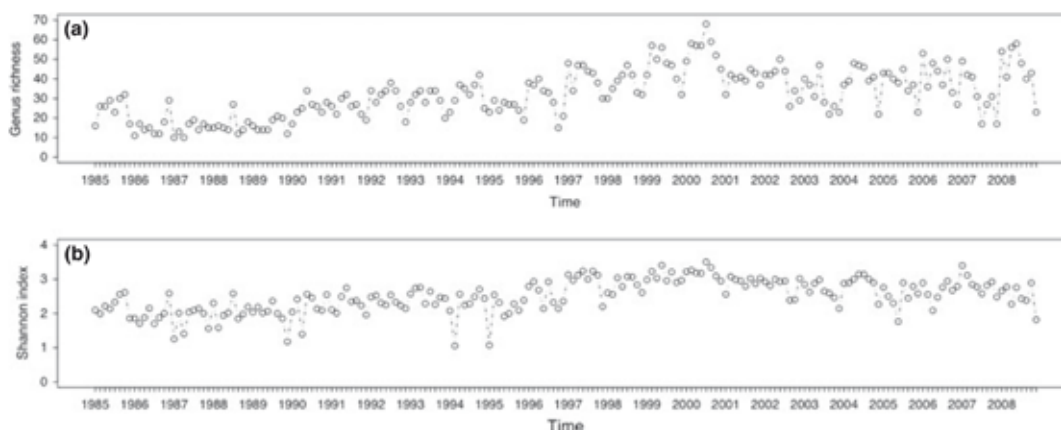


production phytoplanctonique accrue (parfois de cyanobactéries toxiques), et un déficit d'oxygène dans les couches d'eaux profondes.

Bilan statut des espèces de poissons (ONEMA 2013) : certaines espèces sont en augmentation, d'autres, en réduction. Ces évolutions marquent une forme de richesse spécifique qui augmente ; les espèces en augmentation sont le plus souvent des espèces introduites (ex. le silure). On note des différences remarquables d'occurrences (en %) de 47 espèces de poissons, entre 1990 et 2009 (voir schéma). Pour deux cas d'étude parmi eux (poissons et plancton), les évolutions sont rapides.

10 d'après Dudgeon & al. 2005, *Biol. Rev.* 81: 163-182 & Lévêque, 2005, *Hydrobiologia* 542: 39]67

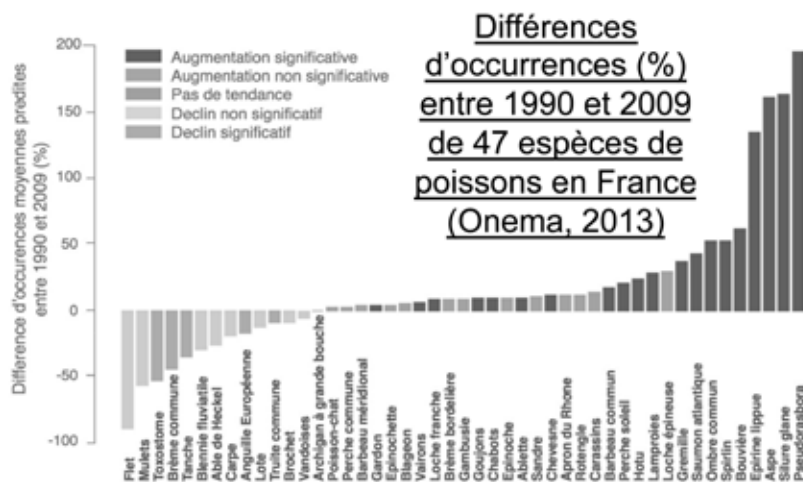
11 Enrichissement des eaux en éléments nutritifs (azote N, phosphore P)



Nombre de genres (a) et indice de Shannon (b) du phytoplancton dans la Loire de 1985 à 2008

Larroudé et al. 2013. *Global Change Biology* 19: 1620-1631

L'indice de Shannon est un indice permettant de mesurer la biodiversité ; il est utilisé dans de nombreuses études de la pollution, et permet de mettre en exergue les modifications des structures des groupes de population.



Dans la science des sols, on appelle priming effect l'introduction énergétique dans les sols (paille...), qui induit une variation de la composition des sols. Le principe à appliquer à l'eau est le même. Ainsi, on remarque que la matière organique labile¹³ est exsudée en grande quantité par le phytoplancton ; la matière organique récalcitrante peut représenter jusqu'à 80 % du carbone organique total dans les eaux ; la matière organique érodée sur les continents est très récalcitrante ; 50 % de la matière organique érodée ne se retrouve pas dans les sédiments marins...

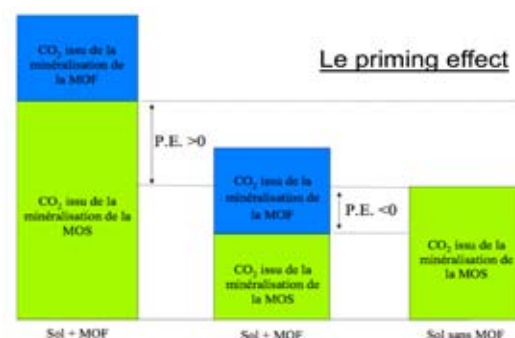
12 Un réseau trophique est un ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la biomasse circulent (échanges d'éléments tel que le flux de carbone et d'azote entre les différents niveaux de la chaîne alimentaire, échange de carbone entre les végétaux autotrophes et les hétérotrophes).

La remédiation de cette eutrophisation peut se faire de différentes façons :

- moyens physiques > recouvrir les sédiments trop riches par des couches d'argile
- physico-chimique
- biologique > rétablir les écotones tampons, réintroduire des espèces (végétales...) pour jouer sur l'équilibre du milieu – favoriser les macrophytes et exporter la biomasse produite, « jouer » avec les réseaux trophiques¹² (aux différents niveaux de la chaîne alimentaire).

13 La matière organique que nous mesurons dans les sols peut être scindée en trois fractions différentes selon leur potentiel de minéralisation. Il est d'abord question de la matière organique labile appelée aussi fraction active à cause de sa décomposition rapide, ensuite de la matière organique lentement minéralisable et enfin de la fraction stable ou récalcitrante à la minéralisation. La fraction labile représente entre 5 et 10 % de la matière organique totale (N'Dayegamiye et al, 1997).

Il est ainsi possible de « jouer » sur le nombre d'algues planctoniques selon le nombre de poissons, qui mangent eux-mêmes du plancton phytophage... À cela s'ajoutent les contraintes stoechiométriques, c'est à dire des relations quantitatives entre réactifs et produits au cours d'une réaction chimique. Le ratio carbone/phosphore varie selon les espèces : poissons – zooplancton – bactéries – algues, seston...



Le vivant et le non vivant sont constamment en interaction ; de fait, le vivant est un outil potentiel pour modifier la physico-chimie de l'environnement. Mais le « statut » du vivant change avec le contexte : il faut expliciter la complexité. Notamment par la recherche de la généricité¹⁴, nécessaire pour agir sur les communautés présentes dans les écosystèmes avec stratégie, sans jouer aux apprentis-sorciers. Pour cela, il faut préalablement caractériser l'écosystème dans le cadre des sciences « omiques »¹⁵ et mener l'ensemble des expérimentations et des modélisations propres à chaque environnement.

14 La programmation générique, ou généricité, consiste à définir des algorithmes identiques opérant sur des données de types différents. On définit de cette façon des procédures ou des types entiers génériques.

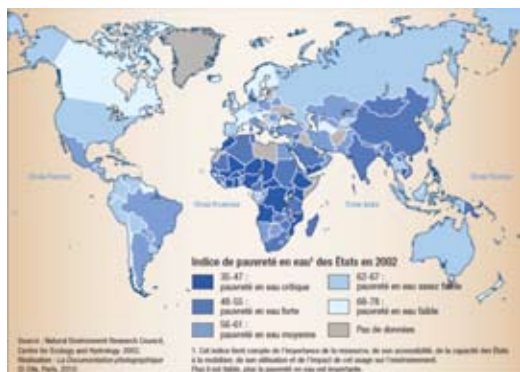
Le vivant est un facteur déterminant dans les conditions d'un écosystème. Et il est nécessaire de caractériser les eaux par un réseau trophique probable (et pour la stabilité du réseau) pour qualifier les eaux (et ainsi répondre aux exigences de la DCE). Et ce, en tenant compte du flux de sédimentation, qui varie en fonction du réseau trophique, c'est à dire qu'il dépend de la présence ou de l'absence de poissons. On a noté, par exemple, qu'un écosystème comporte 40 % de biodégradabilité potentielle en présence de poissons. La matière organique issue des milieux avec une forte charge en poissons planctophages est produite en plus grandes quantités et est plus dégradable. On assiste ainsi à une augmentation du recyclage interne à cet écosystème.

15 S'appuyant largement sur les technologies de pointe et les avancées des technologies de l'information, les sciences « omiques » regroupent des champs d'étude de la biologie qui s'intéressent aux interactions dans et entre des ensembles vivants complexes (espèces, populations, individus, cellules, protéines, ARN, ADN) en prenant compte de l'environnement auquel ces ensembles vivants sont exposés et de l'écosystème dans lequel ils vivent.



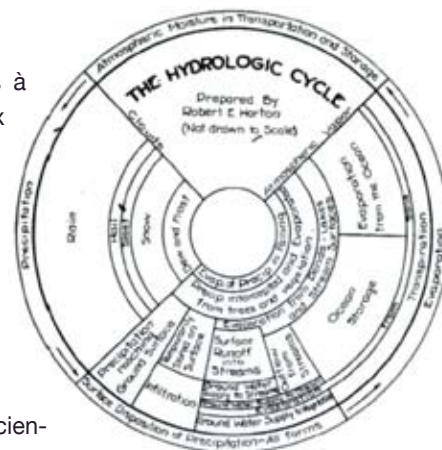
Conflits d'usage, enjeux géopolitiques et aménagement du territoire,

par David Blanchon (LAVUE, Paris)



Depuis les années 90, près de 10 000 articles sont parus sur le sujet. Le nombre de cartes du monde présentant ces enjeux permet d'avoir une idée du nombre d'approches et de critères de compréhension des situations ; on voit en effet une différence entre une carte présentant la quantité d'eau par habitant/km2, celle qui schématise l'indice de pauvreté en eau des États (importance de la ressource, accessibilité, aménagement et distribution), etc.

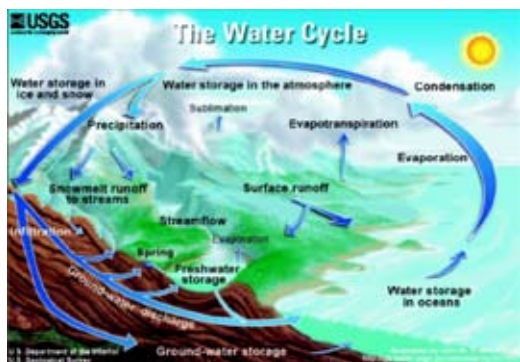
Le cadre d'analyse n'échappe pas à ces conceptions : on a ainsi deux grands cadres de réflexion et d'analyse qui se complètent et convergent, Mais malgré l'utilisation d'un vocabulaire commun, le passage d'un cadre d'analyse à l'autre est très difficile, notamment avec les notions de « systèmes ».



D'une part, le cadre d'analyse des sciences sociales vers la « matérialité » de l'eau : c'est une sorte d'« adaptation » des théories marxistes vers les thématiques de l'environnement – political ecology. L'intérêt pour l'eau s'y traduit par un concept du métabolisme (Marx) et un concept du cycle hydrosocial.

Reproduit in Linton, 2010 : 129.

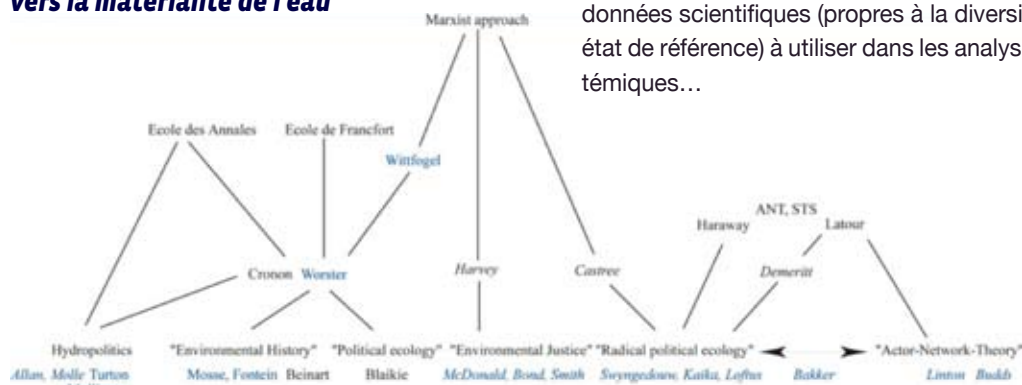
D'autre part, le cadre d'analyse des sciences hydrologiques vers les dynamiques socio-spatiales – The hydrologic cycle (1931). Celui-ci ne tient pas compte des habitations humaines ; introduction d'une approche systémique dans les années 50, puis, dans les années 80, introduction dans ce concept de la notion d'usages.



On tend vers une convergence des deux approches – socio-système/écosystème ou : hydro-système/hydropolitique – même si certaines notions ont du mal à passer d'une approche à l'autre.

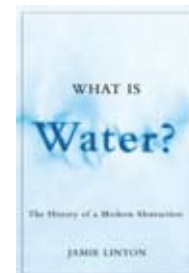
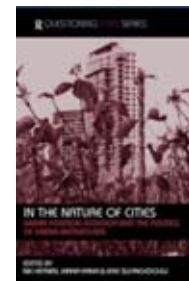
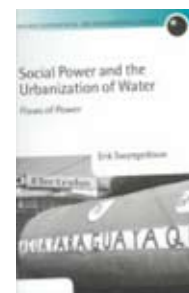
Deux autres notions sont problématiques et restent des verrous à dépasser : celle de l'équilibre (qui n'est pas le même selon le cadre d'analyse) et celle des échelles.

Des sciences sociales vers la matérialité de l'eau



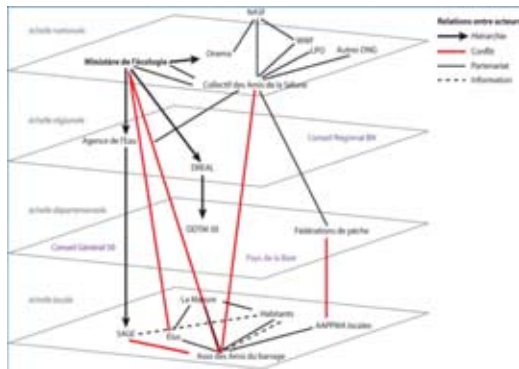
en italique : géographes / en bleu : auteurs écrivant spécifiquement sur l'eau

Source : Hydrosystèmes et hydropolitiques du Cap à Khartoum, HDR, Blanchon, 2011



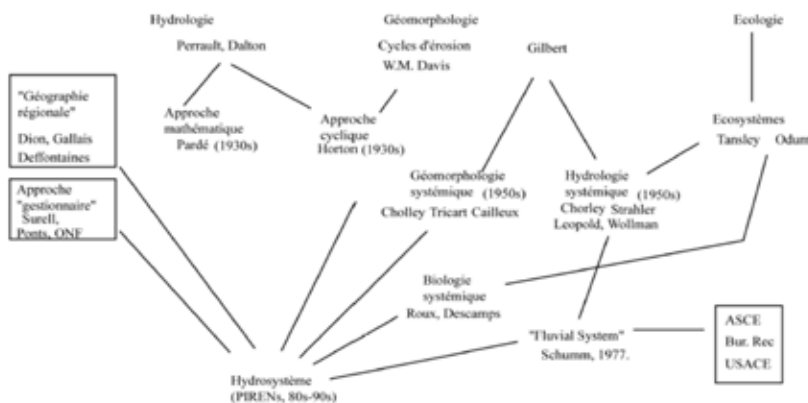
ANR REPPAVAL : Représentations de la nature et des paysages dans les petites vallées de l'ouest de la France face aux projets de restauration écologique

>>> www.reppaval.hypotheses.org



Dans les faits, les échanges verbaux et les accords sont beaucoup plus nombreux que les guerres de l'eau. Mais on constate que les différentes réalités terre-eau créent de forts déséquilibres locaux.

Figure 2.3 La construction du concept d'hydrosystème



Source : Hydrosystèmes et hydropolitiques du Cap à Khartoum, HDR, Blanchon, 2011

Les politiques de l'eau au niveau mondial

Des essais furent faits pour appliquer le principe des bassins versants un peu partout, notamment en Afrique du Sud ; en 1998, il y eut d'abord 19

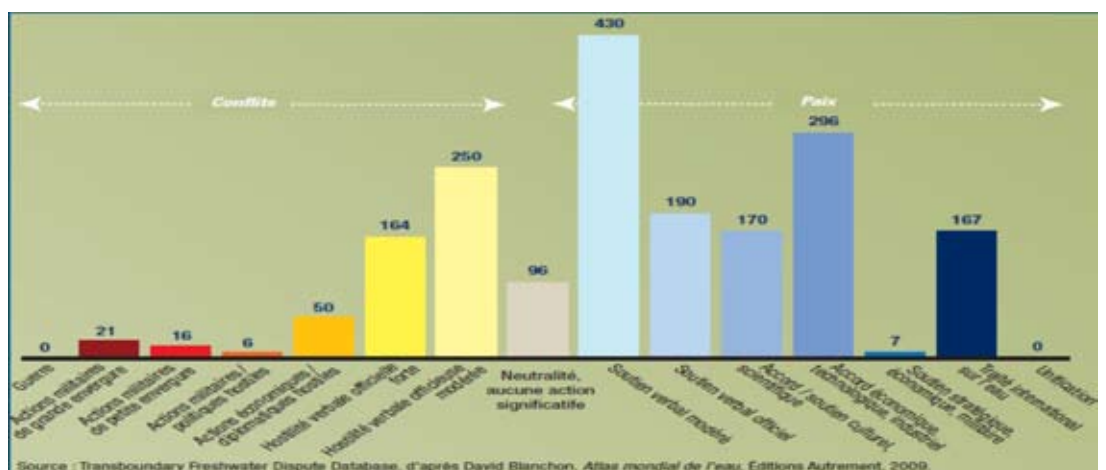


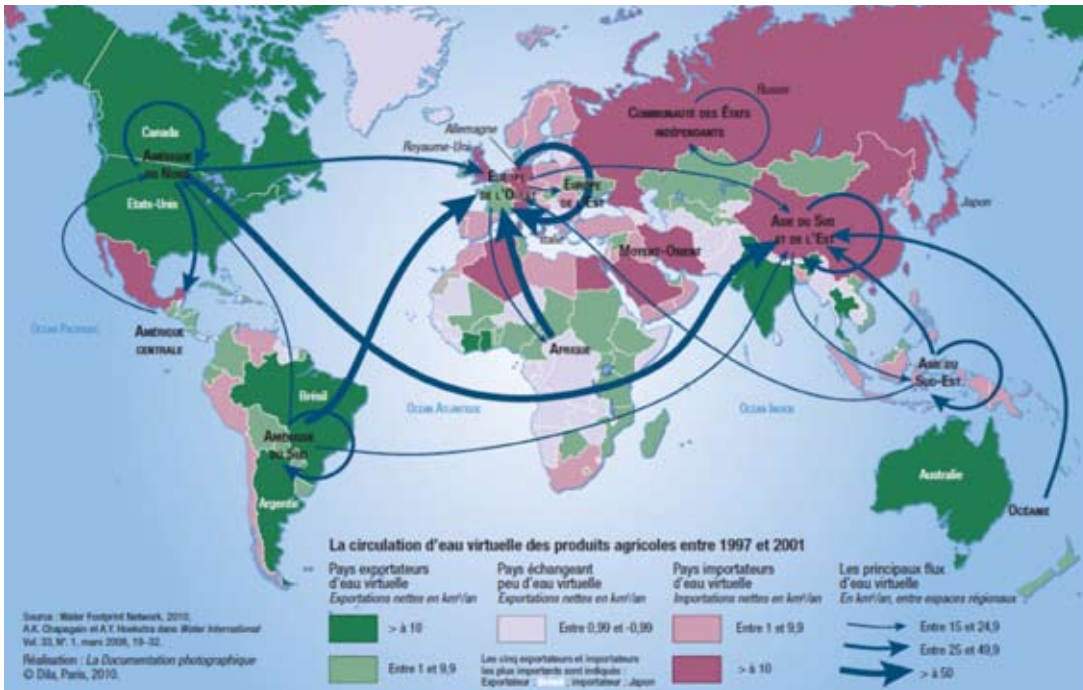
agences de l'eau, puis leur nombre passa à 9. Du point de vue hydropolitique, le besoin est réel de passer de l'échelle du bassin versant à une gestion centrée autour des problèmes qui, eux, se déclinent à l'échelle du local.

Fronts de recherche et perspectives...

Actuellement, on note un retour à la « grande hydraulique » dans les pays du Sud, notamment avec la construction de grands barrages, etc. Tandis que, dans les villes, l'accès à l'eau reste un problème toujours posé. Une étude de l'accès à l'eau, selon les normes de l'OMS, estime que près de 1 milliard de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'eau potable et à l'assainissement ; si l'on passe des normes – vraiment minimum – de l'OMS (25 L/j/pers. accessible à moins de 200 m) à celles de confort (comme en France), ce chiffre passe à 4 milliards de personnes dans le monde.

De façon générale, on constate une crise des modèles de la gestion de l'eau plutôt qu'une crise de l'eau.





Incidences des usages sur la qualité : pollutions récurrentes et émergentes,
 par Cécile Delolme (LEHNA - Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés - Lyon)

Les polluants sont des perturbateurs biologiques, physiques ou chimiques qui, au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions, vont développer des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou d'un organisme vivant¹⁶. Ils sont soumis à différents classements, selon l'approche choisie :

- Minéraux/organiques/colloïdaux ;
- Suivant leurs propriétés chimiques : solubilité, biodégradabilité, persistance, bioaccumulation ;
- Suivant leurs cibles : dangereux pour l'humain, pour certains organismes des écosystèmes (microorganismes, invertébrés, poissons, etc.) ;
- Et suivant leur cible interne : neurotoxique (Hg), perturbateurs endocriniens (Nonylphénol, résidus médicamenteux), reprotoxique, etc.

Difficulté de décrire un « cocktail » chimique

Modèle d'acide fulvique

Muscovite

Polysaccharide bactérien

Molécules Naturelles : produits majeurs

Benzène

Polluants (xénobiotiques) : produits traces

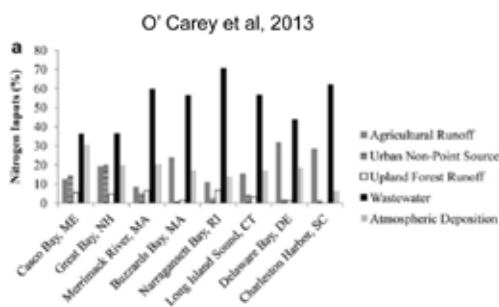
$$\text{Hg}^{2+} + \text{CH}_3 \xrightleftharpoons[\text{déméthylation}]{\text{méthylation}} \text{CH}_3\text{Hg}$$

Nonylphénol

D'où la difficulté de décrire un « cocktail » chimique, d'autant plus que le milieu naturel et les ajouts polluants interagissent entre eux. Pour cela, il est en effet nécessaire de croiser plusieurs actions :

16 Cahier ANR, 2012

- Comprendre, décrire et modéliser les interactions entre constituants naturels et les polluants traces ;
- Développer la prise de mesures in situ : captage chimique/biologique, échantillonneurs passifs (simulation de membranes biologiques), mesures optiques...



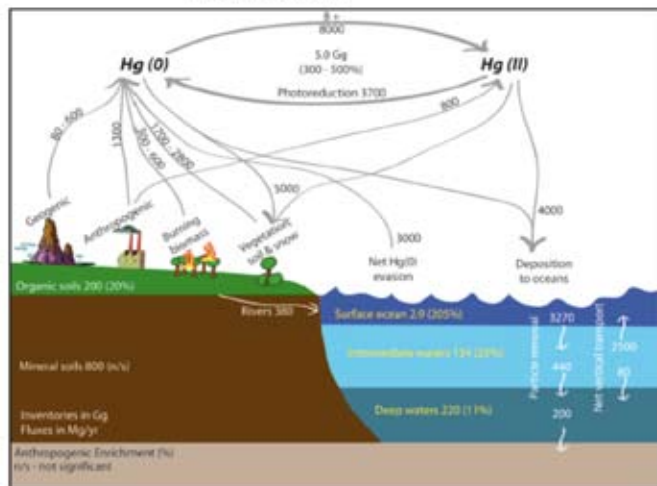


Figure 1. Current estimates of the fluxes and pools of mercury at the Earth's surface derived on this work, and building on previous studies. Hg(II) includes both gaseous and particulate forms, plus a negligible contribution (1Mg) from inert particulate mercury. The percentages in brackets are estimated increases in pools and fluxes due to anthropogenic activities over the past 150 years. Fluxes are in Mg yr⁻¹ and reservoirs are given in Gg.

- Développer les techniques d'analyse permettant de coupler le dosage des majeurs et des traces ;
- Poursuivre la caractérisation de la spéciation des espèces ;
- Développer des outils d'analyse pour de grandes masses d'échantillons et de données.

Tout d'abord, il est nécessaire de cibler les polluants à étudier en priorité. Pour cela, nous devons développer des méthodologies.

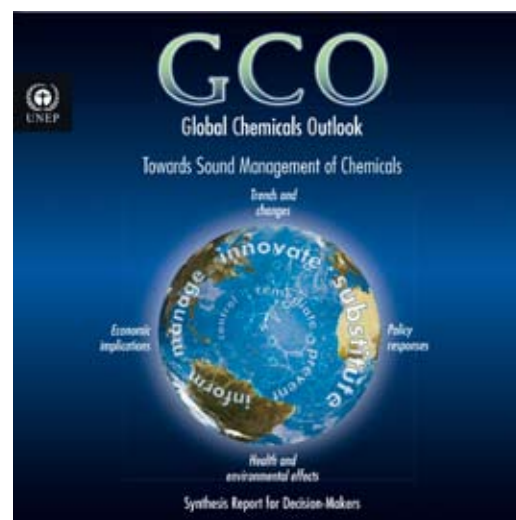
Ainsi nous savons que les eaux usées urbaines apportent une contribution majeure dans les apports de polluants : un apport massif d'azote et de phosphore, ainsi que des rejets médicamenteux. Prenons l'exemple des produits pharmaceutiques produits par les Hospices civils de Lyon : 960 molécules différentes y sont utilisées, dont 70 substances potentiellement bioaccumulables, et 14 présentant les plus grands risques... Il faut savoir quoi chercher pour

faire les analyses adéquates. Ainsi, Kostich et al. (2014) ont mesuré 56 produits pharmaceutiques dans les effluents de 50 stations majeures de traitement des eaux usées américaines : plusieurs molécules contre l'hypertension présentes dans 90 % des stations.

A cela s'ajoute les pollutions récurrentes liées à la gestion des eaux pluviales urbaines ; pour y remédier, il faudrait développer les aménagements nécessaires à la réinfiltration de l'eau dans les nappes, mais les eaux pluviales sont souvent très contaminées, notamment en sédiments pluviaux, qui entraînent dans leurs écoulements les résidus des gaz de circulation automobile, l'usure du mobilier urbain, etc. Ces sédiments sont généralement chargés en métaux lourds.

Dans le Grand Lyon, 240 ouvrages d'infiltration et de rétention ont été aménagés. Pour cela, il a fallu identifier les sources de polluants – connaissance des usages et des rejets à une échelle fine (parcelle) –, tracer les sources (isotopie, analyse des données), etc. Il est indispensable, pour une gestion efficace des eaux pluviales, de repenser complètement le cycle de l'eau en milieu urbain.

Dans cette logique, il serait utile de concevoir les aménagements au croisement entre ingénierie et écologie, comme par exemple de réintroduire les propriétés épuratoires des zones humides en milieu urbain.



Aujourd'hui, des milliers de molécules sont mises sur le marché : 143 825 molécules sont enregistrées dans REACH, en sachant que cet enregistrement n'est pas contraint, et donc la

Exemples de familles de molécules à effet perturbateur endocrinien et leurs sources potentielles

Famille chimique	Sources potentielles	Exemples
Phthalates	Plastiques, cosmétiques	Dibutyl phtalate
Alkylphénols	Détergents, plastiques, pesticides	Nonylphenol
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	Sources de combustion: fumée de cigarette, émission des moteurs diesels, incendies	Benzo(a)pyrène
Polychlorobiphényles	Transformateurs électriques	PCB, Arochlor
Anciens pesticides	Résiduels de stockage, pollution rémanente	DDT, Dieldrine, Chlordane
Autres pesticides	Agriculture, nettoyages urbains, jardins particuliers	Atrazine, Ethylène thiourée, Heptachlor, Lindane, Malathion
Retardateurs de flamme	Mousses pour les mobiliers, tapis, équipements électroniques	Polybromodiphényles (PBDE)
Dérivés phénoliques	Désinfectants, plastiques, cosmétiques	Bisphénols A, Parabens, Halogéno-phénols

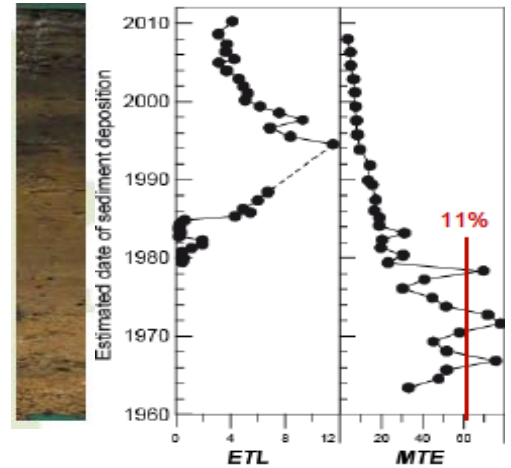
Source : Expertise collective AFSSET INSERM, 2008: Cancer et environnement.

liste, non exhaustive. L'industrie chimique est en pleine expansion à l'échelle mondiale, dont le marché représentait 171 milliards US \$ en 1970, et représente 4120 milliards US \$ en 2010.

Nous sommes confrontés au besoin de mieux comprendre les interactions entre les flux d'eau et les berges dans le processus de rétention/dégradation des polluants. Et l'on voit se développer de nouveaux problèmes avec le développement de l'usage de métaux et de terres rares, à destination des nouvelles technologies. Ces problématiques sont des enjeux émergents, sur lesquels nos connaissances et législations ne sont pas efficaces. Nous devons encore apprendre à connaître le devenir des nanomatériaux¹⁷ en milieu aquatique – détection/dosage de faibles doses, dégradation/oxydation, mobilité, effets – et, pour cela, réussir à associer la physique, la chimie des surfaces, la géochimie et l'écotoxicologie... afin d'être capable d'une approche globale, à même d'appréhender les flux et les stocks.

L'un des enjeux majeurs actuels porte sur les conséquences des perturbateurs endocriniens ; ceux-ci se trouvent dans la compositions des anciens comme des nouveaux pesticides, dans les détergents...

Or cette nécessité d'allier une approche globale à une compréhension fine des phénomènes rejoint le besoin de trouver des outils d'aide à la décision pour les acteurs opérationnels : comment intégrer les coûts environnementaux et sanitaires dans les processus de décision ; apporter des connaissances et des informations aux bonnes échelles de décision ; poursuivre la collecte et la synthèse de données de qualité des eaux pour évaluer des politiques et choix d'aménagement sur le long terme.



Evolution concentration PCB (µg/kg) dans carotte sédiment du Rhône, Mourier et al., 2013

17 Matériaux solides dont au moins une des dimensions est inférieure à 100 nm –nanocouches, nanotubes, nanoparticules, Carbone (fullerenes – C60) et ajouts dérivés aminés, inorganique (oxyde de métaux – Ti, Fe, Zn, Ce), Or et Argent, semi-conducteurs à points quantiques (Si, CdS, CdSe, CdTe)

Analyse physicochimique de l'eau, eau potable et normalisation,

par Bernard Legube (IC2MP, ENSI-Poitiers)

L'eau potable est aujourd'hui un challenge pour la physico-chimie. Dans un pays comme la France, les normes de qualité et l'exigence exprimée vis-à-vis de cette ressource rendent la chose complexe...



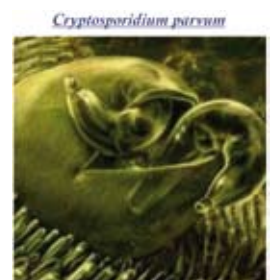
Les Cévennes, c'est aussi ça : cette rivière chargée en fer et en métaux lourds ...

Giardia Lambia



Genomics, Proteomics and Bioinformatics
September 27, 2007

Il y a des milliers de substances, dans l'eau. L'eau contient des matières en suspension et des colloïdes, qui doivent être éliminés car ce sont des supports bactériens et des absorbants pour les polluants ; elle contient aussi des matières organiques dissoutes, des composés minéraux naturels, ainsi que des bactéries, virus, protozoaires (qui peuvent être des sources de contamination importante) et des algues. A tout ceci



www.WaterFilterReview.com

Exemples de limites de qualité au robinet	Valeur	Exemples de références de qualité au robinet	Valeur
E. Coli	0 / 250 mL	Bac. sulfite réductr.	0 / 100 mL
Acrylamide	0,1 µg/L	Aluminium	200 µg/L
Arsenic	10 µg/L	Ammonium	100 µg/L
Benzo(a) pyrène	0,01 µg/L	Carbone organique	2 mg/L
Bromate	10 µg/L	Chlorite	200 µg/L
Cadmium	5 µg/L	Cuivre	1 mg/L
Chlorure de vinyle	0,5 µg/L	Fer	200 µg/L
Mercure	1 µg/L	Manganèse	50 µg/L
Microcystines (total)	1 µg/L	pH	6,5 à 9

s'ajoutent les polluants apportés par l'agriculture et ceux liés à l'industrie (métaux lourds, OCB, hydrocarbures...), ainsi que les pollutions dites « domestiques » : les résidus pharmaceutiques, hormones et autres, les pesticides, etc. sont qualifiés de micro-polluants organiques.

Réglementation de l'eau potable

« Une eau destinée à la consommation humaine ne doit pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou de toute autre substance présentant un danger pour la santé des personnes. » D'où la détermination de normes, ou paramètres de qualité.

En l'absence d'étude épidémiologique, on établit une DSENO (dose sans effet négatif observé) en milligramme/kg/jour sur animaux, qui est ensuite extrapolée à l'homme en DJA (dose journalière admissible) en microgramme/kg/jour. Puis on tient compte du pourcentage d'eau dans le bol alimentaire et d'un poids moyen d'individu de 60 kg consommant 2 litres d'eau par jour pour établir la norme.

Ex. d'un pesticide :

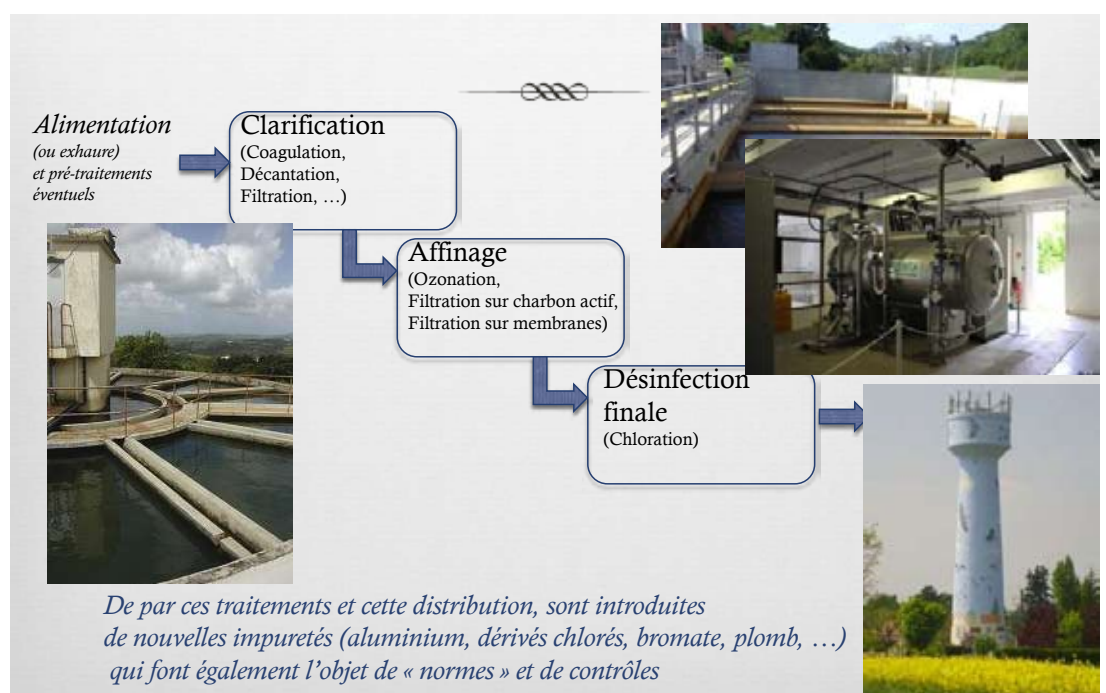
DSENO = 07 mg/kg/jour

DJA = 0,7 µg/kg/jour

10 % du bol alimentaire ; 60 kg ; 2 litres par jour
 > Norme théorique : $60 \times 0,7 \times 10 \% = 4,2 \mu\text{g}/2 \text{ litres}$
 = 2,1 µg/L (norme US EPA)
 > norme européenne appliquée : 0,1 µg/L

La réglementation actuelle repose principalement sur les limites de qualité (2 paramètres organiques + 30 paramètres chimiques) et les références de qualité (4+20+4 paramètres) de l'arrêté du 11 juillet 2007.

Dans les faits, l'eau brute est captée puis traitée, et l'eau produite est ensuite contrôlée. Or ces traitements introduisent de nouvelles impuretés (aluminium, dérivés chlorés, plomb... plus les résidus internes au réseau de distribution, canalisation etc.). De plus, certaines matières organiques naturelles (MON) peuvent créer,

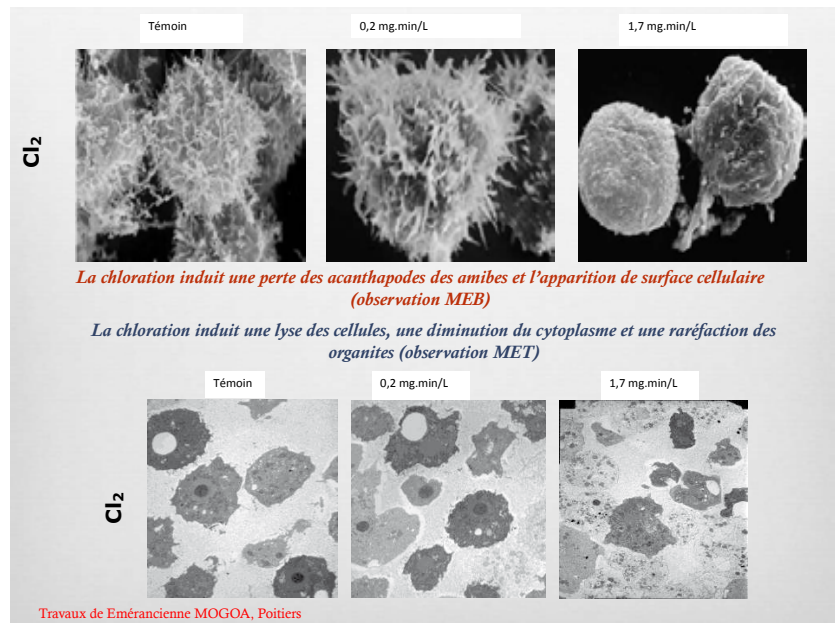


lorsqu'on les traite au chlore, la formation de sous-produits de désinfection dangereux pour l'être humain. En effet, le chlore est un oxydant, il réagit avec de nombreux micropolluants organiques sans les détruire.

La connaissance incomplète que nous avons des MON, actuellement, représente l'un des verrous principaux en physico-chimie. Pour l'instant, le système de traitement en passant par les milieux naturels qui « retiennent » les molécules et les micro-organismes reste le plus performant. Par exemple à Rochefort (Charente Maritime), où on utilise un lagunage naturel au bord de l'Atlantique : ce système se révèle très performant.

La chimie analytique pour l'environnement est un outil indispensable. Elle est à l'origine des normes actuelles et, par la suite, du développement des recherches sur les relations entre l'eau et la santé, ainsi que sur les travaux sur les procédés de traitement de l'eau destinée à la consommation humaine.

Par exemple la chloration des eaux inactive-t-elle complètement les micro-organismes pathogènes ? Non. Les recherches nécessaires à l'étude de cette réaction exigent une collaboration entre la physico-chimie et la micro-biologie. Et les chercheurs en physico-chimie n'intègrent pas toujours suffisamment les données du milieu naturel : c'est l'un des verrous principaux. Une meilleure connaissance des matières organiques naturelles est en effet indispensable, car lors de



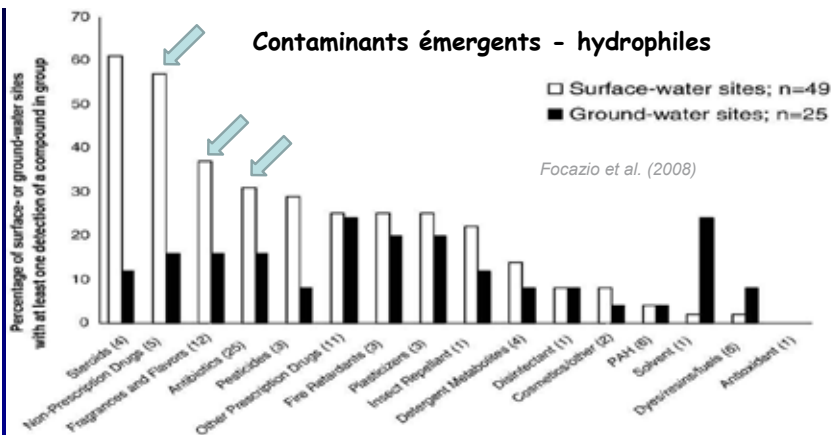
la clarification elles complexent et consomment du coagulant (métal trivalent Fe ou Al), ce qui permet de les éliminer (+) mais aussi d'entraîner un résiduel de métal dans l'eau distribuée (-). De plus, les matières organiques naturelles entrent en compétition avec l'adsorption des polluants sur charbon actif ou autre adsorbant ; elles consomment des oxydants lors des étapes d'ozonation et de chloration, en formant des sous-produits de désinfection ; elles contribuent très significativement au colmatage et au vieillissement des membranes ; elles diminuent la sensibilité des techniques analytiques multi-résidus par effet de matrice.

Contamination des milieux aquatiques par les composés chimiques : lien entre présence et effets,
par Héléne Budzinski (EPOC, Université Bordeaux I)

La production mondiale de substances chimiques est passée de 1 million de tonnes en 1930 à 400 millions aujourd'hui. Or, tout ce que produit l'homme finit, tôt ou tard, dans l'eau. 60 000 de ces substances sont communément utilisées, et 95 % d'entre elles contiennent au moins un atome de C (composés organiques).

On constate un problème entre les standards de protection de l'eau pour l'être humain et la notion d'eau comme milieu de vie. Une mauvaise approche induit ce que l'on appelle le danger des coïncidences : on analyse bien ce que l'on





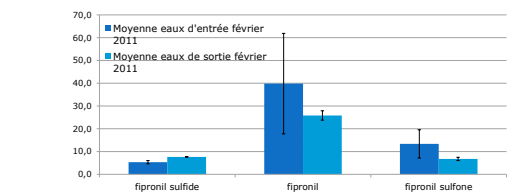
connaît bien, autrement dit, il est impossible de tout analyser, notamment les nouveaux composés, ou les composés inconnus (transformations...). Les composés généralement analysés sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organo-chlorés (pesticides, polychlorobiphényles, dioxines, furanes), les retardateurs de flamme (diphényl-éther-poly-

bromés –PBDE –...), les substances pharmaceutiques, cosmétiques, PFOS, PFOAS, Alkylphénols polyéthoxylates (détergents), les pesticides dans leur ensemble, phtalates, bisphénol A, BTEX, solvants chlorés, MTEBE/ETBE, etc.

De fait, nous sommes confrontés à des difficultés pour faire des analyses le plus large possible en faisant néanmoins des analyses fines (on parle ici de quantités de l'ordre du nanogramme/litre). Nous devons donc être en mesure d'identifier avec sensibilité des traces et ultra-traces de contaminations environnementales. Les hormones stéroïdiennes, par exemple, ont des effets toxiques au ng/L (NQE > endosulfan 0,5 ng/L). Et ce, dans des matrices complexes, contenant des mélanges de multi-contaminants, avec leurs propres spécificités et des multi-résidus. Leur présence a-t-elle des effets ? Et selon quelle variabilité/représentativité (spatiale-temporelle) ?

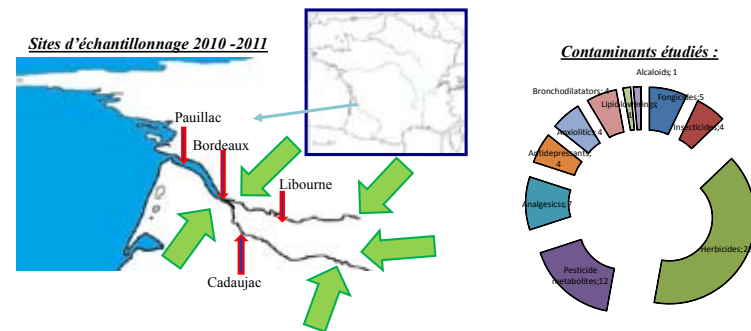
Application à l'estuaire de la Gironde

Composé d'origine majoritairement urbaine
= détecté en entrée et sortie de station d'épuration



Concentrations (ng/L) en fipronil et ses métabolites
Clos de Hilde - Février 2011

Nous travaillons à partir d'échantillonnages ponctuels, images instantanées de l'état d'un milieu, et d'échantillonnages intégratifs, images moyennées de l'état d'un milieu. Les capteurs font des mesures intégrales de façon passive ; c'est le travail d'analyse, ensuite, qui exige un suivi particulier. Il existe différentes sortes de capteurs : les capteurs biologiques ou naturels (biofilms, mollusques, certains crustacés...), et les capteurs échantillonneurs passifs.



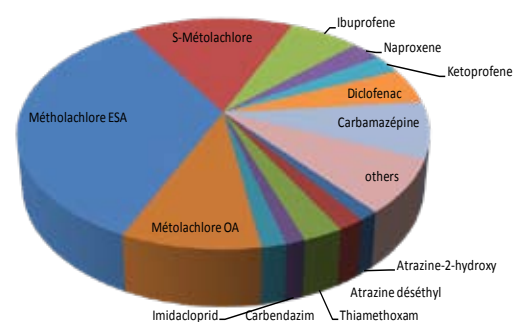
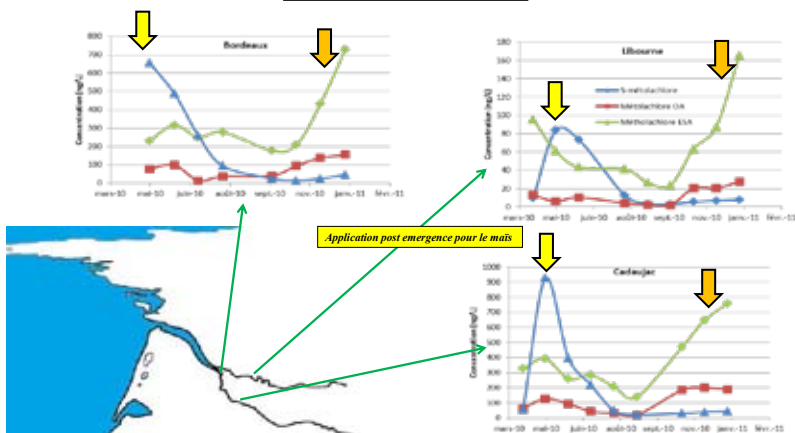
Evaluation des impacts anthropiques et pressures sur l'estuaire de la Gironde : ce système aquatique est caractérisé par une forte variabilité (forts/faibles débits, marée, particules variables, ...) ce qui complique l'évaluation des pressions chimiques

Deux classes de contaminants : pharmaceutiques et pesticides

Echantillonneurs passifs

Application aux pesticides

S-métolachlore et ses métabolites

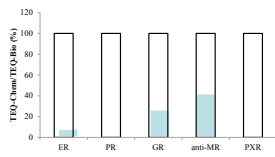


Distribution globale des composés quantifiés dans l'estuaire n=40, 2010-2011

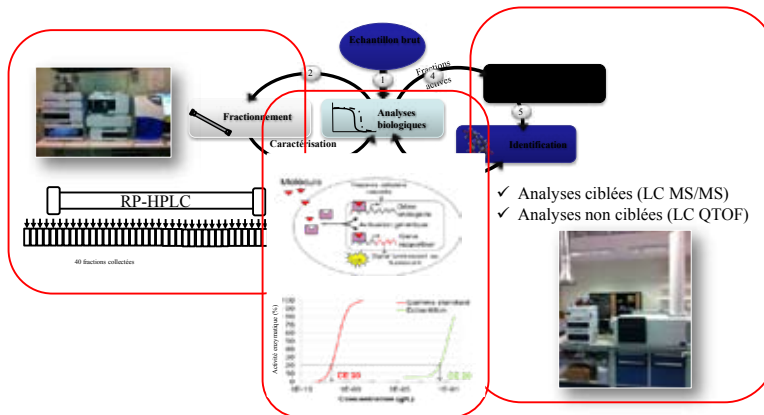
➤ Analyses chimiques ciblées (LC MS/MS)

TEQ-Chem = Σ Ci x TEFi
 TEF = CE20 composés de référence
 CE 20 composé standard

- ✓ 113 composés recherchés
- ✓ 61 composés détectés :
 - 16 stéroïdes
 - 45 composés pharmaceutiques



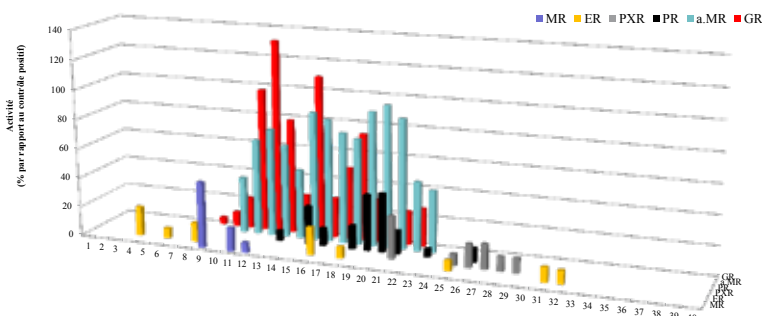
➔ EDA pour la recherche des composés actifs non identifiés



Évaluation des impacts anthropiques et des pressures sur l'estuaire de la Gironde : ce système aquatique est caractérisé par une forte variabilité (forts/faibles débits, marées, particules variables...), ce qui complique l'évaluation des pressions chimiques. Appliquée aux pesticides, cette évaluation a permis de mesurer des pics de contamination post émergence pour le mais. Plus surprenant, elle a montré en février 2011 une forte toxicité au Fipronil (PNEC = 0.77 ng/L), dont l'usage agricole avait pourtant été interdit (on se serait donc attendu à de faibles concentrations environnementales). Ce composé a été identifié comme d'origine majoritairement urbaine, car détecté en entrée et sortie de station d'épuration. Or, en milieu naturel, il n'est normalement pas détecté dans des concentrations inférieures à 2 ng/L. D'où l'intérêt d'utiliser des capteurs passifs, qui enregistrent tout : c'est lors de l'analyse, qu'il nous faut veiller. Un suivi environnemental de ce composé a permis d'identifier son origine : si son usage agricole avait été interdit, il est néanmoins toujours utilisé dans les traitements vétérinaires comme anti-puces pour les chiens, et, dans le bâtiment, comme traitement contre les termites. C'est pourquoi on en retrouve toujours la trace dans les eaux.

Les analyses chimiques ciblées sont, de fait, efficaces pour trouver des traces de contaminants déjà identifiés, que l'on recherche. Mais elles peuvent passer à côté de pollutions, même graves, si l'on ne pense pas à les cibler. Or on ne peut constamment faire des analyses de toutes les molécules existantes, sans compter que les composés peuvent, entre eux ou soumis à des variations de températures, créer de nouveaux composés. Il faut donc tenir compte de tous les éléments propres aux contextes étudiés pour affiner, orienter les recherches qui doivent être faites. Par exemple, une rivière ayant une industrie pharmaceutique dans ses environs proches et une station d'épuration ; on constate une hyper-

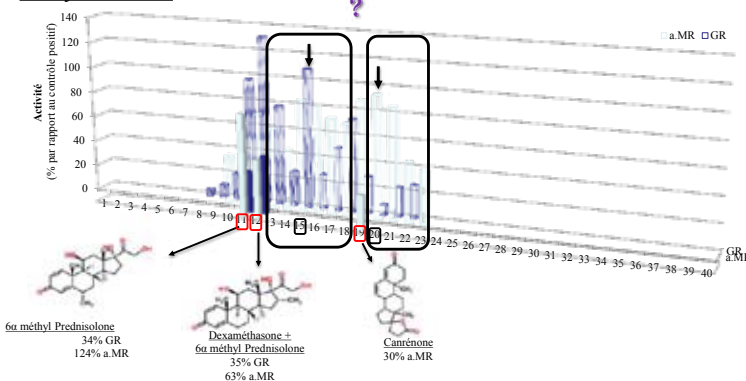
Profil biologique



➤ Focalisation sur la recherche de composés:

- Glucocortico-mimétiques
- Antagonistes des récepteurs minéralocorticoïques

Analyses ciblées



Analyses non ciblées

Fraction HPLC	F15	F20
Nb de composés	168	109
Nb de spectre MSMS	11	18



trophie des gonades (poissons), une insuffisance de frais associée à une intersexualité et l'induction de VTG : on en déduit une contamination par des perturbateurs endocriniens et on oriente les analyses dans ce sens, afin d'identifier précisément les composants responsables des effets observés. Les analyses chimiques ciblées recherchent 113 composés connus, parmi lesquels 61 seront détectés : 16 stéroïdes et 45 composés pharmaceutiques... En conclusion, nous devons développer les recherches par screening ciblé

quantitatif à forte sensibilité – notamment avec des accumulateurs de type capteurs passifs), développer les procédés d'identification fine et une attention accrue aux effets possibles, signes de présences de composés. Cette étude d'une gestion intégrée doit tenir compte des sources, qualité et quantité des eaux étudiées, les usages (qualitatifs et quantitatifs), ainsi que les voies et mécanismes (transferts, transformations...). Cela exige un couplage d'approches entre la chimie et la biologie.

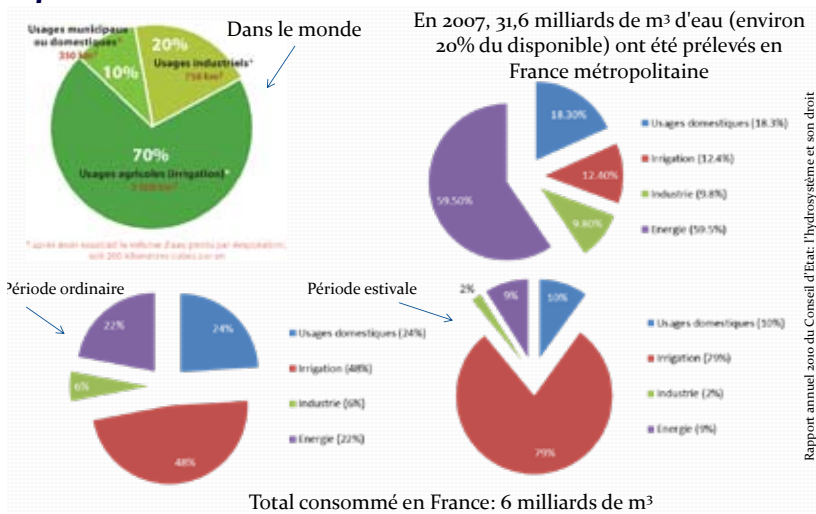
Les nouvelles sources d'eau,

par Marie-Noëlle Pons (LRGP – Laboratoire Réactions et Génie des procédés –, Nancy)

La Terre contient 97 % d'eau salée et 2,5 % d'eau douce, dont 70 % sont contenus dans les calottes glaciaires, icebergs et glaciers. Au final, 0,7 % de l'eau douce est réellement disponible.

La consommation d'eau totale en France est estimée à 6 milliards de mètres cube : 70 % pour un usage agricole, 20 % pour l'industrie, 10 % pour les usages municipaux et/ou domestiques.

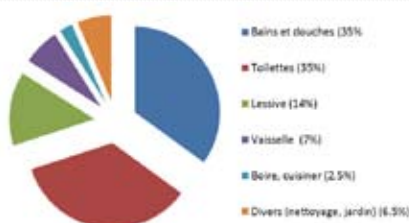
À quoi sert l'eau ?



Consommation d'eau domestique

	L/jour/hab	En France:
États-Unis	360	- Environ 120 m ³ par ménage et par an
France	157	- 55 m ³ par personne et par an,
Pays-Bas	128	- 157 litres par personne et par jour.
Belgique	120	- A tendance à diminuer
Bulgarie	116	- Variable suivant les régions et cadre de vie
Inde	25	
Certains pays africains	< 25	

Pour quoi faire (en France) ...



Plus élevé en ville

Nancy: 220 L
Paris: 410 L
Lyon: 380 L
Singapour: 160 L
Hong-Kong: 370 L
Alice Springs: 1000 L
New York: 1370 L
Las Vegas: 1600 L

Dans les usages domestiques, on a en moyenne 35 % de la consommation d'eau servant au bain ou à la douche, 35 % pour les toilettes, 14 % pour les lessives, 7 % pour la vaisselle, etc.

Parmi les solutions envisagées pour faire face au stress hydrique – qui ne fera qu'augmenter avec l'accroissement de la population mondiale –, on a pensé à de nouvelles sources d'eau : les solutions techniques existent, en adaptant le type de ressources au type d'usage, mais elles méritent encore des améliorations (empreinte énergétique, impact environnemental, meilleure prise en compte des micro-polluants, détection de défauts, etc.) et, surtout, de tenir compte du facteur humain.

L'eau de pluie, lorsqu'elle traverse l'atmosphère, lave le ciel : elle récupère ainsi du soufre et de l'azote, qui la rendent acide, ainsi que des HAPS et autres micro-polluants organiques, et des pesticides en suspension. Lorsqu'elle s'écoule sur les toitures, elle en emporte les traces de métaux lourds (zinc, cuivre, plomb...) ainsi que les fientes des oiseaux. Arrivée au sol, elle contient potentiellement des substances pathogènes et est très peu minéralisée. Elle n'est pas potable. Mais elle est « gratuite » et, à l'échelle d'une municipalité, il est utile d'aménager un double réseau, afin de canaliser et de stocker ces eaux pluviales pour un usage communautaire (comme le nettoyage des voiries...), en prenant garde qu'elle ne puis-

se pas croupir, ce qui créerait un nouveau risque de santé publique.

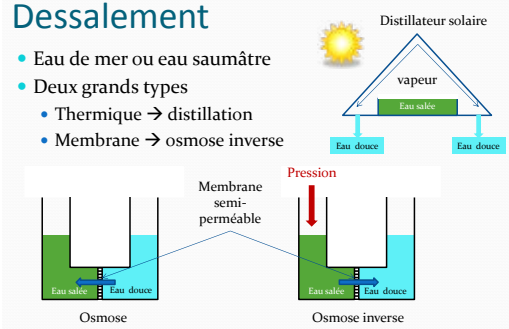
Les icebergs pourraient être remorqués, ou on les fait dériver (étudié par Georges Mougin, Dassault Systems...)

L'eau de mer peut être réutilisée directement, dans certains cas. Par exemple, à Hong Kong, 11L/jour/hab. sont utilisés pour les toilettes ; cela nécessite un double réseau avec un simple système de filtration. Mais ce procédé pose des problèmes de corrosion, d'adaptation des bactéries en station d'épuration des eaux résiduaires, et n'est possible que pour des îles ou des régions côtières.

Le dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre fonctionne selon deux types de procédés : thermique (par distillation), ou par membrane (osmose inverse). Le premier procédé est efficace mais onéreux (coût énergétique), et le second a une efficacité variable (350 à 1000 mg/L pour la salinité – l'eau du robinet, en comparaison, a une salinité de 400 mg/L). Les points durs à dépasser sont donc, dans le premier cas, de réussir à optimiser l'utilisation énergétique, et dans le cas de la membrane, d'en améliorer le colmatage. Dans les deux cas, l'impact sur les écosystèmes est à surveiller : le pompage massif et le rejet de la saumure ne sont pas neutres, tant à l'échelle locale que globale.

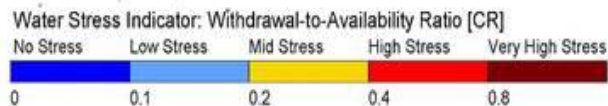
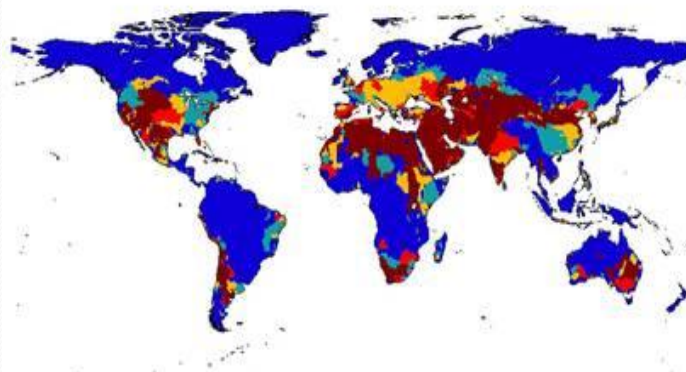
Dessalement

- Eau de mer ou eau saumâtre
- Deux grands types
 - Thermique → distillation
 - Membrane → osmose inverse



La réutilisation des eaux usées traitées : à Singapour, par exemple, 15 % des eaux usées sont traitées pour être réutilisées ; d'une part pour l'industrie (notamment la micro-électronique), et d'autre part en ré-utilisation indirecte (6 % > 1 % eau potable). Le traitement doit alors être

Bilan entre les ressources en eau et l'utilisation de l'eau

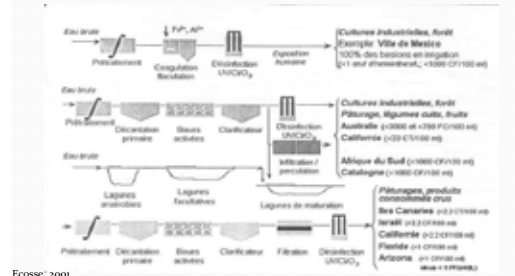


Source: WaterGAP 2.0 - December 1999

Influence:
Urbanisation
Niveau de vie
Héliotropisme
Variabilité climatique
...

adapté à l'usage. Dans ce cas, l'aspect sociétal est central : la méconnaissance du public induit une confusion entre station d'épuration des eaux résiduaires et station de traitement de l'eau (donc de potabilisation) ; l'eau usée traitée est relative-

Un traitement adapté à l'usage



Ecosse; 2001

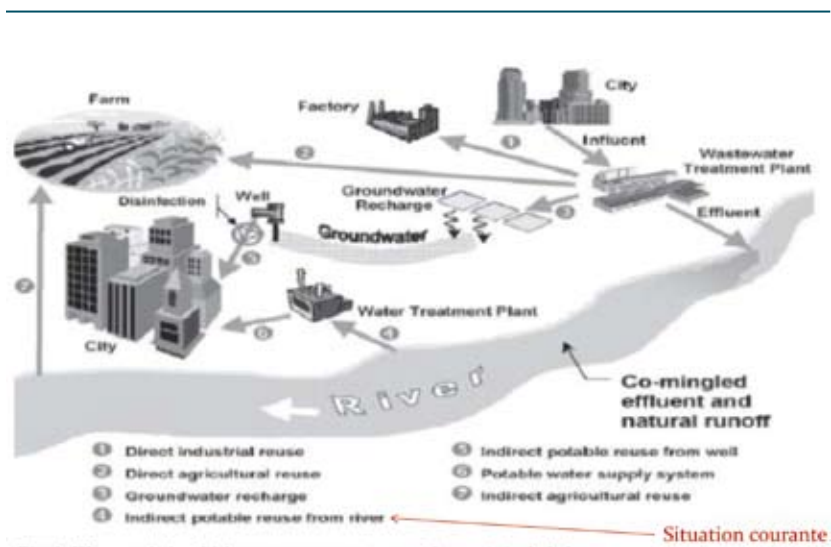


Fig. 1. Water cycle in which wastewater treatment and reuse is included.

A.N. Angelakis & B. Durham, Desalination 218 (2008) 3-12

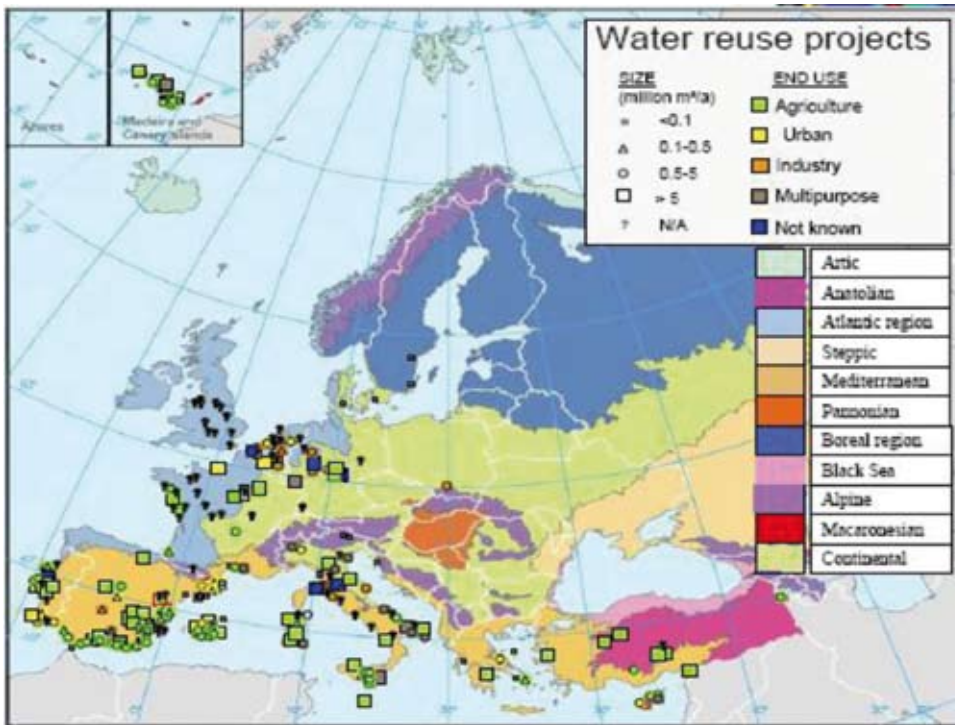


Fig. 2. Bio-geographic distribution of water reuse schemes: sorted per size and field of sectoral water uses (adapted from [7]) — bio-geographic European map from [8].

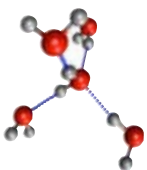
ment acceptée pour certains usages (lavage des rues, arrosage de golf, etc.) et nécessite un double réseau. La recharge des aquifères ou des réservoirs est, dans l'ensemble, moins problématique.

Tout ceci exige bien sûr une sécurisation accrue pour éviter les problèmes de santé publique : il faut pouvoir détecter rapidement les pathogènes, limiter les problèmes de mélange liés à une rupture de membrane (rapidité de réaction), assurer le suivi des aquifères et des réservoirs... Les méthodes d'analyses optiques sont, dans ce cas, rapides et sans réactifs.

Lors des échanges qui suivirent les présentations sont apparues les différentes approches de la ressource selon l'angle sous lequel elle était étudiée, notamment les perceptions de celle-ci face aux dynamiques de technologisation qui influencent sa gestion. Ainsi, un chercheur s'attristait du manque de souplesse d'esprit des populations face aux innovations technologiques, en donnant l'exemple de Dunkerque, où les habitants avaient refusé de boire de l'eau dessalée. Or pourquoi les Dunkerquois le devraient-ils ? Dunkerque n'est pas réputée pour ses sécheresses chroniques...

Avec la mise en parallèle de la présentation sur les nouvelles sources d'eau, par Marie-Noëlle Pons, et de celle d'Agathe Euzen sur les symboles et usages de l'eau, cette remarque prenait tout son sens. On voyait ainsi se dessiner les approches induites par les disciplines de chacun, et immerger le besoin de créer et de développer des ponts entre les disciplines afin de mieux connaître et comprendre les enjeux liés à l'eau et à ses usages.

Aussi vitale soit-elle, l'eau n'a que deux siècles d'études à son actif. Les enjeux économiques actuels, dont des pans entiers dépendent de l'eau, accentuent les pressions auxquelles elle est soumise et sa répartition inégale, elle-même aggravée par les changements liés au climat. Sa gestion oscille entre exacerbation du sentiment de domination de l'être humain – qui cherche à asservir l'environnement pour le soumettre à ses besoins – et une volonté de restaurer les cours naturels et de respecter l'équilibre environnemental et hydrique des écosystèmes. Il ressortait toutefois clairement de cette journée d'échanges que les ponts entre les disciplines devaient continuer à se déployer et à tisser un ensemble transversal de connaissances nécessaire pour une gestion intégrée de cette ressource vitale. Voire à ouvrir de nouveaux horizons... La façon dont nous gérons l'eau, dont nous la détournons, n'aurait-elle pas elle-même un impact sur le changement climatique ? Car l'eau n'est pas, et ne doit jamais devenir, une marchandise : c'est un élément.



Les journées de l'eau du CNRS

Comité de pilotage de ces journées interdisciplinaires : Pierre Aimar, Willian Berthomière, Gudrun Bornette, Frederik Delay, Françoise Elbaz-Poulichet, Agathe Euzen, Philippe Garrigues, Thierry Gaude, Anne Imberty, Marie-Yvonne Perrin, Alain Walcarrius.

