A3 Magazine N° 80 - Printemps 2023

ÉDITORIAL DE LA PRÉSIDENTE 2
MOT DE LA RÉDACTION 3

L'EAU DOUCE, LA GESTION D'UNE RESSOURCE MENACÉE 5
AVANT-PROPOS

- **L'eau douce va-t-elle devenir une denrée rare ?** 5 *Michel Roustan*
- **Gestion de l'eau et évolution des paysages cultivés dans les anciennes civilisations** 11 *Louise Purdue*
- **Gouvernance de l'eau et dynamique territoriale** 18 *Stéphane Ghiotti et Anne Rivière-Honegger*
- **Zones humides, services rendus et gestion de leur préservation** 25 *Jérôme Bignon*
- **Les agences de l'eau en France : aspects économiques et financiers d'un modèle particulier de gestion** 29 *Bernard Barraqué*
- **Réutilisation des eaux usées : de nouvelles ressources en eau** 35 *Marie-Noëlle Pons*

EN SAVOIR PLUS (livres proposés sur le thème du dossier) 42

- **L'eau à découvert** *Ouvrage collectif*
- **Chercheurs d'eaux au temps des changements globaux. Quelles perspectives pour les territoires ?** *Géocarrefour, volume 96*
- **L'eau en milieu agricole - Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale** *Ouvrage collectif,*
- **La terre a soif** *Erik Orsenna*
- **Atlas mondial de l'eau : Défendre et partager notre bien commun** *David Blanchon*

SPOTS 44

- **L'origine de l'eau sur terre ; d'où vient l'eau que nous buvons ?** 44 *Samantha Azevedo-Vannson, Laurent Remusat et Jérôme Aléon*
- **Zoom sur la recherche française dans le domaine de l'eau douce : cellule Eau CNRS, ICIREWARD et Chaire EACC** 49 *Vivienne Gianinazzi-Pearson*
- **Une crise hydrique dans le Cerrado brésilien : dimensions, implications et controverses** 51 *Ludivine Éloy*
- **Si la nature avait des droits ? À propos du fleuve Tavignano en Corse** 55 *Fabrice Bonardi*
- **Les enjeux de l'alimentation en eau potable des grandes agglomérations. L'exemple de Paris et de Bruxelles** 57 *Christian Girault*
- **L'éthique scientifique du CNRS** 59 *Michèle Leduc*

KIOSQUE 62

- **Une résilience ou les trois Marie-Odile** *Marie-Odile Soyer-Gobillard*
- **Sur les pas de Lucy, expéditions en Éthiopie** *Raymonde Bonnefille*
- **Madame de Néandertal, journal intime** *Pascale Leroy et Marylène Patou-Mathis*
- **Le fleuve qui voulait écrire,** *Camille de Toledo*
- **Cuirs dorés, « cuirs de Cordoue », un art européen** *Jean-Pierre Fournet*
- **Tout comprendre (ou presque) sur le climat** *Bonpote, Anne Brès et Claire Marc*

PASSIONS D'ADHÉRENT(E)S 65

- **Trois millions d'années plus tard** *Michel Decobert*
- **Rouffignac, la grotte des mammouths** *Frédéric Plassard*
- **Marcel Proust (1871-1922)** *Dominique Simon*
- **Gestion de l'eau en agriculture : le microbiome du sol, un outil biologique sous exploité** *Silvio Gianinazzi*

RAYONNEMENT DU CNRS 71

- **Alain Aspect, prix Nobel 2022 de Physique** *Elisabeth Giacobino.*
- **Jean-Marie Tarascon, médaille d'Or 2022 du CNRS,** *Gilberte Chambaud*

Les textes publiés dans l'A3 Magazine n'engagent que les auteurs comme seuls responsables de leur contenu.

Avec le numéro 80 du magazine de l'A3 consacré à la gestion des ressources en eau douce sur terre, nous vous invitons à découvrir comment les hommes les ont gérées au cours du temps de façon à préserver l'accès à l'eau, élément essentiel à la vie sur Terre.

Ce numéro traite de l'eau douce depuis l'origine de sa présence sur la Terre lors de la formation du système solaire et de notre planète, jusqu'à l'avenir des ressources sur terre, menacé par la surconsommation et le réchauffement climatique.

Comment gérer les ressources en eau douce s'est avéré être un problème délicat depuis les plus anciennes civilisations, comme le montre l'article de Louise Purdue (lauréate du prix A3 2022). Encore aujourd'hui, inégalement répartie, l'eau douce nécessite d'être gérée avec soin, pour éviter que de nombreuses régions, soumises à une consommation d'eau importante, due en particulier à l'agriculture intensive, ne puissent plus survivre.

Dans les pays développés, et notamment les grandes villes, la consommation d'eau a beaucoup augmenté, avec le développement de « l'eau courante » au XXe siècle. De nos jours, beaucoup de gens tendent à ignorer le problème de la surconsommation. *A contrario* dans de nombreux pays, les populations n'ont pas ou peu d'accès à l'eau potable, ce qui génère de gros problèmes économiques et de santé publique. L'augmentation de la population mondiale prévue par l'ONU va probablement accentuer ces problèmes et pourrait à terme mener à une pénurie globale de l'eau douce.

La gouvernance de l'eau doit donc être gérée au niveau territorial, avec une meilleure gestion des sources, une réutilisation des eaux usées, un encouragement aux économies dans l'utilisation de l'eau et la rationalisation de la consommation. Un travail au niveau mondial est aussi indispensable. Il est effectué par les organisations internationales ; ainsi les Nations Unies et l'UNESCO ont créé des programmes permettant de gérer toutes les questions liées à l'eau.

Ces questions sont abordées dans les articles passionnants de ce numéro, avec des perspectives très variées, balayant l'histoire depuis la préhistoire jusqu'à notre ère, la météorologie et les changements climatiques, les pays et les différents continents.

En plus des présentations du dossier et du kiosque focalisées sur la gestion de l'eau, la rubrique « Passions d'adhérents » qui est ouverte à tous les adhérents de l'association vous fera découvrir d'autres sujets tout aussi passionnants. Le premier nous raconte la découverte, lors d'une expédition archéologique dans les années 1970 en Ethiopie, des pièces d'un squelette féminin de près de 3 millions d'années qui sera nommé Lucy. Le deuxième article, aussi sur l'archéologie, cette fois en France, décrit la grotte de Rouffignac, dans le Périgord Noir, et ses nombreux dessins de l0 mmde l'époque paléolithique. Le troisième nous invite à découvrir les manuscrits de Marcel Proust à l'occasion de la commémoration du centenaire de sa mort, et le quatrième explique le rôle du microbiome du sol dans la gestion de l'eau en agriculture.

Enfin, dans la rubrique « Rayonnement du CNRS » deux articles sont consacrés à deux personnalités marquantes du CNRS, Jean-Marie Tarascon, chimiste, professeur au Collège de France, qui a été lauréat de la médaille d'Or 2022 pour ses travaux pionniers sur les batteries, et Alain Aspect, qui a reçu le prix Nobel de physique 2022, pour ses découvertes majeures en physique quantique, démontrant les propriétés de l'intrication.

Je remercie tous les auteurs et l'équipe de rédaction et je vous souhaite une très agréable lecture.

Elisabeth Giacobino

Nous voudrions tout d'abord remercier notre présidente « émérite », Liliane Gorrichon, pour sa collaboration attentive et amicale dont nous avons été les heureuses bénéficiaires depuis 2020, l'année où nous avons repris la revue A3 Magazine. Elisabeth Giacobino, élue présidente de l'Association des anciens et des amis du CNRS (A3) en septembre dernier, est devenue *ipso facto* notre nouvelle directrice de publication. Nous sommes heureuses de l'accueillir dans le comité de rédaction et de bénéficier de ses conseils toujours avisés et pertinents.

Nous avons voulu dans ce nouveau numéro d'A3 Magazine aborder un sujet qui nous concerne tous dans notre vie quotidienne. Cédant aux sirènes de l'actualité, nous avons tenté de vous donner un petit aperçu des problèmes que pose la gestion de l'eau douce en France et dans le monde. Nous avons fait appel à des spécialistes en pointe sur ces sujets et nous les remercions toutes et tous très chaleureusement d'avoir accepté de nous consacrer leur temps et leur compétence. C'est en effet une de nos spécificités de faire appel en priorité aux chercheurs et universitaires en activité ou membres de l'A3, mais ce choix n'est pas exclusif et peut être complété par l'expertise de membres de l'administration civile ou territoriale ou encore des politiques pour traiter les questions sur un plan plus sociétal.

Nous tenons à remercier notre lauréate du prix A3 2022, Louise Purdue, spécialiste de la gestion de l'eau dans les anciennes civilisations et aujourd'hui, de nous avoir fait connaître ses recherches. Nous voudrions aussi évoquer la mémoire de Pierre-Frédéric Ténière-Buchot trop tôt disparu en octobre dernier. Très investi dans les activités collectives, acteur important du monde de l'eau tant au niveau régional et national français, qu'à l'international, il avait répondu à notre sollicitation avec autant de spontanéité que de générosité. Son décès brutal ne nous a malheureusement pas permis de poursuivre la collaboration que nous avions établie grâce à l'entremise amicale de Laurent Degos qui s'est particulièrement impliqué dans la mise en place de ce numéro. Nous l'en remercions très chaleureusement.

Nous vous laissons découvrir ce numéro où nous avons essayé d'aborder le sujet de la gestion de l'eau douce sous ses divers aspects, historique, administratif, économique, environnemental et financier, sans oublier la prospective, à travers des articles et par l'évocation d'exemples plus ciblés. Et bien sûr, comme à l'accoutumée nous avons eu à cœur de vous faire part des livres qui ont retenu notre intérêt, et de laisser la parole aux adhérent(e)s de l'association pour vous faire partager leurs passions. Vous pourrez aussi lire les belles présentations des lauréats CNRS du prix Nobel 2022 de Physique et de la médaille d'Or du CNRS 2022.

Bonne lecture !

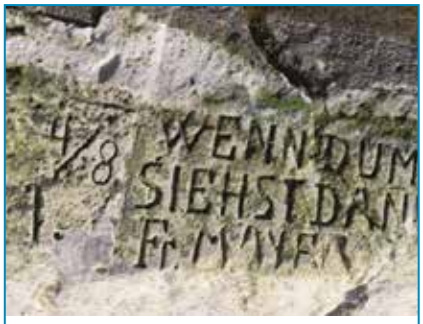
Véronique Machelon
et Vivienne Gianinazzi-Pearson

©V. Gianinazzi-Pearson.

AVANT-PROPOS

Eau, tu n'as ni goût, ni couleur, ni arôme, on ne peut pas te définir, on te goûte sans te connaître. Tu n'es pas nécessaire à la vie : tu es la vie… Tu es la plus grande richesse qui soit au monde, et tu es aussi la plus délicate, toi si pure au ventre de la terre. (Antoine de Saint-Exupéry, Terre des Hommes, 1938).

L'homme n'a cessé de s'interroger sur la nature de l'eau depuis Aristote pour qui l'eau faisait avec le feu, la terre et l'air, un des quatre éléments de la réalité universelle. L'eau est une ressource à part, un bien commun indispensable à la survie de tout être vivant. Symbole de pureté, de fertilité et de vie, elle est essentielle pour désaltérer, laver, ressourcer, générer de l'électricité, pour naviguer et fabriquer par des procédés industriels. Depuis 1993, les Nations Unies désignent chaque année le 22 mars comme Journée mondiale de l'eau consacrée à l'importance de l'eau douce, et en 2018 elles ont lancé la Décennie internationale d'action sur « L'eau et le développement durable » destinée à promouvoir l'accès à l'eau potable pour tous d'ici à 2030.



Pierre de la faim avec l'inscription « Si tu me vois, alors pleure » dans le lit de l'Elbe à Děčín (CZ), réapparu à cause de la sécheresse en 2018 (© Bernd Gross, Creative Commons Paternité - Partage des conditions initiales à l'identique 3.0 Allemagne).

Bien que l'eau recouvre plus que 70 % de la surface de la Terre, l'eau douce ne représente qu'une faible partie des ressources aquatiques (2,5-3 %). Malgré son omniprésence, l'eau douce génère des inégalités écologiques et sanitaires du fait de la répartition inéquitable sur Terre des différentes ressources (nappes phréatiques, zones humides, cours d'eau) et de leur accès dans l'espace et le temps. La gestion de l'eau a été depuis la nuit des temps un défi pour satisfaire les besoins des peuples sous différents climats, et même une source de conflits entre les populations dans certaines régions du monde qui risque de s'accentuer aujourd'hui en raison des modifications dans sa répartition et son abondance.

Le dérèglement climatique provoque aujourd'hui une augmentation de la fréquence d'évènements extrêmes comme la sècheresse, les inondations, les tornades, et inversement une diminution des sources d'eau douce (glaciers, couvertures neigeuses, lacs), ce qui accentue la faim et la salubrité dans le monde. Même si globalement il n'existe pas encore une vraie pénurie, l'eau douce se raréfie avec l'augmentation de son prélèvement et de sa consommation par une population mondiale qui augmente et a dépassé aujourd'hui les huit milliards selon les estimations de l'ONU. Rationaliser la gestion et la consommation de l'eau et des ressources aquatiques est devenu un enjeu mondial majeur qui nécessite une recherche et une coopération inter-régionale, nationale et internationale.

Des programmes et des structures sont développés au niveau international et national pour répondre aux défis de la protection, la conservation et la gestion de l'eau douce destinée à la consommation humaine et à l'agriculture. En 1975, l'UNESCO a fondé son programme hydrologique intergouvernemental (PHI) pour mettre la science au service de l'action «pour un monde où la sécurité de l'eau est assurée dans un environnement en mutation». L'entité ONU-Eau (*UN-water*), créée en 2003, coordonne des travaux sur les questions d'eau face à la crise d'assainissement qui touche plus particulièrement les eaux souterraines. Dans le cadre du PHI, l'UNESCO a aussi créé un « Réseau mondial des musées de l'Eau » (WAMUNET) qui compte 80 musées dans différentes parties du globe.

À l'échelle française, Montpellier abrite l'une des plus importantes communautés de recherche sur la thématique de l'eau et des sciences de l'eau. L'année 2020 a vu la naissance d'un centre UNESCO de recherche et de formation dédié à l'eau continentale (ICIREWARD) à Montpellier. L'année suivante, l'Institut Agro et l'INRAE de Montpellier ont fondé la Chaire partenariale eau, agriculture et changement climatique autour des questions du rapport entre l'eau et l'agriculture dans les régions de la Méditerranée, et le CNRS a créé la même année une cellule Eau à l'occasion de la Journée mondiale de l'eau afin de se positionner comme un acteur majeur de la recherche sur l'eau. En 2022, le programme « PEPR Exploratoire OneWater-Eau Bien Commun », piloté par le CNRS, l'INRAE et le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), a été lancé avec mission de mettre les recherches sur les ressources en eau au cœur de la transition durable des territoires.

Vivienne Gianinazzi-Pearson
et Véronique Machelon

L'eau douce va-t-elle devenir une denrée rare ?

Michel Roustan *est professeur émérite de Génie des procédés à l'Insa de Toulouse, au sein du laboratoire Toulouse Biotechnologie Institute (TBI), Bio&Chemical Engineering, CNRS, Inrae, Insa. Son enseignement et ses recherches concernaient l'application des concepts de base du génie des procédés pour la conception de procédés innovants dans le domaine du traitement des eaux à potabiliser, des eaux usées urbaines et des effluents gazeux. Il est co-auteur de plusieurs brevets sur la réalisation d'unités industrielles (ex. réacteurs d'ozonation). Il a (co)dirigé 47 thèses de doctorat et exercé de nombreuses responsabilités locales et nationales en étant nommé membre de divers comités : Riteau, ANR, HCERES. Il a coordonné pendant près de 10 ans la coopération scientifique franco-chinoise dans le domaine de l'eau. Il est actuellement un des vice-présidents de l'International Ozone Association IOA (groupe Europe-Afrique-Asie-Australie) en charge des programmes scientifiques des congrès régionaux et mondiaux. Il est « Honory member of the IOA » et a reçu en 2015 la plus haute distinction de l'IOA, « the Morton Klein Medal ».*

Résumé : *Bien que la quantité d'eau sur la planète Terre soit extrêmement importante (1 400 millions de km^3), la part d'eau douce facilement accessible ne représente qu'une très faible partie, de l'ordre du 0,03 %. Heureusement que sous l'effet du soleil, le grand cycle de l'eau permet de disposer d'une ressource d'eau douce renouvelable de 40 000 km^3 par an, mais avec une répartition très inégale selon des pays. Sous l'effet de trois paramètres : i) l'augmentation de la population mondiale (8 Mds fin 2022 - 8,5 Mds en 2030 et 9,5 Mds en 2050, ii) l'impact du changement climatiques sur la ressource en eau, iii) la demande légitime d'un accès universel à l'eau et à l'assainissement pour toute la population mondiale, la demande en eau pour tous les usages va donc augmenter considérablement. Cette quantité d'eau douce est-elle en adéquation avec les prélèvements actuels pour satisfaire les besoins exprimés par les populations ? Au final, il est proposé un certain nombre de pistes, de recommandations pour éviter les tensions et les crises pour l'eau du futur.*

Sans eau, la vie ne serait pas apparue sur Terre il y a quelques 3,8 milliards d'années. L'eau, élément indispensable à la vie, est évidemment une préoccupation constante de toutes les époques et de tous les lieux. La quantité totale d'eau sur Terre est constante depuis plus de 4 milliards d'années.

La directive-cadre européenne DCE Eau 2000 traduite en droit français en 2006 sous le nom de LEMA (Loi sur l'eau et les milieux aquatiques) considère l'eau « non pas comme un bien marchand, mais comme un patrimoine commun à protéger et à défendre ». « L'eau est un besoin humain fondamental : elle est nécessaire à l'hydratation comme à l'assainissement et à l'hygiène ; elle est indispensable à la préservation de la vie et de la santé des êtres humains. L'accès à l'eau potable et à l'assainissement constitue un des droits humains fondamentaux. Elle est non seulement un enjeu essentiel à la survie, mais aussi un enjeu sanitaire, social et culturel au cœur des sociétés humaines » (Rapport ONU 2021 « La valeur de l'eau »).

Mais, pendant que la population de la planète passait de 1,6 Mds d'habitants en 1900 à 8 Mds en 2022, la demande en eau douce passait de 350 m^3/habitant à près de 600 m^3/habitant. La question qu'il faut se poser alors est la suivante : aura-t-on toujours assez d'eau douce pour satisfaire tous les besoins des êtres humains, y aura-t-il un jour une pénurie d'eau douce essentielle et indispensable à la vie des humains et des écosystèmes ? Assisterons-nous à des conflits entre des peuples pour s'accaparer une ressource d'eau ?

LA TERRE : UNE PLANÈTE SALÉE

Sur la planète Terre, l'eau est stockée dans des réservoirs : océans, mers, lacs, cours d'eau, nappes souterraines, glaciers et neige, atmosphère, sols, organismes vivants, sous forme liquide, solide (neige, glace) et gazeuse (vapeur d'eau). Le tableau 1 en indique les quantités.

L'eau salée des océans et mers représente près de 97,5 % du total, tandis que l'eau douce ne représente que 2,5 %. Mais cette eau douce se trouve essentiellement dans les glaciers, calottes polaires et neiges,

ainsi que dans des nappes souterraines profondes. Ainsi l'eau douce facilement accessible et mobilisable ne représente que 0,3 % du total des eaux présentes sur Terre.

Tableau 1 - Quantité d'eau sur la planète Terre (1, 2, 3) (million km³)	
Eau de la planète	1 425
Eau salée (océans, mers)	1 390 (97,5 %)
Eau douce	35 (2,5 %)
• glaciers, calottes polaires et neiges	26
• eaux souterraines	8,5
• eaux superficielles (lacs, fleuves et rivières)	0,35
• humidité (air, sol) et organismes vivants	0,08

LE GRAND CYCLE DE L'EAU

Sous l'effet du soleil, l'eau s'évapore, se condense dans l'atmosphère pour former les nuages et ensuite retombe sous forme de précipitations, puis s'écoule, s'infiltre, avant de resurgir et s'évaporer à nouveau : c'est le grand cycle de l'eau

Sous l'impulsion de l'énergie solaire, au-dessus des océans, il s'évapore chaque année plus d'eau qu'il n'en tombe. Par contre, sur les continents, il tombe annuellement plus d'eau qu'il ne s'en évapore (tableau 2). La différence (eau bleue), estimée à 40 000 km³, retourne aux océans à travers les cours d'eau (ruissellement, infiltration) et constitue « la seule ressource d'eau renouvelable », soit une quantité d'environ 5 000 m³ par habitant de la planète. Mais cette ressource est très inégalement répartie entre les continents et les pays.

STRESS HYDRIQUE, PÉNURIE

D'après l'OMS, il y a une situation de pénurie, si la ressource est < 1 000 m³ par habitant et par an. Une situation de stress hydrique correspond à une ressource annuelle comprise entre 1 000 et 1 700 m³ par habitant (en moyenne). Cependant, il peut y avoir

Tableau 2 - Bilan hydrique au niveau de la planète (2, 4) (km³/an)	
Évaporation au-dessus des océans	425 000
Précipitation sur les océans	385 000
Evaporation au-dessus des océans	425 000
Évaporation des continents	71 000
Précipitation sur les continents	111 000

une pénurie « économique » si l'eau est physiquement présente mais la population ne disposant pas d'infrastructures nécessaires pour le traitement et la distribution en réseaux. De même, une pénurie « saisonnière » peut avoir lieu lors d'une sécheresse à durée limitée à quelques mois. La carte ci-dessous (Fig. 1) permet d'identifier les pays en pénurie ou en stress hydrique.

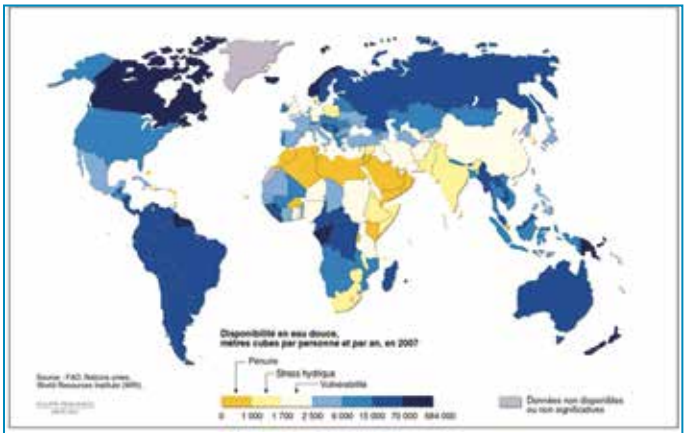


Fig. 1 : Situation des pays vis-à-vis d'une pénurie ou d'un stress hydrique (FAO, 2007).

RESSOURCES D'EAU EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

La France ne manque pas d'eau de façon globale. La quantité d'eau qui tombe annuellement en moyenne par précipitation est de 503 km³ (3) (moyenne annuelle sur les 60 dernières années) qui se décompose en :

- eau « bleue » 189 km³ (37 %) qui s'écoule dans les rivières, les lacs et alimente les nappes ;
- eau « verte » 314 km³ (63 %), stockée dans les sols après la pluie, puis reprise par les racines et qui repart vers l'atmosphère par le phénomène

d'évapotranspiration à travers l'ensemble de la végétation.

Cette quantité « eau bleue » à laquelle il faut rajouter l'eau des fleuves en provenance des pays voisins (11 km^3), soit au total 200 km^3, constitue la « ressource annuelle d'eau douce renouvelable » ce qui correspond à 3 000 m^3 par habitant, valeur nettement au-delà de celle correspondant au stress hydrique. Cependant, toutes les régions françaises ne sont pas logées à la même enseigne. Il faut aussi prendre en considération, i) le niveau et la régularité de la pluviométrie (qui varie de 0,5 à 2 mètres/an selon les régions), ii) la présence ou non d'aquifères souterrains importants, iii) les niveaux d'écoulement des rivières et les prélèvements.

De plus, la pluviométrie est variable selon les saisons : hiver 48 %, printemps 10 %, été 2 %, automne 40 %. D'où, parfois, la nécessité de restreindre les usages par arrêtés préfectoraux ou de prévoir des équipements (barrages, réservoirs, autres forages).

La France dispose d'un stock de 2 000 km^3 (au sein de 200 aquifères) dont la moitié est située à plus de 1 000 m de profondeur, donc difficilement exploitable.

LES USAGES DE L'EAU

Les usages de l'eau peuvent se diviser en trois grands domaines :

1/ L'eau et les activités humaines au quotidien : usages domestiques (boisson, toilette, cuisine, lavages, évacuation des déchets…), collectivités, administrations, commerces, hôpitaux.

2/ L'eau et l'économie :

- dans l'industrie : matière première, chauffage, refroidissement, transport, lavages…
- pour la production d'énergie : refroidissement des centrales électriques ;
- dans l'agriculture : irrigation des terres pour la production agricole, élevage et aquaculture ;
- alimentation des voies d'eau navigables de circulation pour les transports maritimes et fluviaux (en France, 8 500 km de canaux) ;
- source d'énergie mécanique et électrique (centrale hydroélectrique, centrale marémotrice, hydrolienne), 12 % de l'électricité produite en France.

3/ L'eau et les loisirs : navigation de plaisance, tourisme fluvial, piscine, baignade, cures thermales, sports nautiques et aquatiques, pêche de loisirs en eau douce, observation de la faune et flore dans les milieux aquatiques.

LES PRÉLÈVEMENTS ACTUELS D'EAU POUR LES DIVERS USAGES

1/ Au niveau mondial

Au niveau mondial en 2010, 69 % de l'eau prélevée est affectée à des usages agricoles (essentiellement l'irrigation), 19 % pour les usages industriels et 12 % pour les usages domestiques. En Afrique et en Asie, l'irrigation utilise plus de 80 % de l'eau prélevée, alors que l'Europe seulement 1/3. Par contre, plus de la moitié des usages de l'Europe concerne les activités industrielles, le secteur énergie étant un très gros utilisateur pour le refroidissement des centrales électriques.

La figure 2 montre l'évolution de la quantité d'eau prélevée pour les divers usages entre 1900 et 2010. En 2010, 3 900 km^3 étaient prélevés pour usage sociétal : 2 700 pour l'agriculture, 750 pour l'industrie et 450

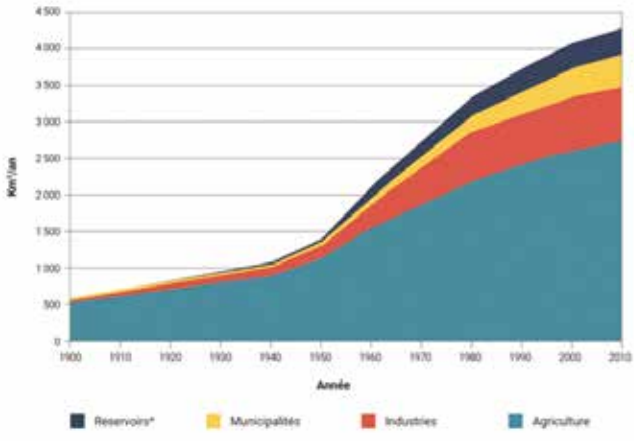


Fig. 2 : Prélèvements d'eau mondiaux 1900-2010 (en km^3) (8).

pour l'alimentation humaine, le reste étant perdu par évaporation. Actuellement, le montant annuel de ces prélèvements est estimé à 4 300 km^3, soit 540 m^3/habitant/an.

2/ Au niveau national (France métropolitaine)

Les prélèvements effectués en 2016 (5), pour les différents usages de l'eau en France métropolitaine, sont reportés dans le tableau 3.

Tableau 3 - Prélèvements en eau en 2016 (France métropolitaine) (Les volumes prélevés sont exprimés en km³) (5)								
Année	Eau potable	Industrie	Irrigation	Énergie	Canaux	Total	Population (10^6 hab.)	En m³/ habitant/an
2016	5,4	2,5	3,2	20,8	4,7	36,6	64,5	567

(En 2016, 0,34 km³ ont été prélevés dans les 5 départements d'outre-mer)

En 2016, 84 % des prélèvements sont réalisés dans les eaux de surface, 16 % dans les eaux souterraines. Les eaux de surface servent essentiellement au refroidissement des centrales et à l'irrigation. Pour la production d'eau potable, les prélèvements sont de 65 % pour les eaux souterraines dont la qualité est bien meilleure que celle des eaux de surface.

Pour le refroidissement des centrales de production d'électricité, la quasi-totalité des volumes est prélevée dans les rivières et estuaires (99,9 %). Pour l'irrigation et le secteur industriel, 63 % et 59 % des prélèvements proviennent des eaux de surface.

Le montant total des prélèvements de 2016 est de 36,6 km³ (5), soit 567 m³ /habitant, ce qui représente 18 % de la ressource renouvelable des 200 km³. Les besoins en eau semblent donc couverts. Mais, les plus forts prélèvements ont lieu en été lorsque la disponibilité de la ressource est la plus faible (peu de pluie) et la demande la plus forte pour l'irrigation, le tourisme. Ce qui peut provoquer des tensions sur cette ressource et des pénuries temporaires.

Y-A-T-IL ADEQUATION ENTRE DISPONIBILITÉ ET BESOINS ?

Sous l'effet de trois paramètres : i) l'augmentation de la population mondiale (8 Mds fin 2022 - 8,5 Mds en 2030 et 9,5 Mds en 2050), ii) les effets du changement climatique sur la ressource en eau, iii) la demande légitime d'un accès universel à l'eau et à l'assainissement pour toute la population mondiale, la demande en eau pour tous les usages va donc augmenter considérablement.

D'après le rapport mondial ONU de 2019 (6) sur la valeur de l'eau, tous les besoins élémentaires en termes d'eau potable et d'assainissement ne sont pas encore satisfaits pour toute la population mondiale : i) 2,1 milliards de personnes n'ont pas accès à un point d'eau géré en toute sécurité et 5,1 milliards ont accès à une eau « sûre » répondant à certaines normes de qualité ; ii) 2,9 milliards d'habitants disposent d'installations sanitaires gérées en toute sécurité, 2,1 milliards ont accès à des services élémentaires mais 2,2 milliards de personnes n'ont pas accès à des services élémentaires ; iii) environ 3 millions de personnes, dont 2 millions d'enfants de moins de 5 ans, décèdent chaque année d'une maladie liée à la pénurie (malnutrition) et/ou à la contamination de l'eau (diarrhée, parasites...).

Concernant l'eau destinée à la consommation humaine, la quantité utilisée actuellement varie de 20 à 500 L/j par personne selon les pays, soit en moyenne 250 L/j, soit 90 m³/an par personne. En 2050, pour satisfaire les besoins des 9,5 Mds d'habitants, la quantité totale d'eau nécessaire représenterait 850 km³, soit moins de 3 % des 40 000 km³ d'eau bleue. L'eau domestique n'est donc pas à priori un problème de quantité mais un problème de mise en place d'une infrastructure d'adduction, de traitement et de distribution. Dans le dernier rapport ONU sur la valeur de l'eau de 2021 (7), le coût pour la fourniture d'un accès universel à l'eau potable et à l'assainissement pour les 140 pays à faible et intermédiaire revenu est estimé à 114 Mds de dollars par an entre 2015 et 2030, soit un montant total de 1 700 Mds de dollars. Ces investissements permettraient d'améliorer les conditions sanitaires et la santé publique des populations.

Le changement climatique (8) va aggraver certaines situations de sécheresse, d'étiage plus sévère, de difficulté de recharge des nappes, de pollution des cours d'eau, qui vont générer des tensions entre les usagers de l'eau d'un pays (consommateurs ménagers, industriels et agriculteurs) mais également entre pays partageant les mêmes fleuves. Durant l'été 2022, la France a connu des situations de sécheresses et de canicules qui ont eu pour conséquences des difficultés d'approvi-

sionnement en eau dans des régions. Un nombre important de communes (une centaine) ont été privées d'eau potable sur une courte période. Elles ont dû adopter des mesures d'urgence : camion-citerne et distribution d'eau en bouteille. 93 départements ont été touchés par des mesures de restriction d'eau dont 78 placés en situation de crise avec arrêtés préfectoraux de restriction des usages de l'eau, avec interdiction i) d'arroser les potagers, les espaces verts publics et les golfs, ii) de laver les voitures, les terrasses, de remplir les piscines, d'alimenter les fontaines, d'irriguer les cultures… sauf dérogation préfectorale.

Des tensions sont apparues entre les secteurs d'activité (tourisme, agriculture, énergie) mettant en lumière les conflits d'usages[1] (des élus se disputant l'eau du Drac, restriction pour l'irrigation des 8500 hectares de foin de la plaine de la Crau). Des lâchers d'eau de barrage ont dû être effectués pour maintenir un débit minimum dans certains cours d'eau afin de satisfaire la demande des usagers. En conséquence, pour une action durable dans le temps, il serait nécessaire de réfléchir sur les pratiques de tous les usagers à travers une prise de conscience collective sur un changement de comportements en matière d'utilisation et de préservation de l'eau.

Compte-tenu de l'augmentation de la population mondiale, il faudra produire plus de nourriture (+ 60 % selon la FAO). Sachant qu'il faut actuellement autour de 10 000 km^3 d'eau pour nourrir la population mondiale (3 500 de prélèvement + 6 500 de l'agriculture pluviale) (4), alors en 2050 pour nourrir les 9,5 Mds d'habitant, il faudra autour de 13 000 km^3, donc un prélèvement de 6 500 km^3, soit presque le double du prélèvement actuel. Ceci ne sera pas possible car la quantité d'eau à prélever ne sera pas suffisamment disponible localement. La FAO (7) estime que l'augmentation de la quantité d'eau pour l'irrigation ne pourra augmenter que de 10 %. Se posera le problème des ressources en eau pour satisfaire les besoins, d'autant que l'augmentation de la population risque d'être située dans des pays où déjà il y a un manque flagrant d'eau de qualité. Cette demande supplémentaire ne pourra pas être satisfaite partout si on ne change pas les habitudes actuelles de notre mode de vie, en y incluant les aspects alimentaires. Il faudra probablement adopter de nouveaux régimes alimentaires et penser un autre type d'agriculture moins consommatrice d'eau utilisant des technologies basées sur l'irrigation par goutte à goutte, la mise en place de capteur d'humidité dans le sol, tout en mettant en œuvre des choix de cultures moins gourmandes en eau.

L'évolution de la demande en eau est difficile à prévoir. Les quelques études réalisées n'aboutissent pas aux mêmes résultats (7, 9). Cependant, une tendance générale se dégage, à savoir une augmentation de la demande d'environ 1 % par an, soit une augmentation comprise entre 20 et 30 % d'ici 2050. L'accroissement de la demande en eau va probablement accentuer le stress hydrique dans certaines régions ou pays déjà en situation précaire.

CE QUE NOUS DEVRONS FAIRE POUR L'EAU DU FUTUR

Face à la prise en compte de l'augmentation de la population mondiale, des effets du changement climatiques sur la ressource en eau et de la demande légitime d'un accès universel à l'eau et à l'assainissement pour toute la population mondiale, nous devons envisager un certain nombre de pistes pour éviter tensions ou crises pour l'eau du futur :

1/ Elargir les ressources disponibles non conventionnelles que sont les eaux salées et saumâtres, les eaux usées traitées issues des stations d'épuration (réutilisation) et les eaux pluviales urbaines. La mise en place de structures visant le partage de ces nouvelles ressources est indispensable, en définissant des priorités.

- Le dessalement de l'eau de mer s'impose comme une des solutions d'avenir pour faire face au stress hydrique. Deux procédés de production d'eau potable à partir d'eau de mer existent : l'osmose inverse (le plus répandu) et la distillation étagée. En 2022, 21 000 usines de dessalement d'eau de mer sont opérationnelles sur tous les continents avec une capacité de production annuelle d'eau douce estimée à 45 km^3, ce qui représente environ 10 % du prélèvement d'eau destiné à la consommation humaine. Le procédé de dessalement par osmose inverse consomme entre 2,5 et 3,5 kWh par m^3 d'eau dessalée produite, sachant qu'il faut approximativement 2 à 3 L d'eau de mer pour produire 1L d'eau dessalée. Deux problématiques restent à optimiser, le coût énergétique important (possibilité d'utiliser les énergies renouvelables) et l'impact sur le milieu marin des rejets en mer des saumures.
- Les eaux pluviales urbaines (10) peuvent constituer une nouvelle ressource d'eau et au lieu de les évacuer directement par les émissaires, il serait possible d'en retenir une partie dans des citernes chez les particuliers et des réservoirs de stockage sous les rues ou parkings pour alimenter la végétation urbaine, recharger des nappes phréatiques, nettoyer les rues, alimenter des canaux, plans d'eau ou zones humides. Ces actions permettraient

de contribuer à améliorer le microclimat urbain.

- Les eaux usées urbaines traitées dans les stations d'épuration représentent un volume annuel de plus de 4 km^3. Une partie pourrait être réutilisée pour divers usages après traitements adaptés en fonction de leur destination finale (irrigation, nettoyage, infiltration, loisirs…).

2/ Mieux informer les consommateurs d'eau sur la réalité des ressources disponibles et montrer clairement les effets du changement climatique. Maitrîser de façon raisonnée la consommation d'eau pour toutes les utilisations, domestiques, agricoles, industrielles et loisirs et changer les comportements en évitant les gaspillages. Engager des réflexions et des concertations entre les différents usagers sur le partage de l'eau, pour que chaque citoyen puisse mieux prendre conscience du caractère limité de la ressource en eau.

3/ Protéger les réserves existantes, préserver la qualité de la ressource, produire une eau potable saine et sûre préservant la santé humaine et améliorer les rendements des réseaux de distribution de l'eau potable (en France, actuellement 1 km^3 sur les 5 km^3 d'eau potable produits est perdu dans les réseaux de distribution).

4/ Traiter toutes les eaux usées urbaines et industrielles, par assainissement collectif et/ou assainissement non collectif. À ce jour, dans le monde, 80 % des eaux usées urbaines et industrielles sont rejetées sans traitement dans le milieu naturel, ce qui entraine des effets néfastes concernant la santé des êtres humains et l'état des écosystèmes marins et terrestres.

5/ Maitrîser la présence des micropolluants, en particulier les résidus pharmaceutiques, les cosmétiques et polluants émergents (microplastiques, perturbateurs endocriniens…) dont les toxicités à + ou – long terme n'ont pas été complètement étudiées.

6/ Investir en termes de renouvellement des réseaux de distribution d'eau potable et des réseaux séparatifs pour les eaux usées urbaines. Aider fortement les pays qui n'ont pas accès à une eau gérée en toute sécurité et qui ne disposent pas encore d'assainissement de base, à investir dans des infrastructures d'approvisionnement d'eau et d'assainissement, tout en insistant sur la formation de personnels compétents.

7/ Investir dans de nouvelles capacités de stockage ou rétention d'eau de pluie, d'eaux issues des inondations, tout en étant en compatibilité avec la politique environnementale. Améliorer la gouvernance de l'eau en assurant une cohérence entre les divers usagers potentiels afin d'éviter des conflits d'usages à travers la « guerre de l'eau ».

8/ Valoriser les matières premières (C, N, P) présentes dans les eaux usées urbaines et industrielles, sous diverses formes : énergie, matières recyclables, en appliquant les concepts d'économie circulaire. Concevoir la station d'épuration du futur, productrice d'eaux pour différents usages et d'énergies renouvelables.

9/ Garantir une qualité sanitaire des eaux potables produites dans les usines de traitement et des spécifications adaptées aux eaux réutilisées (fiabilisation des filières de production) en mettant en œuvre les technologies de l'intelligence artificielle (I.A.), capteurs intelligents, traitements des données, aide à la décision.

RÉFÉRENCES

(1) Chaussade JL, Pellay M (2012) *Les 100 mots de l'EAU*. Que Sais-je ? Éditions PUF.
(2) de Marsilly G (1995) *L'eau*. Dominos, Flammarion.
(3) Roustan M (2014) *Eau : données et statistiques*. W112v1, Techniques de l'Ingénieur. https://doi.org/10.51257/a-v1-w112.
(4) de Marsily G (2022) Risquons-nous d'avoir une pénurie d'eau ? *La Revue l'Eau, l'Industrie, les Nuisances*, n° 448, p 85.
(5) *Prélèvements quantitatifs sur la ressource en eau (données 2016)* (2019). Eaufrance, Bulletin N°5, Edition Mars.
(6) *Ne laisser personne pour compte*. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 2019.
(7) *La valeur de l'eau*. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 2021.
(8) *L'eau et les changements climatiques*. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 2020
(9) *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050* : Les conséquences de l'inaction. OCDE, 2012.
(10) Stocker les eaux pluviales : quand, pourquoi, comment ? (2013) *La Revue l'Eau, l'Industrie, les Nuisances*, n° 358, 25-37.

NOTE

(1) Pour plus de détails, consulter les articles publiés cet été dans le journal Le Monde

Gestion de l'eau et évolution des paysages dans les anciennes civilisations

***Louise Purdue**, géoarchéologue, est CR CNRS au sein du laboratoire Cultures environnements préhistoire antiquité et Moyen Age (CEPAM, UMR 7264) à Nice. Diplômée en 2005 de l'école SupAgro Montpellier et d'un DEA en Archéologie et Environnement à Paris X, elle obtient un doctorat en Histoire de l'art et archéologie en 2011 à l'université Côte d'Azur, puis réalise un post-doctorat à Arizona State University (2013-2014). Sa recherche porte sur l'histoire des paysages, de l'agriculture, de la gestion des ressources en eau et en sol depuis les cinq derniers millénaires. Elle cherche à comprendre comment les sociétés agricoles ont fait face aux contraintes climatiques et environnementales, notamment en milieu désertique, mais également tropical et méditerranéen. Porteur d'une ANR Jeune chercheur (OASIWAT, 2016-2020), elle porte aujourd'hui un projet franco-saoudien sur l'histoire de l'oasis d'AlUla (Arabie Saoudite). Elle obtient la médaille de Bronze du CNRS en 2020 et le Prix A3 en 2022.*

***Résumé :** Depuis l'émergence des grandes civilisations, la maîtrise de l'eau a contribué au façonnage, à l'organisation et à la complexification des sociétés. Ces dernières, en fonction de leurs besoins, de contraintes écologiques, et de compétences techniques ont clairement structuré leur territoire autour de cette ressource. Comme en témoignent les vestiges en surface de grands ouvrages hydrauliques, de nombreux paysages dans le monde restent marqués par ces pratiques anciennes. Toutefois, un grand nombre de ces structures sont aujourd'hui abandonnées, en réponse à des contraintes environnementales et humaines : diminution de la ressource en eau, augmentation ou déclin démographique suite à des migrations ou des déplacements de population, conflits sur l'eau liés à une répartition et une distribution inégale de la ressource, problèmes de maintenance des systèmes hydrauliques, restructuration interne des sociétés. Or, dans un contexte de changement global, nous faisons face à un besoin grandissant en eau à des fins domestiques, agricoles et énergétiques.*

L'eau, qui est devenue une ressource menacée, constitue aujourd'hui une priorité à l'échelle internationale. De cette opposition entre besoin et gestion découlent des tensions économiques, des conflits politiques, des ruptures sociales et des déprises agricoles, de l'échelle de la communauté à celle de l'état. Afin de mieux comprendre et alimenter le débat actuel sur la gestion raisonnée de cette ressource, les interactions entre l'eau et les sociétés méritent d'être mieux appréhendées, pas uniquement sur le court terme, mais dans une temporalité plus longue, en intégrant les notions d'adaptation et d'adaptabilité, de résilience ou de résistance, de coopération ou d'individualisme face à des contraintes environnementales et sociales dont certaines peuvent durer plusieurs siècles. Pourquoi et comment les sociétés anciennes ont-elles maîtrisé l'eau ? Comment se sont-elles adaptées aux grands changements démographiques, technologiques, socio-économiques, politiques mais également climatiques ? Pouvons-nous nous inspirer aujourd'hui des techniques anciennes ?

UNE (GÉO) ARCHÉOLOGIE DE L'EAU ?

Pour répondre de façon intégrée à ces questions, de nouvelles approches et concepts ont été développés à partir des années 70 dans le cadre des programmes « environnement » du CNRS afin d'apporter une vision plus dynamique des sociétés hydrauliques passées, souvent étudiées par le prisme de l'anthropologie théorique, de l'ethnographie ou de la planimétrie. C'est dans ce contexte que le concept d'anthroposystème voit le jour en 2003 (1). Au sein des anthroposystèmes, les systèmes sociaux et les écosystèmes co-évoluent, autrement dit ils interagissent et s'adaptent, de façon rythmique, cyclique et permanente, au sein d'un temps linéaire sujet à de grandes transformations. Ces anthroposystèmes peuvent être appréhendés par une approche holistique à différentes échelles spatiales (locales à globales) et temporelles (passé au futur). Dans ce contexte, il est possible de placer l'eau et les paysages hydrauliques au centre des anthroposystèmes où ils peuvent être considérés comme une ressource et des espaces dynamiques, mobiles et évolutifs, construits et marqués par des processus et des héritages anthropiques (socio-politico-économiques) et naturels (hydrologiques et climatiques). Pour les appréhender, il est alors nécessaire de croiser de multiples méthodes notamment celles de la géologie, de la géographie, de l'histoire, mais aussi de l'archéologie et de la géo(archéologie)[1] pour comprendre d'une part les dynamiques environnementales et leur impact sur la disponibilité en eau (les hydrosystèmes), et d'autre part les techniques et les pratiques hydrauliques (ex. les agrosystèmes dans le cas des pay-

sages cultivés) (Fig. 1). Comprendre les interactions entre hydro- et agrosystèmes sont clés pour identifier les adaptations humaines aux changements socio-environnementaux au cours du temps.

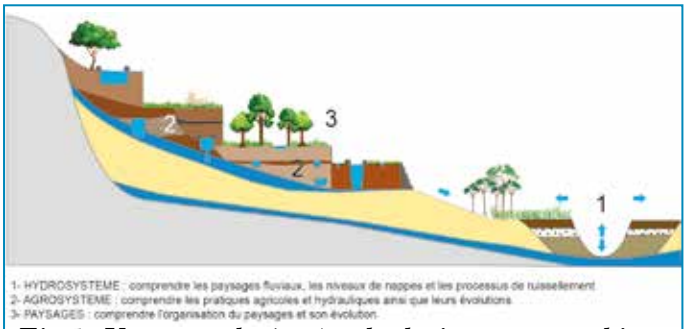


Fig. 1 : Une approche (géo) archéologique et géographique pour comprendre l'eau, sa disponibilité et sa gestion au cours du temps dans des espaces agraires. © L. Purdue.

CAPTER ET ACHEMINER L'EAU

Les sociétés humaines ont exploité de façon diversifiée les eaux de surface (ruissellement, précipitation, eaux fluviales) et les eaux souterraines en s'adaptant à des contraintes géographiques et temporelles. Indépendamment des évolutions climatiques et de la disponibilité en eau au cours du temps, la ressource en eau est naturellement limitée dans certaines régions du monde, comme dans les espace désertiques (Afrique du Nord, Arabie, Asie occidentale, Amérique du Sud, Nord-ouest américain notamment) où de nombreuses techniques hydrauliques ont été développées et perfectionnées pour capter et acheminer l'eau. Dans d'autres espaces, comme dans certaines zones tropicales (ex. péninsule du Yucatan) ou tempérées, des apports d'eau non pérennes ont nécessité le développement de techniques de stockage ou d'acheminement de l'eau principalement pour stabiliser les cultures et augmenter les rendements agricoles. Les méthodes de l'archéologie et de la géographie ont mis au jour une grande diversité d'aménagements hydrauliques qui ont tous, indépendamment de leur contexte géographique, eu pour vocation de capter l'eau, la retenir ou l'acheminer.

Captage de l'eau

Au cours de l'histoire, le captage des eaux de surface s'est initialement développé le long de vallées alluviales à apport d'eau pérenne. L'eau y a été puisée dans un premier temps de façon rudimentaire, avec des seaux ou des outres, puis à l'aide de balanciers (comme les *chadoufs* en Mésopotamie) à partir du 3e millénaire av. notre ère pour irriguer de faibles superficies à proximité des cours d'eau. En parallèle, ces premières sociétés complexes ont construit des canaux, des digues ou des barrages pour capter l'eau afin de l'acheminer. Initialement de petite échelle, cet hydraulique évolue dès le 2e millénaire av. notre ère vers la mise en place de systèmes hydrauliques à grande échelle au sein de sociétés hiérarchisées. Ainsi, au cours du 1er millénaire av. notre ère, les technologies se développent avec la création de machines élévatoires composées de roues à godets entraînées par la force du courant, comme les norias (agricoles ou urbaines), qui se développent sur tout le pourtour méditerranéen jusqu'à la fin de la période ottomane.

Dans des espaces à apports d'eau non pérennes (plateaux et montagnes par exemple), les techniques de captage des eaux souterraines se sont développées dès le Néolithique. Des premiers aménagements simples comme l'irrigation par capillarité ou le creusement de petites dépressions pour capter la remontée de l'eau ont été rapidement complétés par le creusement de puits pour des besoins localisés, souvent à l'échelle du foyer, lorsque la nappe était trop profonde. Les premières traces de puits sont attestées entre le 7e-8e millénaire av. notre ère (2) (Fig. 2) et certaines formes traditionnelles sont toujours utilisées aujourd'hui.

Fig. 2 : Diversité des structures de captage des eaux souterraines. (A) Puits de l'Age du Bronze (2e millénaire av. notre ère) enseveli sous 3 mètres de graviers et de limons
j É s # pR a à#a F Z0## G#U É p## z y h j# u pp v#n s l
WÉ z #Thtxh#d#, H#U É p#z| lz#awzh y l #WÉuz |#0h x
T t h#a 1#[l z #k p #ÉduÉ #u |hzi h#,| jÀd lu u #l t
d'ère) à Hegra, Arabie Saoudite. © L. Purdue.

Dès le 1er millénaire av. notre ère, la technique du *qanât*[2] se développe (ensemble de galeries souterraines drainantes qui collectent l'eau des aquifères et la transporte par gravité vers un point d'intérêt, domestique-lavoirs, bains, termes, fontaines- ou agricole) (Fig. 3).

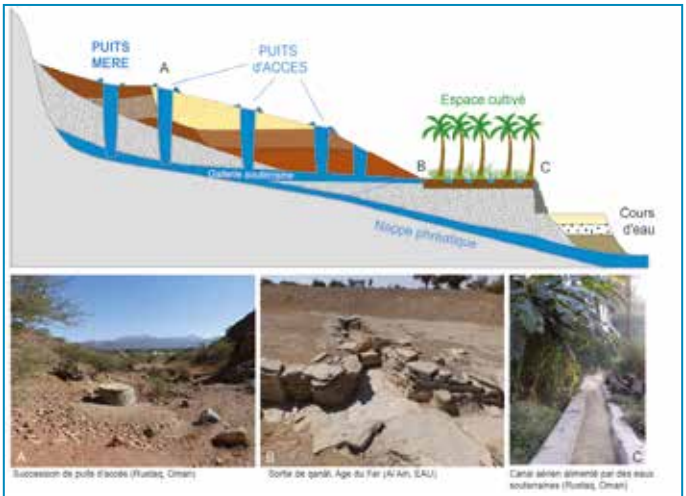


Fig. 3 : Schéma de fonctionnement d'un qanât et photographies illustrant les différentes composantes du réseau hydraulique dont certaines toujours en fonctionnement. © L. Purdue.

Cette technique se développe en Iran et en Arabie du sud-est et se diffuse sur plusieurs millénaires jusqu'en Asie centrale, en Inde, en Chine et même en Amérique du sud. Dans ces mêmes environnements à apport d'eau irrégulier, les eaux de pluies et de ruissellement ont été captées grâce à des obstacles sur les pentes ou au travers des talwegs. Ainsi il n'est pas rare de retrouver, encore aujourd'hui, des petites digues, des barrages ou des fossés construits transversalement aux cours d'eau. Ces aménagements ont été mis en place principalement au cours de l'Age du Bronze en Syrie (3), en Jordanie (4) ou au Yemen (5). Ces pratiques de collecte des eaux de surface, en plus des précipitations directes, ont permis de concentrer l'eau et les sols dans des espaces « hostiles » pour développer l'agriculture, mais aussi limiter l'impact des précipitations sur les habitations ou autres aménagements urbains (Fig. 4). Ces techniques sont, pour certaines, toujours exploitées aujourd'hui.

Retenir, acheminer et distribuer l'eau

Une fois l'eau captée, elle pouvait être stockée ou décantée dans des bassins de rétention, des citernes, des réservoirs ou des barrages (Fig. 4). Les citernes et les réservoirs, qui captaient généralement les eaux de surface, pouvaient être enterrés ou à ciel ouvert, de formes et de tailles variables, isolés ou construits en continu pour réduire la vitesse de l'eau ou favoriser la sédimentation de particules fines, protégés par des enduits ou laissés en l'état. Certaines civilisations à apport d'eau non pérenne (ex. les Mayas dans la péninsule du Yucatan) se sont fortement appuyées sur la construction de réservoirs pour leur développement agricole, urbain et politique.

Ensuite ou en parallèle, il était nécessaire d'acheminer ou de distribuer l'eau *via* des structures à ciel ouvert comme des canaux (construits à même la roche, à flanc

Fig. 4 : Captage et acheminement des eaux de ruissellement dans des cours d'eau temporaires (wadi) à Rustaq en Oman. Ces systèmes sont abandonnés depuis les 50 dernières années. (A) Organisation du paysage agricole avec des petites digues l # w h y j#l t s w s p l #z/ y G#H l w#h s p y y#p l n y#s j|É#p w #e | #k H#É h #e p#a t v#u#| h j #a l l #s y#k u p l m m#À y l u *parcelles en aval. © L. Purdue.*

de montagne, ou sous forme de larges réseaux arborescents) (Fig. 5), des aqueducs ou des structures enterrées comme des galeries souterraines ou des tuyaux en terre cuite qui apparaissent dès la période antique. Certains de ces aménagements hydrauliques étaient tellement complexes à construire que des tribus spécialisées devaient être en charge de leur conception et de leur construction. C'est notamment le cas des qanâts qui pouvaient acheminer l'eau sur plusieurs dizaines de kilomètres.

Fig. 5 : Structures de stockage de l'eau. (A) Canal et citerne toujours en utilisation dans les montagnes al Hajjar, T t h## G#H p | #y y ju l| h uk n# É s#kn#kl y#15 *millénaire av. notre ère) dont il est possible d'étudier le comblement* w v #É y t w y#l #k z x u h t #p x É l y#x#p à #A#4 #É z É y #w v #É z z #É y #u y u j | p # uRuh lz #h F 0 - 2
© L. Purdue.

ÉVOLUTION DE LA DISPONIBILITE EN EAU ET DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES HYDRAULIQUES

En parallèle aux contraintes géographiques, la disponibilité de la ressource en eau a évolué dans le temps sous l'effet de changements climatiques à long et court terme. Cette évolution a eu un impact indéniable sur le développement des sociétés hydrauliques. Il y a environ 12 000 ans débutait notre période de réchauffement interglaciaire, l'Holocène. Au sein de cette longue phase de réchauffement, plusieurs optimas climatiques ont été enregistrés, notamment entre 9000-6000 BCE[3] (Optimum climatique Holocène), entre 5000-2000 BCE (Optimum climatique de l'Holocène moyen associé à une aridification), entre 1500-1000 BCE (Âge du Bronze), entre 250 BCE et 400 CE (Optimum climatique Romain), entre le VIIIe-XIIIe siècle CE (Optimum climatique Médiéval) et aujourd'hui (Holocène supérieur) (6). Ces optimas sont marqués par des températures moyennes globales plus élevées voir même des phases d'aridification dans des zones auparavant humides, comme en Arabie ou dans le Sahara. Les premiers aménagements hydrauliques (puits et canaux), datés entre 8500-6000 BCE (7) au Proche Orient, sont construits au cours de

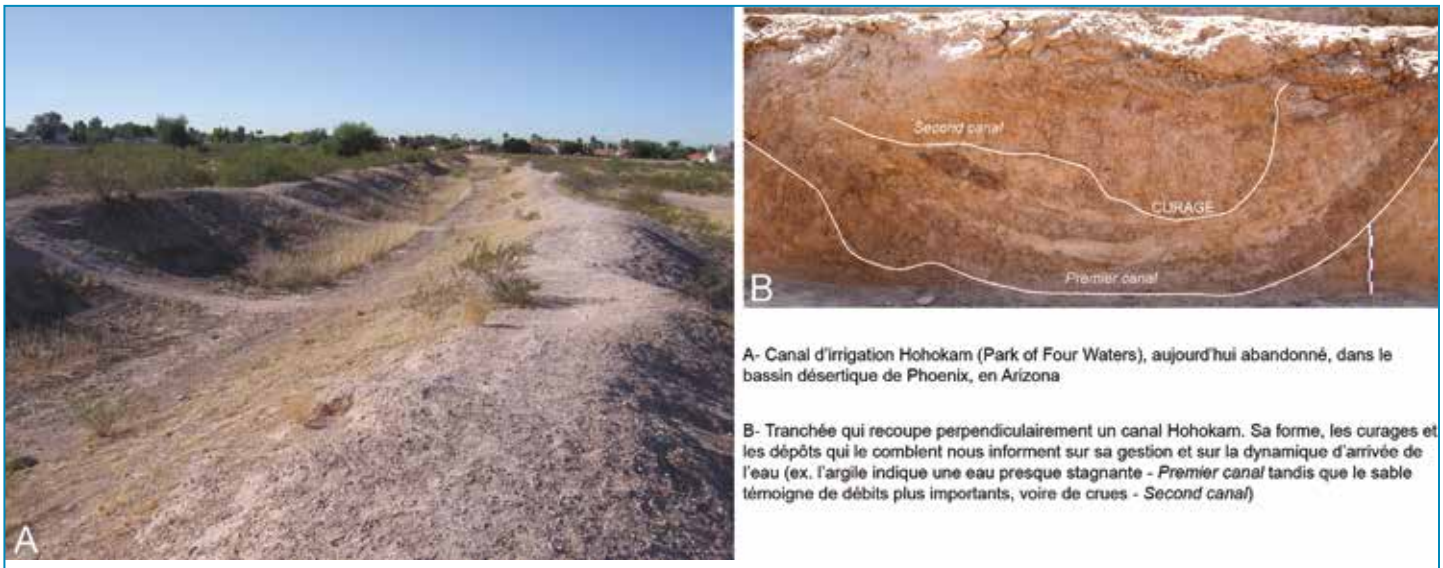
l'Optimum climatique Holocène. Puis, en parallèle ou au détriment de la petite hydraulique gérée à l'échelle du foyer ou de la communauté, une hydraulique à large échelle s'est clairement développée à partir du 3e -2è millénaire av. notre ère, au moment de l'aridification marquée de l'Holocène Moyen. La création de systèmes hydrauliques à grande échelle a requis une organisation collective et une main d'œuvre conséquente. Il a fallu évaluer la disponibilité de la ressource, la capter, l'acheminer, estimer les besoins en eau des cultures et des populations, gérer la maintenance des infrastructures, le tout en prenant en compte les capacités humaines et les évolutions démographiques. D'une ressource, l'eau s'est transformée en bien commun partagé qui a nécessité un véritable savoir hydraulique (8). Il est communément admis que le développement des grandes civilisations hydrauliques (ex. Assyrie, Mésopotamie, Egypte, Indus, Chine, Incas, Mayas) est étroitement connecté à une stabilité socio-économique et politique des sociétés. Or, le développement hydraulique a lui aussi favorisé le développement urbain, la centralisation des populations et la stabilité politique. Il a souvent été assumé que l'eau y était gérée de façon centralisée au sein d'une administration hiérarchisée, souvent dans un contexte étatique. Toutefois, l'absence de données empiriques remet régulièrement en question ce modèle. Initialement développés pour des usages domestiques et agricoles à petite et grande échelle, les usages de l'eau se diversifient très clairement au tournant de notre ère. L'eau y alors exploitée pour son énergie (moulins), pour alimenter les villes en eaux (aqueducs) et à des fins industrielles. Ces nouveaux usages ont souvent été accompagnés de développement techniques (syphons, mortier, tuyaux en argile), assurés par des transferts technologiques facilités entre et au sein des empires qui dominent à partir de cette époque, et ont nécessité une main d'œuvre de plus en plus importante, à la fois pour construire les aménagements et les maintenir.

Au cours de ces grandes périodes d'innovations technologiques associées à des développements agricoles, urbains et industriels, les sociétés anciennes se sont progressivement spécialisées en termes de production et de techniques. Bien qu'elles aient pris conscience du risque hydrologique et climatique et s'y soient en partie adaptées, ces spécialisations, principalement agricoles, ont indirectement augmenté leur vulnérabilité aux changements environnementaux. Des réponses adaptatives à ces changements à haute fréquence (cad qui ont lieu régulièrement sur une courte période de temps) ont existé, comme l'alternance ou la combinaison entre une agriculture irriguée et une agriculture sèche couplée à du pastoralisme en réponse à quelques années de sécheresse ou de conflit à l'eau. La clé de la réussite semble donc reposer sur la flexibilité des sociétés. À l'opposé, les évènements à basse fréquence non anticipables, dit catastrophiques (ex. creusement du cours d'eau, sécheresse séculaire), ont eu des impacts certains sur la gestion des ressources voire même sur la structuration sociale des sociétés. Dans des temps anciens, ces contraintes non anticipables, associées en conséquence à la (sur)exploitation des ressources hydriques dans un milieu social qui se déséquilibre (ex. expansion massive des zones urbaines, tensions politiques, augmentation d'une agriculture trop spécialisée) ont poussé les populations à migrer. La diminution de la main d'œuvre qui fait suite aux déplacements des populations conduit inexorablement au déclin des systèmes hydrauliques. C'est ainsi que les paysages se ponctuent de vestiges abandonnés au cours du temps.

Exemple des communautés Hohokam dans le sud-ouest américain : adaptations et déclin au cours des deux derniers millénaires

Les Hohokam ont occupé, exploité et irrigué la vallée de la Salt dans le bassin désertique de Phoenix en Arizona entre le IIIe et le XVe siècle de notre ère. Ils y ont construit des systèmes d'irrigation gravitaires à grande échelle pour s'adapter à des conditions hydrologiques et climatiques contraignantes. L'occupation de la vallée est marquée par de profondes mutations socio-économiques autour de 1150 CE et 1450 CE. Etant donné la dépendance et l'interaction constante de cette communauté avec la ressource en eau, sa disponibilité sur le long terme a-t-elle eu un impact sur ces mutations ?

À partir d'une approche cartographique, (géo)archéologique et chronologique des réseaux hydrauliques, des traces de leur entretien et de leur comblement (Fig. 6), complétée par une analyse archéologique de l'occupation du territoire et de l'évolution des paysages naturels de la vallée, il a été possible de comprendre qu'entre 300-1050 CE les Hohokam avaient irrigué efficacement les plaines de la Salt, qui se seraient naturellement élevées du fait de l'accumulation de limons d'inondation, puis se seraient stabilisées entre 850-1000 CE (Optimum climatique Médiéval). L'irrigation presque exclusive à cette période permettait d'exploiter les « 3 sœurs », le maïs, les haricots et les courges. Puis, un épisode d'élargissement incontrôlé et de creusement de la Salt River entre 1050-1150 CE, lié aux épisodes froids et humides d'El Niño, génère une forte perte des terres, un entretien poussé des structures hydrauliques, la remontée des prises d'eau et la construction de nouveaux réseaux hydrauliques, et une diversification des pratiques agraires. En parallèle, on assiste à une phrase de migra-



A- Canal d'irrigation Hohokam (Park of Four Waters), aujourd'hui abandonné, dans le bassin désertique de Phoenix, en Arizona

B- Tranchée qui recoupe perpendiculairement un canal Hohokam. Sa forme, les curages et les dépôts qui le comblent nous informent sur sa gestion et sur la dynamique d'arrivée de l'eau (ex. l'argile indique une eau presque stagnante - *Premier canal* tandis que le sable témoigne de débits plus importants, voire de crues - *Second canal*)

*Fig. 6 : Structures hydrauliques amérindiennes dans le sud-ouest américain. (A) Vestige d'un canal principal vieux d'un millénaire et des remblais de curage sur les côtés (Park of Four W*h | HUyo zv 1 Fn yp pä 0#W# uGHH-v É#wyl h u z#a l #ú uz h *canal Hohokam pour étudier sa chronologie et son remplissage. © L. Purdue.*

tion massive dans la vallée. Puis le cours d'eau reprend sa dynamique initiale et les réseaux hydrauliques fonctionnent à nouveau de façon optimale entre 1150-1450 CE, date à laquelle la vallée est abandonnée.

La présence d'eau à cette période n'indique donc pas un déclin lié à une diminution de la ressource en eau. Il semblerait qu'il faille remonter quelques siècles plus tôt, à la crise socio-environnementale du 11e siècle. À cette date, des conditions climatiques contrastées dans un contexte d'agriculture spécialisée ont profondément marqué le paysage mais les Hohokam s'adaptent de façon optimale à ces changements abrupts. Cette adaptabilité favorise l'arrivée de populations extérieures, soumises aux mêmes contraintes environnementales mais moins résilientes. Cette augmentation de la population à très court terme, associée à un anthroposystème en pleine réorganisation, pourrait être responsable du lent déclin de la communauté d'irrigation Hohokam, 200 à 300 ans plus tard (9). Ces résultats offrent une illustration des réponses systémiques aux problèmes écologiques et sociaux et peuvent nous permettre d'appréhender plus clairement les causes des stimuli qui affectent nos sociétés modernes.

DES LEÇONS A TIRER DU PASSÉ ?

Dans un contexte de changement global, les contraintes sur la ressource en eau sont aujourd'hui majeures : croissance démographique et urbanisation, tourisme, surexploitation des ressources en eau dans un contexte de réchauffement, mutations socio-économiques, spécialisation agricole, engagement de l'Etat, délégation de l'eau à des sociétés privées ou des agences régionales. Ces contraintes ont un impact majeur : dégradation de la qualité de l'eau, perte des terres et diminution de la qualité des sols, abandon des zones exploitées, problème de gestion de la ressource et conflits de l'échelle locale à étatique sur l'accès à l'eau, prix de l'eau, déplacement des populations.

Il y a des leçons à tirer de comment les sociétés anciennes et les gestionnaires de l'eau se sont adaptés aux changements climatiques et quelles techniques ont été développées en réponse à ces changements. L'approche archéologique, (géo)archéologique et géographique de l'eau peut très clairement contribuer au débat sur la gestion raisonnée de cette ressource et proposer des modes alternatifs d'exploitation. Prenons pour exemple ici la technique relativement simple de canalisation des eaux de ruissellement à des fins agricoles. C'est une technique d'acquisition des ressources en eaux et en sol qqui se développe dans le sud-est Arabique à partir du 1er millénaire av. notre ère (10). Elle permet la conquête de nouveaux territoires et le développement d'une agriculture flexible, en combinaison avec du pastoralisme. Toutefois, cette technique est abandonnée au tournant du premier millénaire de notre ère à la faveur du captage des eaux souterraines et d'une spécialisation agricole qui permet de développer non plus des cultures vivrières, mais des cultures de rente. Cette technique de petite hydraulique est pourtant clé en milieu semi-aride à aride. Au-delà d'une meilleure économie de l'eau et d'une stabilisation de la

ressource en sol, son développement et sa réhabilitation peuvent également maintenir une biodiversité régionale et limiter l'impact des crues dites « catastrophiques ». À ce jour, seuls certains types de systèmes de partage de l'eau ont été réhabilités. On peut notamment mentionner la réhabilitation des qanâts en Arabie (ex. oasis d'Al Ain, Emirats Arabes Unis), ou des meskat au Maghreb. Toutefois, et malgré l'efficacité de ces structures et le travail effectué en amont pour comprendre leur fonctionnement, puis l'implication des gouvernements et des ONG pour les préserver et les réhabiliter, cette démarche nécessite avant tout un investissement local. Une des étapes clés est donc de transmettre nos savoirs aux populations locales, de les sensibiliser à la question écologique, à la mémoire des pratiques, aux notions de risques et d'aléas, et à l'importance de sauvegarder les réseaux et les systèmes hydrauliques.

RÉFÉRENCES

(1) Lévêque C et al. (2003) L'anthroposystème : entité structurelle et fonctionnelle des interactions sociétés-milieux. Dans : Lévêque C, van Der Leeuw S (Eds.), *Quelles natures voulons-nous ? Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement*. Elsevier, Paris, pages 110-129.
(2) Peltenburg E et al. (2000) Agropastoral colonization of Cyprus in the 10th millennium BP: Initial assessments. *Antiquity* 74 : 844–853.
(3) Braemer F et al. (2010) Conquest of new lands and water systems in the western Fertile Crescent (Central and Southern Syria). *Water History* 2 : 91-114.
(4) Müller-Neuhof B (2014) Desert irrigation agriculture: Evidence for early bronze age rainwater-harvesting irrigation agriculture at Jawa (NE Jordan). Dans : Morandi Bonacossi D (Ed.), *Settlement dynamics and human-landscape interaction in the dry steppe of Syria*. Studia Chaburensia, Harrassowitz, Vol. 4, pages 187–197.
(5) Harrower MJ (2008) Hydrology, ideology, and the origins of irrigation in ancient Southwest Arabia. *Current Anthropology* 49 : 497–510.
(6) Le Roy Ladurie E (2004, 2006, 2009) *Histoire humaine et comparée du climat*. Ed. Fayard, Paris.
(7) Wilkinson TJ, Rayne L (2014) Hydraulic systems in the Middle East. Dans : Selin H (Ed) *Encyclopaedia of the history of science, technology, and medicine in non-Western cultures*. Springer, pages 1-24.
(8) Sabatier J-L, Ruf T (1995) La gestion sociale de l'eau. *Infores'eau* 6 : 9-11.
(9) Purdue L (2011) Dynamique des paysages agraires et gestion de l'eau dans le bassin semi-désertique de Phoenix, Arizona de la Préhistoire à l'époque moderne. Thèse de doctorat en Histoire et Archéologie, Université de Nice Sophia Antipolis, 617 pages.
(10) Purdue L et al. (2021) Ancient agriculture in Southeast Arabia: A three thousand year record of runoff farming from central Oman (Rustaq). CATENA 204, pp.105406.

NOTES

(1) La géoarchéologie est une discipline de l'archéologie qui emploie les méthodes des sciences de la terre et qui vise à reconstruire les milieux physiques dans lesquels les sites sont implantés et ont évolué.
(2) Cette technique hydroagricole se nomme *fajjarah* en Syrie, *falaj* en péninsule arabique, magara en Jordanie, *foggara* en Algérie, *khettara* au Maroc, *kriga* en Tunisie, *karez* au Pakistan et au Baloutchistan, *kehriz* au Turkménistan.
(3) BCE : Before Common Era (equivalent à av. J.-C.) et CE : Common Era (équivalent à apr. J.-C.).

Gouvernance de l'eau et dynamiques territoriales

***Stéphane Ghiotti**, DR CNRS, est géographe au laboratoire Art-Dev UMR 5281. Ses travaux portent sur la géographie des territoires de l'eau à travers les approches de gestion de l'eau par bassin versant en lien avec les processus de régionalisation/décentralisation ou encore la mise en œuvre de la Directive-cadre européenne sur l'eau (DCE). Il travaille aujourd'hui sur la gouvernance des complexes lagunaires. Ses terrains d'étude sont localisés en Méditerranée en général et sur la France et le Liban en particulier. Il est auteur d'un ouvrage intitulé Les territoires de l'eau (2007, CNRS Editions) et co-éditeur du livre Enjeux de l'eau en Méditerranée orientale (2013, Presses universitaires de Provence).*

***Anne Rivière-Honegger**, DR CNRS, est géographe à l'UMR 5600 Environnement Ville Société – ENS de Lyon. Ses travaux en géographie sociale de l'environnement sont consacrés aux études de l'interface homme/nature et de la dynamique de la relation des sociétés à leur espace. Dans une approche interdisciplinaire, elle étudie les usages, les pratiques et les représentations de l'eau en Méditerranée et ailleurs. Elle est co-auteur de deux ouvrages : Paysage des Cevennes (2000, Privat) et Évaluation du paysage : une utopie nécessaire (2004, Presses universitaires de la Méditerranée).*

***Résumé** : Dans le contexte actuel de changements globaux et d'appel à la sobriété, nous proposons de nous interroger à l'aune des travaux de recherche récents, sur les perspectives envisageables de la relation eaux/sociétés/territoires. Il s'agit d'abord de montrer, au travers d'éléments notionnels et de cadrage, combien l'interdépendance du territoire et de l'eau est grande, et de préciser la notion de gouvernance et ses liens avec la gestion. Il s'agit ensuite de présenter, au travers de la production d'une analyse sur un territoire littoral aux multiples enjeux : les lagunes méditerranéennes (Occitanie) et plus particulièrement de l'Etang de l'Or, des éléments de discussion.*

L'eau apparaît comme un facteur important de la dynamique des territoires. La littérature, riche, émanant tant des géographes que des historiens, des politistes ou des sociologues, montre que la thématique des rapports eaux, sociétés et territoires est analysée traditionnellement en termes de conflits, de crises hydrauliques, de géopolitique, de risque, d'évolution des flux de ressources et des services. Plus récemment, elle a été traitée au travers de l'étude de la construction et de l'usage des indicateurs écologiques de qualité de l'eau (1), des découpages retenus pour les territoires de gestion (2) ou de l'expérimentation de nouveaux modes de gouvernance (3). Aborder la thématique de l'eau au prisme de la gouvernance, « c'est-à-dire sous l'angle des formes de coordination et de pilotage de l'action publique », (…) invite « à porter attention aux processus de coordination entre différents types d'acteurs publics et privés » (4). Notre propos, dans cet article, est centré sur la situation française.

L'actualité du sujet est double : le Sénat vient de remettre un rapport sur l'avenir de l'eau (https://www.senat.fr › 2022 › r22-142-notice) qui « vise à mettre en lumière les efforts qui vont être nécessaires pour éviter de faire face à des situations de pénurie et des guerres de l'eau », et des Assises de l'eau sont organisées pour une large concertation avec toutes les parties prenantes. Aussi, dans ce contexte de réflexion sur l'adaptation aux changements globaux et d'appel à la sobriété, nous proposons de nous interroger, à l'aune des travaux de recherche récents, sur les perspectives envisageables de la relation eaux/sociétés/territoires. L'étude de l'eau fait en effet l'objet d'approches diverses, à la fois systémiques et interdisciplinaires, associant les sciences de l'environnement et les sciences humaines et sociales sur des terrains d'expérimentation communs et diversifiés. Penser l'intégration des échelles spatio-temporelles dans l'évolution de la gestion de la ressource en eau et des milieux aquatiques est un enjeu fort (5). Nous rappellerons tout d'abord combien l'interdépendance du territoire et de l'eau est grande et préciserons la notion de gouvernance et ses liens avec la gestion. Nous nous appuierons ensuite sur l'exemple des lagunes méditerranéennes (Occitanie), pour présenter la posture actuelle de la recherche qui consiste notamment à décrypter des situations complexes et à produire des analyses en dialogue avec les acteurs des mondes de l'aménagement, de l'environnement et de l'eau (6).

UNE INTERDÉPENDANCE DU TERRITOIRE ET DE L'EAU

L'eau est profondément marquée par l'extrême inégalité

de sa présence et de sa disponibilité à l'échelle du globe. Cela se manifeste tant dans l'espace que dans le temps, qu'en termes de volumes ou encore de qualité. Située dans une zone de climat tempéré, occupant une superficie moyenne, bordée ou traversée par plusieurs grands fleuves et bénéficiant d'une pluviométrie suffisante, la France, hormis quelques épisodes de sécheresse et la canicule de 2003, ne connaissait pas, jusqu'à ces dernières décennies, de graves problèmes d'accès à l'eau. Depuis cette période, la disponibilité quantitative de la ressource en eau douce et l'évolution de sa qualité sont source d'inquiétude croissante (https://www.cieau.com/connaitre-leau/les-ressources-en-france-et-dans-le-monde/quel-est-letat-de-leau-en-europe/ ; : https://www.eaufrance.fr/)

Les tentatives des sociétés humaines pour intervenir sur ce que l'on appelle le cycle de l'eau, afin de tenter d'en atténuer ou d'en contrer ses effets, sont anciennes et les exemples nombreux à travers les âges. L'utilisation de l'eau par les sociétés à travers le monde s'effectue souvent à partir de dispositifs techniques très élaborés et ingénieux permettant de tirer profit de ses matérialités (salée, douce, saumâtre, limoneuse, acide, basique….). Cela participe de la définition d'une géographie de l'eau qui s'affirme comme éloignée d'une stricte interprétation déterministe. L'accès à la ressource, sa répartition et sa distribution, sont toujours associés à un système de pouvoir qui édicte un ensemble de règles et de devoirs et donc la fonction principale est d'en assurer la régulation et le contrôle.

L'ensemble de ces modalités d'utilisation des ressources en eau, qui se déploient à des échelles et niveaux multiples, sont des constructions sociales, historiquement contingentes, relationnelles et politiquement contestées. L'eau met en relation des individus, des groupes sociaux, des usages, des capitaux, lesquels dessinent des espaces et des paysages, dont l'appropriation, la mise en ordre, le développement au profit de certains, engendrent des coopérations et/ou des compétitions, des tensions voire des conflits, inhérents à toute vie en société et non réductibles aux seuls « manques » d'eau.

Les ressources en eau sont ainsi un objet géographique par excellence tant elles participent à la répartition des hommes et de leurs activités à la surface de la terre et, de ce fait, aux dynamiques territoriales. Convoitée, perçue, représentée et utilisée de manière différente au sein d'un même territoire, l'eau des uns n'est pas l'eau des autres. Sauf à laisser faire les mains invisibles, soit du marché soit de la nature, l'eau, son accès et son utilisation sont ainsi intrinsèquement liés à différentes formes d'interventions et d'objectifs dont on peut retracer brièvement la lignée.

Sans barrière étanche entre elles, plusieurs périodes se sont succédées, marquées par des notions phares propres à les caractériser. Relevons que l'État, eu égard à la place éminente qu'occupe l'eau dans la vie sociale, est intervenu très tôt pour définir les règles du jeu relatives à son utilisation et pour organiser une alimentation suffisante en quantité et en qualité sur tous les territoires de l'hexagone. À la période de « la maîtrise/conquête de l'eau », caractérisée par les courants dits «hygiéniste» et « sanitaire » au XIXe siècle, et finement étudiée par Jean-Pierre Goubert (7), a succédé celle marquée par les références à l'aménagement/développement de la ressource, dont les infrastructures techniques - et notamment le barrage -, sont la figure de proue. Cette période, appelée la « mission hydraulique », s'étend environ jusqu'aux années 1960 avant d'être progressivement remise en cause, autant par les conséquences sociales et environnementales des travaux et ouvrages réalisés que par les coûts financiers associés, que par les modes de décision des bureaucraties hydrauliques et enfin par le questionnement sur la place et le rôle de l'État dans les politiques de l'eau.

C'est alors que la gestion de l'eau apparait dans le langage administratif et remplace, du moins en France, le champ sémantique de l'aménagement et du développement (8). Plus qu'un changement de vocabulaire, parler de gestion de l'eau manifeste la nécessaire prise en considération des tensions que suscitent la satisfaction des besoins d'un côté et les enjeux environnementaux de l'autre autour, par exemple, de la raréfaction de la ressource ou encore des problématiques de pollution. En 1964, la loi sur l'eau marque un tournant décisif, celui du passage d'une gestion par filière à celui d'une gestion globale. Elle crée six nouvelles circonscriptions administratives, les bassins hydrographiques. Chaque bassin est composé d'une instance décisionnelle, le comité de bassin, et d'un exécutif, l'Agence financière de bassin. Le principe de l'unicité de la ressource en eau est également acté : relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines, entre les aspects qualitatifs et quantitatifs et entre l'amont et l'aval. Le système de redevance et l'application du principe pollueur-payeur complète ce qui forme depuis les briques essentielles du modèle français de gestion de l'eau.

Durant les années 1990, la notion de « bonne » gouvernance de l'eau s'impose progressivement, sous l'impulsion des grands bailleurs et associations de protection de la nature à l'échelle internationale (Fig. 1), dans le

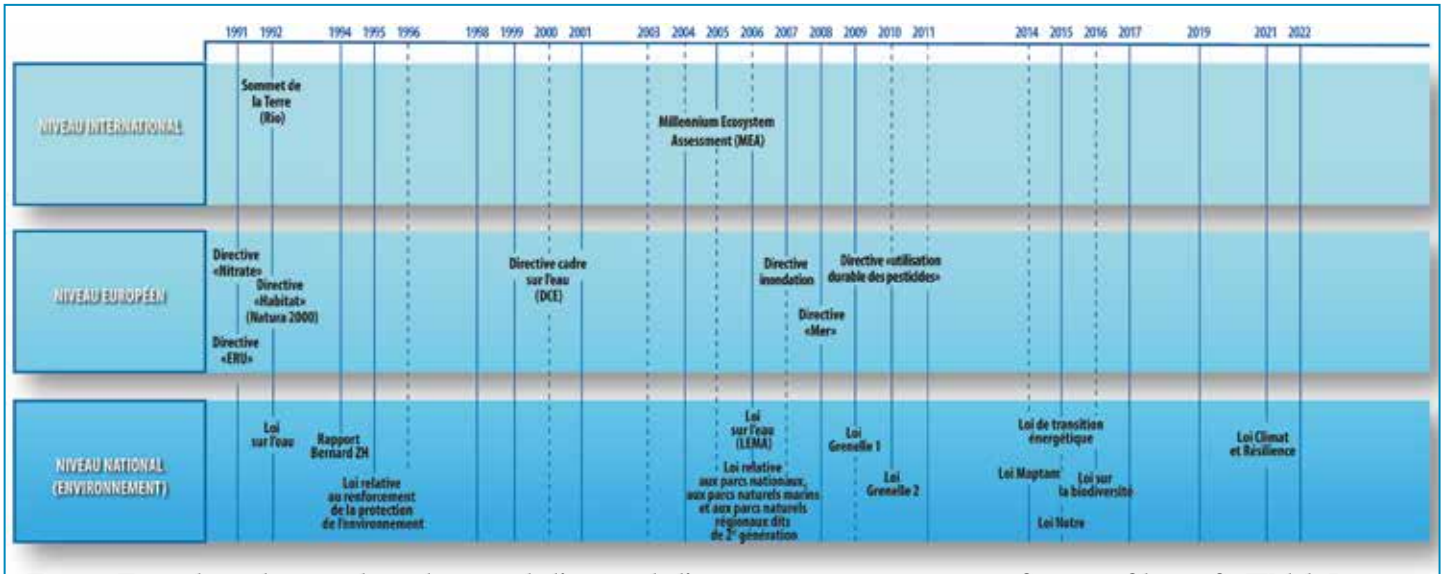


Fig 1 : Frise chronologique des politiques de l'eau et de l'environnement 1990-2022. Source : Ghiotti S, Walek P, 2023, d'après Ghiotti S, 2018, vol. 3 HDR.

double sillage du développement durable et du principe de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 institue une planification systématique et obligatoire de la ressource en eau sous la forme de Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) à l'échelle des grands bassins hydrographiques et de Schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) pour les bassins de taille inférieure. La gestion de l'eau est, depuis, en lien direct avec le développement territorial.

En octobre 2000, la DCE (2000) établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau pour assurer la protection des eaux continentales, souterraines et côtières. L'objectif à atteindre devient le « bon état écologique » dans le cadre spatial du district hydrographique. La participation est encouragée, entendue comme la participation active des parties intéressées, la mise à disposition des informations et la consultation du public. La loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA, 2006), actuellement en vigueur, procède à la rénovation de l'organisation institutionnelle de la politique de l'eau.

La période récente a vu deux réformes territoriales majeures à l'échelle du grand et du petit cycle de l'eau, qui ont conduit à des transferts de compétence : Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (GEMAPI), et eau potable et assainissement aux intercommunalités à fiscalité propre (communautés de communes, communautés d'agglomération, métropoles). Cela entraîne une « refonte de la géographie des territoires et des pouvoirs de l'eau » (4, p. 31) et touche deux collectivités centrales de l'action publique territoriale, les Départements et les Régions. La gestion intégrée et territoriale de l'eau à l'échelle du bassin versant traduit donc la translation des relations entre la société et les milieux aquatiques et celle des modes d'action publique vers une approche transversale, multi-objectifs, pluri-acteurs et territorialisée en matière de décisions et d'action. La question de leur articulation est renforcée.

Même si gestion et gouvernance se combinent, elles possèdent des limites floues et les deux notions ont fait l'objet d'une nécessaire clarification (9), car elles renvoient à des processus bien différents. D'une manière générale, si la gouvernance concerne les formes de pouvoirs, les autorités et les responsabilités exercées par des organisations ou des individus, la gestion quant à elle renvoie aux ressources, plans et actions produits par la gouvernance et visant son application (10). L'exemple qui suit l'illustre.

LES LAGUNES MÉDITERRANÉENNES OÙ LES SPÉCIFICITÉS DE LA GOUVERNANCE D'UN BASSIN VERSANT LITTORAL : LE CAS DE L'ÉTANG DE L'OR

Les étangs littoraux, ou lagunes, sont l'une des caractéristiques majeures de la géographie littorale d'Occitanie. Des Pyrénées au Rhône, 11 complexes lagunaires s'étendent en chapelet le long des 200 kilomètres de côtes, pour une superficie totale d'environ 60 000 ha. À la grande diversité de leur écologie, taille, formes et fonctionnement hydro-géologique, répond celle des configurations territoriales et des coalitions d'acteurs qui en assurent la gestion et la gouvernance (11). Cinquième

plus grande lagune française par sa superficie, l'étang de l'Or (Hérault) comprend 3 000 ha de plan d'eau auxquels s'ajoutent 2 000 ha de zones humides périphériques et ne compte qu'un seul point de contact (grau) avec la mer Méditerranée, à Carnon.

La ressource : les caractéristiques hydro-géologiques d'un bassin versant lagunaire

Le bassin versant de l'étang de l'Or s'étend sur près de 410 km^2 entre la ville de Montpellier à l'ouest et le fleuve Vidourle à l'est. La moyenne des précipitations (1900-2009) est comprise entre 800 et 600 mm par an. Il est drainé par cinq cours d'eau côtiers principaux, dont le cumul linéaire est de 285 km et dont la particularité est d'être quasiment à sec 90 % du temps, notamment dans le secteur amont. Deux principales nappes souterraines sont présentes sur le bassin versant. En termes de ressource, le bassin versant de l'étang de l'Or est marqué par son intense aménagement après la Seconde guerre mondiale, notamment sur le volet hydro-agricole *via* la Compagnie nationale d'aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc (CNABRL), et la construction d'un canal de transport d'eau brute depuis le Rhône. Cette infrastructure à ciel ouvert, qui traverse le bassin d'est en ouest pour se terminer sur la commune de Mauguio, distribue de l'eau à des fins d'irrigation agricole mais aussi pour l'alimentation en eau potable. Ce canal représente ainsi une ressource stratégique pour le territoire. Selon les dernières études, les consommations sont évaluées à 40 millions de m^3 tous usages confondus, dont près de 75 % sont assurés par le seul canal BRL.

Les enjeux : concilier les eaux douces, saumâtres et salées et les objectifs de qualité et de biodiversité

Les enjeux, surtout concentrés sur et autour de la lagune, donnent à lire une certaine périodicité sur le temps long. La navigation, la pêche (Fig. 2), l'agriculture (accès aux pâtures et aux bonnes terres, puis irrigation plus tardivement), sans oublier les enjeux sanitaires (malaria) et la chasse, ont très largement orienté les modes de gestion visant pour l'essentiel à assurer une régulation entre i) les différentes qualités d'eau, ii) ses quantités, iii) la forte saisonnalité et spatialité des besoins. À ces enjeux « historiques », se sont progressivement ajoutés les enjeux environnementaux, sans que ces derniers ne constituent un ensemble homogène. Les conséquences de l'aménagement hydro-agricole de ce territoire, combinées à celles liées à sa mise en tourisme par la Mission « Racine », ont profondément modifié l'hydrologie et la morphologie de l'ensemble des milieux humides (cours d'eau, zones humides, lagunes) ainsi que les dynamiques économiques et démographiques. La croissance de la population, le

Fig. 2 : L'étang de l'Or Pêcheur. © S. Ghiotti.

Fig. 3 : L'étang de l'Or à Mauguio Carnon. © S. Ghiotti.

développement d'une agriculture intensive et la progressive puis massive artificialisation des sols (urbanisation et infrastructure), ont fait de la problématique de la pollution des eaux (peu compatible avec un territoire touristique… et une activité de pêche en lagune), un enjeu central.

Associée à la maîtrise du taux de sel dans l'étang (important pour les chasseurs), la lutte contre l'eutrophisation (nitrate et phosphate) a été le point cardinal de la conduite des politiques publiques dans le bassin versant (contrat d'étang avec la construction/mise aux normes de stations d'épuration). En écho à la mise sur l'agenda politique international de la nécessaire conservation des zones humides suite à la Convention de Ramsar en 1971, l'enjeu ornithologique d'abord, puis celui des habitats, sont venus compléter la problématique environnementale et fournir un accélérateur à la nécessaire lutte contre les pollutions. L'intervention de l'Europe fut décisive à partir des années 1990, action relayée à l'échelle nationale par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, les services régionaux de l'État (DIREN) et les collectivités territoriales (Conseil général de l'Hérault). Ceux-ci poussèrent à la structuration politique de l'échelle bassin versant avec la création d'un syndicat mixte de gestion. Ce fut d'abord une action impulsée par un programme Life puis la déclinaison territoriale des directives européennes. Ces dernières ont ciblé tour à tour les enjeux de biodiversité-faune/flore (Natura, 2000) puis ceux liés à l'eau, qu'elles soient de surface (DCE, 2000), souterraines (2006), marine (2008) ou liées aux inondations (2007) (voir Fig. 1), donnant au processus d'écologisation du territoire un panel d'actions publiques aussi complet que difficile à coordonner. Sur la période plus récente, la prise en compte des effets du changement climatique (sécheresse), ainsi que l'incorporation des enjeux littoraux (érosion du trait de côte, élévation du niveau marin et submersion), sous l'effet notamment des évolutions institutionnelles (décentralisation et intercommunalités), s'intègrent dans les débats et questionnent la poursuite et le contenu des politiques jusqu'alors mises en œuvre.

Une problématique actuelle multidimensionnelle centrée autour du « comment gérer les effets d'accumulation ? » Inondations, érosion, submersion, conservation/protection et urbanisation

Le bassin versant de l'étang de l'Or est donc confronté à de multiples enjeux mettant aux prises différents acteurs situés à des échelles différentes et disposant de capacités d'action inégales. La configuration géographique des bassins versants côtiers et lagunaires fait que l'une des principales difficultés est de gérer la concentration des problèmes en un même espace, l'aval. Dans notre cas, il s'agit des territoires les plus urbanisés (Figs. 3 et 4), les plus densément peuplés et équipés en termes d'infrastructure, sans compter leur exposition aux risques notamment celui d'inondation, du fait de leur faible altitude et de leur configuration plane. Rappelons que le bassin versant de l'Or est traversé par un canal d'irrigation, une voie navigable, une ligne LGV et une TGV, deux autoroutes dont l'une a été récemment requalifiée en autoroute urbaine. C'est ce que nous appelons les effets d'accumulation. Ces concentrations et ces accumu-

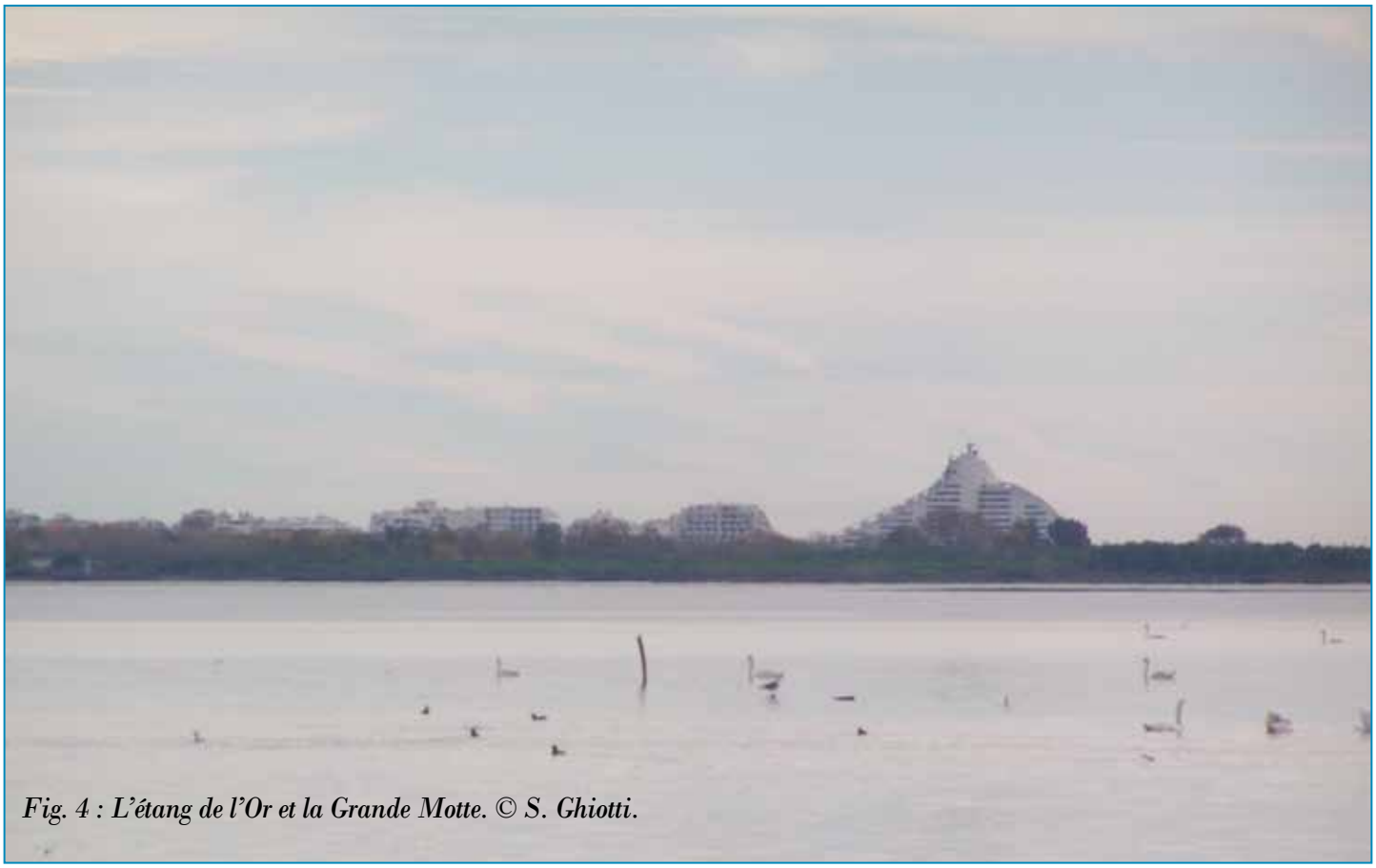


Fig. 4 : L'étang de l'Or et la Grande Motte. © S. Ghiotti.

lations ne se conçoivent pas uniquement en termes d'addition mais aussi en termes d'effets multiplicateurs aux effets incertains, décalés dans le temps et l'espace et pour beaucoup inconnus. À titre d'exemple, en témoignent pour les complexes lagunaires, la problématique de la pollution par les pesticides et « les effets cocktails » liés aux différentes molécules qui se retrouvent en interaction dans ces milieux. Au « risque simple », propre à chaque molécule, s'ajoute ainsi un « risque cumulé ».

Enfin, cette problématique de l'accumulation touche aussi les politiques et instruments d'actions publiques. Si l'on s'appuie uniquement sur les directives européennes, les complexes lagunaires sont concernés par sept d'entre elles depuis le début des années 1990. Chacune de ces directives poursuit ses objectifs, possède sa logique propre et sa temporalité ainsi que ses acteurs cibles et ses échelles de référence, etc. Soumis au paradigme de la gestion intégrée, la mise en œuvre, la coordination et l'évaluation de l'efficacité de ces mix politiques est souvent un vœu pieu et adresse des défis de taille aux dispositifs de gestion et de gouvernance qui en ont la charge.

La gestion, des approches techniques aux solutions fondées sur la nature

La régulation de l'eau, tant en quantité qu'en qualité, est la clé de voûte de la gestion des complexes lagunaires. En l'espace de quarante ans, les solutions apportées par les différents acteurs pour tenter de résoudre la diversité des enjeux précédemment évoqués ont connu un renversement assez sensible d'orientation quant aux préconisations d'intervention. L'étang de l'Or, à l'instar d'autres lagunes, offre de ce point de vue un panorama assez complet de ces évolutions, que l'on peut schématiquement résumer par le passage des solutions techniques et d'ingénierie aux actuelles valorisations des « services écosystémiques » ou autres « solutions fondées sur la nature ». Il s'agit de s'appuyer sur les écosystèmes (restauration et conservation mais aussi aménagement) pour faire face aux enjeux liés cette fois aux changements globaux.

La gouvernance ou les défis de l'inter-territorialité : la lagune, les zones humides, le bassin versant et une métropole

Comme nous avons essayé de le montrer, la gestion des territoires lagunaires révèle une complexité d'enjeux, d'échelles, d'acteurs et d'interactions. Prévoir tous les effets et conséquences tant dans le temps que dans l'espace est donc difficile. Les modalités de gestion et les systèmes de gouvernance associés se créent, s'accumulent et hiérarchisent les priorités et les financements.

Ils s'articulent, se font et se défont en fonction des changements environnementaux à traiter, des majorités politiques ou encore des changements de compétences, comme dernièrement avec le déploiement territorial de la compétence GEMAPI. Ces processus sont, par définition évolutifs, pluri-acteurs et multi-échelles. Si les territoires de gestion spécifiques, de type fonctionnel comme les bassins versants, gardent une certaine pertinence, ils doivent aussi composer aujourd'hui avec les périmètres des intercommunalités. La nature et l'ampleur des défis (élévation du niveau marin, érosion côtière, inondations, augmentation des sécheresses...) dépassent ces différents périmètres dans la plupart des situations. La question des solidarités sociale, territoriale et environnementale passe alors (entre autres) par des mécanismes de coopération et de partenariat au travers notamment de l'inter-territorialité.

Les éléments de cadrage ainsi que l'exemple développé dans cet article montrent que « La préservation, la remédiation et le partage équitable des ressources en eau sont des enjeux majeurs pour nos sociétés. » (12, p. 9). Au regard des défis actuels et à venir et des enjeux inédits qui se posent à la gestion de l'eau, cela suppose un renouvellement des questionnements sur la relation eaux/sociétés/territoires. En effet, le contexte de changements globaux accentue certains enjeux (quantitatifs et/ou qualitatifs) et en suggère de nouvelles hiérarchies (entre biodiversité, énergie, santé publique, agriculture et alimentation) à toutes les échelles spatio-temporelles, les valeurs sont bousculées, les projets de territoires mis en tension, les techno-solutions controversées, la gouvernance et l'action se réinventent vers un élargissement à l'ensemble des parties prenantes. Penser la gestion territorialisée de l'eau et des milieux aquatiques dans un tel contexte implique ainsi une nécessaire réflexion sur la construction des savoirs et des connaissances et une veille sur les expérimentations en cours (gestion instituée, initiatives citoyennes etc.).

RÉFÉRENCES

(1) Bouleau G (2006) Le débat sur la qualité de l'eau. Comment des données peuvent devenir des indicateurs ? *Ingénieries-EAT* N° 47.
(2) Ghiotti S (2015). Eau, territoires et sociétés. Dans : Euzen A, Jeandel C, Mosseri R (eds) *L'eau à découvert*. Paris, CNRS Éditions, 250-251.
(3) Hassenforder E et al. (2020) Enjeux et pluralité de la participation dans la gestion intégrée des ressources en eau. Dans : Leenhardt D, Woltz M, Barreteau O (coord.) *L'eau en milieu agricole. Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*. Éditions Quae, Paris, 71-87.
(4) Barone S et al. (2018) *Gouvernance de l'eau : un mouvement de réforme perpétuelle ?* Éditions L'Harmattan (collection Sociologies et environnement), Paris, 253 pages.
(5) Chery J-P, Rivière-Honegger A (2020) Les enjeux multi-échelles en gestion intégrée et territoriale de l'eau. Dans : Leenhardt D, Woltz M, Barreteau O (coord.) *L'eau en milieu agricole. Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*. Éditions Quae, Paris, 55-69.
(6) Rivière-Honegger A, Ghiotti S (éds) (2022) Chercheurs d'eaux au temps des changements globaux. Quelles perspectives pour les territoires ? *Géocarrefour* 96, n° 1 et 2 https://journals.openedition.org/geocarrefour/17863; https://doi.org/10.4000/geocarrefour.18864
(7) Goubert J-P (1986) *La Conquête de l'eau. L'avènement de la santé à l'âge industriel*. Robert Laffont, collection Les hommes et l'histoire, 302 pages.
(8) Haghe J-P (1998) *Les eaux courantes et l'Etat en France (1789-1919) : du contrôle institutionnel à la fétichisation marchande*. Thèse de doctorat, EHESS, 649 pages.
(9) Bennett NJ, Satterfield T (2018) Environmental governance: A practical framework to guide design, evaluation, and analysis. *Conservation Letters*, 1-13.
(10) Lockwood M (2010) Good governance for terrestrial protected areas: A framework, principles and performance outcomes. *Journal of Environmental Management* 91 : 754–766.
(11) Ghiotti S (2019) Les lagunes et les territoires littoraux d'Occitanie entre inondation, pollution, biodiversité et métropolisation. *Sud-Ouest européen* 47 : 109–128.
(12) Leenhardt D, Woltz M, Barreteau O (coord.) (2020) *L'eau en milieu agricole. Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*. Éditions Quae, Paris, 283 pages.

Zones humides, services rendus et gestion de leur préservation

Jérôme Bignon *mandats politiques entre 1980 et 2020 : Maire, Conseiller général, Conseiller régional, député à trois reprises puis sénateur de la Somme de 2014 à 2020. Co-auteur de plusieurs rapports auprès du Premier ministre, rapporteur du projet de loi sur la reconquête de la biodiversité (2016), il a présidé et préside encore à ce jour de nombreuses structures, notamment dans le cadre de l'aménagement du littoral et des depuis 2020.*

Résumé *: Éléments fondateurs de la civilisation dont nous sommes issus, les « zones humides » ont été souvent méconnues, mal aimées et donc maîtrisées, voire supprimées purement et simplement pendant plus de 2000 ans : malédictions, répulsion, conduisirent les hommes à tendre à faire disparaître toute forme de vie sauvage non contrôlée. Ils ont failli réussir !*

Le terme de zones humides avait été créé dans les années 1960, à l'époque où l'on commençait tout juste à ne plus considérer les marécages comme des zones sans intérêt, à « assainir » et drainer à tout prix. La ville de Ramsar située en Iran sur les bords de la mer Caspienne est soudain devenue célèbre lorsqu'y fut signé le 2 février 1971 le premier traité international dans le domaine de l'environnement : la Convention de Ramsar sur les zones humides.

Des pionniers, comme Luc Hoffmann grand savant et citoyen suisse passionné, commencèrent à mettre en évidence des valeurs naturelles, culturelles, éducatives et scientifiques de ces paysages liés à l'eau, tels les lacs, rivières, fleuves, marais, forêts humides et tourbières. L'UNESCO devint dépositaire du traité de Ramsar aujourd'hui ratifié par 172 pays du monde. Initialement, l'intérêt portait sur les oiseaux migrateurs. Rapidement on considéra que la valeur des écosystèmes humides dépassait de loin ce seul sujet. On s'intéressa alors aussi aux autres pans de la biodiversité, aux valeurs sociales et culturelles de ces milieux, et par conséquent aux zones humides créées par l'homme.

Une étude du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) commandée par le secrétariat de la Convention de Ramsar a estimé que 87 % des ressources issues des zones humides ont été perdues à l'échelle mondiale depuis le début du 18e siècle. En France, un rapport du préfet Bernard, paru en 1994, estimait que dans notre pays, plus des deux tiers des zones humides avaient disparu depuis le début du 20e siècle, dont 50 % entre 1950 et 1990. Pendant la décennie 2000, près de 48 % continuaient de se dégrader. Cette situation s'est amplifiée : elle est assurément très sous-estimée. En effet, les « petites » zones humides sont passées et passent souvent au travers des mesures de préservation, de gestion, voire même de la simple connaissance de leur existence, que cela soit de modestes mares ou des zones de tourbière de montagne qui deviennent parfois des réservoirs pour canons à neige.

Aujourd'hui, le défi est de pleinement reconnaître et de valoriser les multiples services que rendent les zones humides, comme l'épuration des eaux, la stabilisation des rivages ou encore l'approvisionnement en eau. Le changement climatique exige de rappeler que les zones humides stockent un quart du carbone terrestre. Elles exercent des fonctions essentielles dans le cycle hydrologique de chaque bassin versant, d'amont en aval, des glaciers aux plaines alluviales, de la montagne aux lacs, mers et océans.

L'intelligence et la détermination de Luc Hoffmann ont facilité la prise de conscience de celles et ceux qui le regardaient, l'écoutaient ou le lisaient quand il appelait à le rejoindre. Il écrivait alors « les acquis de ces années représentent un formidable capital pour demain. Ils sont à la fois la promesse d'une expertise sans cesse renouvelée, ajustée à l'aune de nouveaux défis et l'encouragement à renforcer l'action collective et à susciter l'engagement de toujours plus d'hommes et de femmes pour que les zones humides demeurent ce lien vital, ce maillon essentiel pour la biodiversité et le bien-être humain ».

La France a adhéré à la Convention de Ramsar en 1986. 25 ans plus tard, soit à la création de Ramsar France, il y avait une trentaine de membres. Aujourd'hui, 52 territoires ont été reconnus d'importance internationale (dont 12 dans les outremers) et plusieurs nouveaux sites sont candidats et ont déposé des candidatures en cours d'examen.

De nombreux efforts sont à accomplir pour améliorer et compléter les connaissances. Il serait nécessaire de posséder un tableau exhaustif des contributions à la captation du carbone (tourbières, mangroves, vasières, prairies humides) mais aussi à la structuration du tourisme dans ces milieux « dits » humides.

LES SERVICES RENDUS PAR LES ZONES HUMIDES

Les services rendus sont nombreux, mais il faut restaurer les sites, petits et grands, et bien sûr les entretenir. Les photos des sites Ramsar présentées en Figure 1 illustrent la grande diversité et la complexité des zones humides et les services rendus par ces zones.

Contribution à la lutte contre le réchauffement climatique

Les zones humides comptent les écosystèmes les plus efficaces pour stocker le carbone. Les tourbières, les mangroves, les prairies humides, les marais littoraux, les herbiers marins, etc. absorbent et stockent de grandes quantités de carbone dans leurs sols. Mais lorsqu'ils sont dégradés ou asséchés, ils libèrent alors dans l'atmosphère le carbone accumulé parfois pendant des siècles. En outre, elles absorbent et stockent l'eau pendant les périodes pluvieuses, réduisent l'intensité des crues et inondations, des vagues, des ondes de tempête, des cyclones et des tsunamis et permettent de lutter contre les effets de sécheresses en maintenant de l'humidité dans les sols et en rafraichissant l'atmosphère. Les mangroves et les marais littoraux sont aussi des champions du stockage du carbone qui retiennent autant de carbone que les forêts, et bien plus longtemps (jusqu'à des millénaires contre quelques siècles maximums !). Les zones humides côtières agissent également comme des amortisseurs qui réduisent l'intensité des vagues, des ondes de tempête et des tsunamis. Ainsi, elles protègent les personnes et les biens présents le long des côtes. Tout en assurant par ailleurs un rôle majeur pour la biodiversité, car elles constituent des lieux de vie et des nurseries pour un nombre très important d'espèces.

Atténuation des effets du changement climatique sur le cycle de l'eau

Sans eau, pas de zones humides, et sans zones humides, pas d'eau ! Les zones humides fonctionnement comme des éponges filtrantes. Pendant les périodes pluvieuses, elles absorbent et stockent naturellement l'eau, partici-

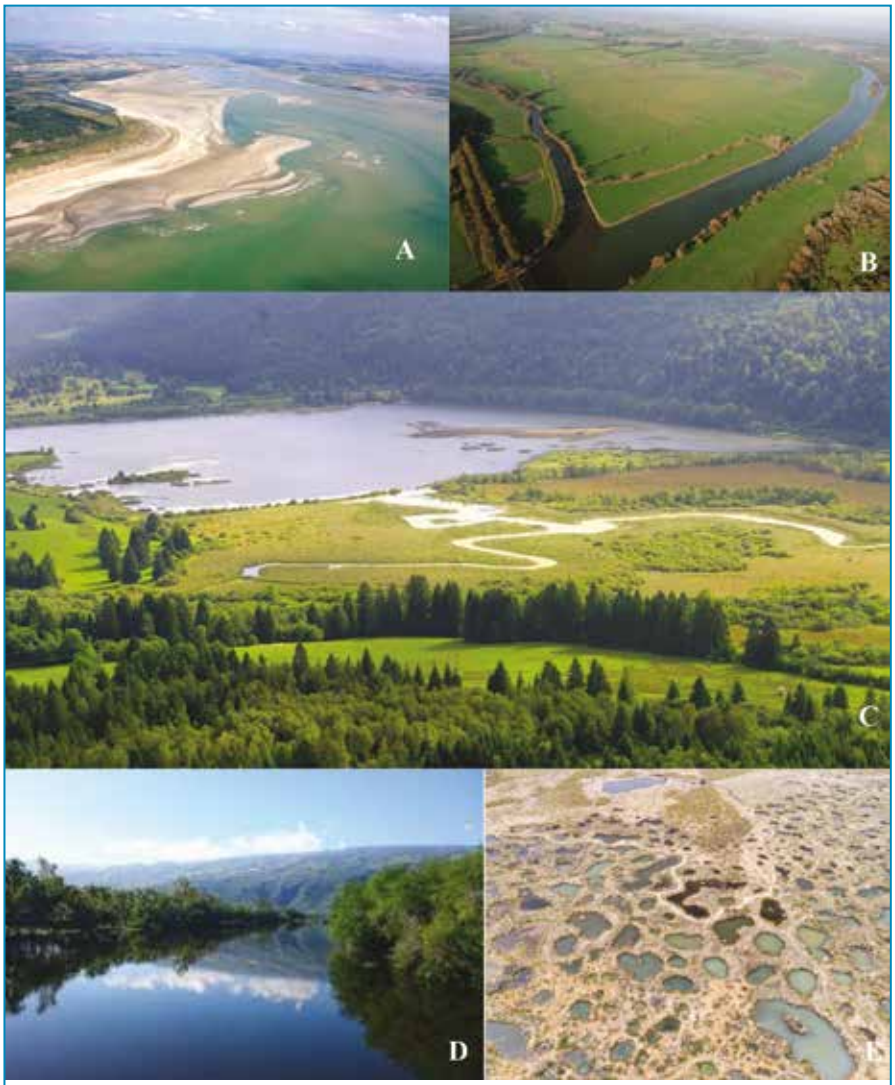


Fig. 1 : (A) Vue aérienne de la baie de Somme avec les grands bancs de z h #a l v y |#p l#z h l y# À k É# l#a h v u# #X R X L Q U #
Photo aérienne des prairies des basses vallées angevines avec une île qui m v y# t# # yu 0| v# É y## l# v | # |# y v l v u k # # # w u u 2 | 2
(C) Bassin du Drugeon : photo d'un cours d'eau qui débouche dans un lac # h #y# À v É y # p| œ y# r# h y i # u l h 2 u # v z # j s o# o v# | v
de l'Étang Saint Paul (La Réunion) avec en arrière-plan les montagnes y À É u p v# w É y # # z p h # u # , | # v É# G l 2 z # p À j u 2
, J# É# h À y p# l u # v À z # k # à p l u # # p s j v u # k l y h z j p# y p ù
humaines en zones humides. ©Roland Raimond.

pant ainsi à la réduction des inondations. Les milieux humides sont souvent des zones naturelles d'expansion des crues. Pendant l'inondation, la végétation piège les sédiments et freine la vitesse de l'eau, dispersant ainsi l'énergie du courant. Lorsque la pluie s'arrête, les zones humides libèrent l'eau qui s'est accumulée alimentant ainsi nappes phréatiques et cours d'eau, retardant alors les effets de sécheresse. L'absorption par les zones humides des eaux en hiver et lors des crues permet d'alimenter les nappes phréatiques et les cours d'eau. A ce titre, elles participent à l'alimentation en eau pour la consommation humaine et aux besoins des activités agricoles et industrielles. En 2019, plus de 67 % du territoire français a été concerné par des mesures de restrictions d'eau. La situation a empiré en 2022…

Approvisionnement en eau et filtration
L'eau est indispensable à la vie ! Elle est l'une des composantes essentielles des êtres vivants, autant que des écosystèmes et des sociétés humaines. Elle n'est pourtant pas inépuisable et les zones humides jouent un rôle de premier plan pour préserver cette ressource rare et précieuse. L'eau douce ne représente en effet que 3 % de toute l'eau de la planète, dont les 2/3 dans les glaciers et indisponibles pour les besoins de la consommation humaine. La consommation d'eau quotidienne de l'humanité augmente de 1 % chaque année et a été multipliée par 6 en 100 ans. L'eau ainsi prélevée est consacrée pour 70 % à l'agriculture et pour 22 % à l'industrie et l'énergie.

Les zones humides fonctionnent comme des éponges : elles absorbent et stockent naturellement l'eau pendant les périodes pluvieuses et la libèrent ensuite alimentant ainsi les nappes souterraines, et les cours d'eau qui sont les sources de presque toute notre eau potable. Cela permet aux zones humides de filtrer l'eau et de la débarrasser de nombreux polluants. Il est donc important de sauvegarder l'alimentation en eau des zones humides en protégeant les cours d'eau et en limitant les pollutions et ruissellements nocifs.

Réservoir de biodiversité
Les zones humides sont des espaces de transition entre la terre et l'eau. Cette situation crée des conditions propices au développement d'une grande diversité de formes de vie terrestres aquatiques, - plantes, oiseaux, mammifères, reptiles, amphibiens, poissons et invertébrés, dont les odonates - souvent spécialisées dans les milieux de transition et qui en dépendent pour survivre. Véritables réservoirs de biodiversité animale et végétale, les zones humides se caractérisent par une biodiversité qui leur est propre (roseaux, libellules, amphibiens), ainsi que l'accueil temporaire de nombreuses autres espèces (oiseaux et poissons migrateurs) à certaines étapes cruciales de leur vie.

Approvisionnement et productions alimentaires
Pâturages, riz, fruits, légumes, céréales, oléagineux, viande, poissons, huîtres, moules, coques, bois, roseaux, argile, osier joncs, tourbe… : les zones humides fournissent à l'humanité de nombreuses ressources notamment pour se nourrir et s'abriter. Elles comptent en effet parmi les milieux les plus productifs biologiquement et jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement de nos sociétés. En France, la valeur cumulée des biens prélevés dans les milieux humides est de l'ordre de 240 millions d'euros par an. Quarante pour cent des zones humides exploitées en agriculture sont des prairies humides. Elles sont pour la plupart utilisées pour la fauche ou en pâturage, bovin pour l'essentiel, mais aussi ovin (en particulier sur les prés salés) et équins. L'ordre de grandeur des services écosystémiques fournis par les prairies humides de France métropolitaine est évalué entre 1 100 et 4 600 euros par hectare et par an. Deux tiers des poissons consommés dans le monde dépendent des zones humides à au moins un stade de leur cycle de vie.

De beaux paysages, qui contribuent au bien-être quotidien
Les zones humides ont des effets démontrés sur le bien-être humain et la santé des citoyens. Elles constituent des espaces de quiétude et de calme, et des zones rafraichissantes lors des canicules. Par absorption de la chaleur dans l'eau et la terre humide, ainsi que par évaporation de l'eau contenue dans le sol, les plans d'eau et les plantes, la présence de zones humides permet une baisse de température entre 0,5 et 3° C en moyenne.

Tourisme, loisirs et activités économiques d'accueil
Les zones humides font partie des milieux naturels qui possèdent le plus fort potentiel de valorisation touristique. Le potentiel touristique et pédagogique de ces écosystèmes est directement lié à leur écologie qui compose une grande variété de paysages (prairie, forêt, bocage, dune…) peuplés de nombreuses espèces connues et appréciées du grand public (libellules, amphibiens, oiseaux, crabes…) qui sont autant de sources d'émerveillement, en général facilement observables.

LA PRÉSERVATION DES ZONES HUMIDES

La gestion de la préservation de ces milieux est complexe. Elle nécessite une stratégie de mobilisation du grand public, des associations, des collectivités locales et de leurs habitants. La Journée mondiale des zones humides (JMZH) est un élément mobilisateur, mais

aussi les « journées du patrimoine », les liens avec les différents acteurs nationaux, régionaux et départementaux, en direction du tourisme et diverses aménités : sport de nature, chasse pêche, randonnées, etc. sont extrêmement dépendants et demandeurs.

La JMZH constitue une manifestation majeure pour sensibiliser le grand public à la préservation de nos milieux humides et des services qu'ils apportent. Elle se déroule chaque année le 2 février, mais à l'initiative de Ramsar France, pour mobiliser davantage, il a été convenu que cette journée du 2 février pourrait se dérouler chaque jour du mois de février en fonction des possibilités locales. C'est ainsi qu'en France métropolitaine et ultramarine, on est passé progressivement à 800 évènements à l'occasion de la dernière journée mondiale : 50 partenaires sont mobilisés et relaient l'information au niveau national, et plus de 300 structures organisent des animations au niveau local. Le thème de l'édition 2023 a été « Il est urgent de restaurer les zones humides, il est nécessaire de passer à l'action ! », pour arrêter leur disparition et préserver cette biodiversité unique. Une journée de lancement sur un site a été organisée. Cette année 2023, c'est Hyères et ses Salins qui eurent cette responsabilité !

Pour s'assurer de la pérennité des services rendus par les zones humides, il est essentiel de gérer leur préservation.

Il a été dit que l'histoire des zones humides à la surface de la planète est une histoire de « disparition des zones humides ». Tout n'a pas disparu : les services rendus et la prise de conscience des hommes ont permis une prise de conscience : la conscience n'est pas suffisante. Il faut l'action. Préserver d'abord, restaurer ensuite et en générer de nouvelles.

Il serait faux de prétendre que rien n'est fait pour enrayer le déclin de la biodiversité mondiale. Au niveau international, la Convention sur la diversité biologique (CDB) a été adoptée lors du sommet de la Terre il y a 30 ans. Depuis, les 196 États membres de la CDB se réunissent tous les deux ans pour examiner les progrès accomplis et revoir les engagements de conservation de la biodiversité biologique. La COP 15 Biodiversité s'est réunie à Montréal en 2022 et les 195 États se sont engagés à protéger 30 % de la planète, restaurer 30 % des écosystèmes et doubler d'ici 2030 les ressources destinées à la protection de la nature.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Tuffnell F, Bignon J (2019) Terres d'eau, terres d'avenir. « *Faire de nos zones humides des territoires pionniers de la transition écologique* ». Rapport remis au Premier ministre et au ministre d'État, ministre de la Transition écologique et solidaire, 120 pages.

Les agences de l'eau en France : aspects économiques et financiers d'un modèle particulier de gestion

***Bernard Barraqué**, DR CNRS émérite, est ingénieur civil et urbaniste, et spécialiste des politiques de l'eau des pays européens : celles des ressources, celles des services publics, et celles visant l'articulation entre les deux. Il est rattaché au Centre international de recherches sur l'environnement et le développement, et continue de réfléchir à la gouvernance de la ressource en eau en tant que bien commun, et au type de financement correspondant souhaité, différent des factures et des impôts.*

***Résumé** : Alors qu'on répète que les agences de l'eau françaises ont été un modèle dans de nombreux pays et même pour la directive cadre sur l'eau de l'Union européenne, en France elles sont accusées d'avoir divergé à tort de l'application du principe pollueur-payeur (PPP). Or elles ont été créées entre 1964 et 1968 dans une autre logique (la DATAR[1] et la régionalisation), et avant la popularisation du PPP par l'OCDE. L'analyse de l'évolution des agences et de la crise actuelle qui en résulte conduit à proposer un changement en profitant de la reconnaissance de la gestion « en bien commun » dans notre pays. Cet article commence par distinguer deux conceptions de la gestion des ressources en eau : celle de la Ruhr (à l'origine de nos agences), et celle du PPP de l'économie néo-classique. Après avoir confronté les deux modèles, on montre que les forces politiques et la haute administration ont* nolens volens *maintenu les agences de l'eau entre les deux. Aujourd'hui elles sont essentiellement financées à partir des factures d'eau des usagers domestiques, et les deux tiers des aides qu'elles apportent vont vers les collectivités locales responsables des services publics d'eau et d'assainissement. Mais l'État a ponctionné leur budget au nom de l'austérité, et désormais le plafonne tout en réorientant leur action vers de nouveaux domaines comme les inondations ou la biodiversité, qui ont peu à voir avec les services publics d'eau. Alors, ne faut-il pas traduire l'approche des biens communs dans un mode de financement approprié ?*

LES MUTUELLES DE L'EAU DANS LA RUHR IL Y A CENT ANS

Des communautés volontaires locales de gestion de l'eau existent dans de nombreuses régions d'Europe, et notamment pour gérer des pénuries (irrigation méditerranéenne ou de montagne), ou des excédents (polders néerlandais, flamands et d'Allemagne du nord). Or, à la fin du XIXe siècle, l'explosion économique qui a suivi l'unification allemande a fait de la Ruhr une grande zone industrielle avec de graves problèmes de pollution, notamment du fait de la subsidence des sols résultant de l'activité minière. Les industriels du charbon et de l'acier se sont associés avec les villes, ainsi que d'autres industriels dépendant de la force motrice des rivières, pour stocker l'eau à potabiliser et évacuer/traiter les eaux usées. Ils ont obtenu du gouvernement de Berlin la transformation de leurs associations volontaires en des institutions à adhésion obligatoire : les contributions devenaient des redevances, permettant de financer les investissements collectifs en barrages-réservoirs et en stations d'épuration, tous réalisés par ces fameuses *Genossenschaften*, syndicats coopératifs de bassin. Il y en a 11 aujourd'hui, qui offrent une illustration pratique de ce que représente le principe de subsidiarité en Allemagne : nécessaires dans la *Ruhrgebiet*, elles ne se trouvent que là, et ailleurs la gestion de l'eau est restée municipale ou étatique. Elles sont dirigées par des comités d'usagers représentés es-qualités, donc selon un principe de démocratie participative : les élus des villes et les représentants des arrondissements ruraux côtoient des industriels de diverses branches, et aujourd'hui aussi des représentants des ONG d'environnement, de consommateurs etc. On a donc affaire à une gestion en bien commun, mais à une échelle supérieure à celle des institutions locales[2] étudiées par Elinor Ostrom, prix Nobel 2009 (1) ; d'ailleurs les usagers domestiques ne sont pas représentés directement, mais par leurs élus. Et c'est ce modèle qu'Ivan Chéret, alors chef du SPEPE (Secrétariat permanent pour l'étude des problèmes de l'eau) a proposé d'importer en France afin de créer des agences de bassin par une loi de 1964.

LA CONCEPTION NEO-CLASSIQUE DU PRINCIPE POLLUEUR-PAYEUR (PPP)

Le PPP a été popularisé dans les années 1970 par

l'OCDE, après le démarrage des agences de l'eau et surtout très longtemps après la création des syndicats coopératifs allemands. Et, alors que les observateurs de l'époque ont vite considéré l'expérience des agences françaises comme une illustration du PPP, elle ne l'était pas : en effet l'idée rapportée d'Allemagne était de financer la dépollution et la mobilisation de la ressource en eau de façon mutualisée entre les agents concernés ; pour les économistes de l'environnement, *a contrario*, le PPP consiste à réaliser une « internalisation des externalités » dans le modèle du « principal agent » : l'État fait payer à l'agent une taxe qui représente le coût social de l'externalité, et dont le montant doit s'élever jusqu'à conduire l'agent à réduire ses rejets polluants à un niveau acceptable pour la société. Dans cette conception, l'argent n'est pas rendu aux pollueurs qui font un effort, ni dirigé vers un fonds d'investissement public. D'ailleurs ces économistes considèrent que les subventions issues de ce fonds aboutissent logiquement à surinvestir dans des réductions de pollution en sortie d'usine, au lieu de pousser les pollueurs à réduire leur production ou à changer de procédé. Une synthèse en deux pages des critiques formulées par les économistes de l'environnement sur les agences, notamment lors de l'évaluation du dispositif des agences de l'eau par le Commissariat au Plan (CGP) (2) a été rédigée dans un récent ouvrage (3), et cet article y propose une réponse circonstanciée[3] d'autant plus nécessaire que les média sont allés plus loin que les économistes, allant jusqu'à dénoncer « la faillite des agences de l'eau » (4).

L'application du PPP dans le modèle principal-agent a été associée à l'économiste anglais Arthur C Pigou. Une « réponse » à AC Pigou a été attribuée à Ronald Coase, un autre économiste anglais : les pollueurs ou utilisateurs d'une même ressource n'ont pas besoin d'une intervention de l'État s'ils sont capables de s'asseoir autour d'une table et de comparer la valeur marginale de la ressource dans l'activité de chacun, puis, quelle que soit la règle initiale de répartition de cette ressource entre eux, de transférer des droits jusqu'à l'équilibrage des valeurs marginales. Établir la connaissance nécessaire à l'échange a un coût, qu'on appelle coût de transaction. R Coase reconnait que si les acteurs sont nombreux le calcul devient très difficile. Mais de toute façon, le fait de réunir les pollueurs entre eux constitue un pas essentiel vers la construction d'une confiance collective qui de fait réduit ce coût de transaction. D'où l'intérêt des institutions comme les comités de bassin, et de redevances que tous payent, mais qui peuvent être soit utilisées par l'institution de façon mutualisée, soit rendues en priorité à ceux pour lesquels les investissements apportent le meilleur rapport avantage/coût.

DEUX MODÈLES DE GESTION ÉCONOMIQUE ET POLITIQUE POUR DES AGENCES DE L'EAU

A l'opposition que nous avons présentée, il faut ajouter la dimension importante du droit fiscal. Beaucoup de pays en effet distinguent les redevances payées à un établissement public en contrepartie d'un service rendu, des taxes payées à un État qui les utilise arbitrairement dans son budget général. En France, cette distinction est d'autant plus importante que les impôts font l'objet d'un contrôle annuel du Parlement, selon l'article 34 de la Constitution (l'argent public est prélevé et dépensé sous le contrôle des élus de la Nation). Une redevance pour service rendu est seulement soumise à un contrôle des ministères de tutelle concernés ; elle est normalement gérée par un Établissement public à caractère industriel et commercial, de droit privé (EPIC), et elle peut être administrée par des institutions comprenant des représentants non élus. S'il n'y a pas service rendu, la redevance est un impôt, et doit être prélevée par un Établissement public à caractère administratif (EPA), dont le budget est présenté au Parlement avec la loi de finances tous les ans. Cette partition de la parafiscalité entre les redevances pour service rendu et les impositions de toute nature a été établie par le premier ministre Michel Debré au début de la Ve République, par l'ordonnance annexée à la loi de finances de 1959[4].

On peut synthétiser les analyses précédentes par une triple opposition entre deux conceptions idéal-typiques des agences de l'eau (Tableau 1). Dans ce tableau, la colonne de gauche correspond à une conception libérale de l'action publique d'incitation économique, avec une mise en tension de l'État et du marché ; elle peut être conduite soit par une institution de bassin soit plutôt directement par une institution administrative classique, notamment l'État, qui intervient pour corriger la défaillance du marché. La colonne de droite correspond plutôt aux anciennes communautés d'irrigants, aux Wateringues néerlandaises, et surtout aux syndicats coopératifs de la Ruhr, dans une tradition de gestion en bien commun remontant au Moyen-Âge, mais modernisée à des échelles plus régionales.

Ces deux conceptions avaient-elles été discutées à l'époque où I Chéret animait le SPEPE ? Il avait devant les yeux les Sociétés d'aménagement régional, créées par l'État pour réaliser de grands travaux hydrauliques et des ouvrages multifonctions (Canal de Provence, Bas-Rhône Languedoc, Coteaux de Gascogne), à une époque où on n'imaginait pas la gestion intégrée et participative. Et d'ailleurs, la DATAR, qui portait la régionalisation et les agences de l'eau, était encore très tournée vers

Tableau 1 : Triple opposition entre conceptions « étatique-libérale » et « communautaire-subsidiaire » des redevances (Source : Bernard Barraqué).

Dimension	Coalition libérale-étatique (marché + Etat)	Coalition de gouvernance communautaire et subsidiaire
Economie institutionelle	Pollueur payeur dans le modèle principal agent. Redevance = incitation du pollueur à réduire son externalité (AC Pigou)	Pollueur payeur avec arrangement de type « coaséen » ou « ostromien ». Redevance = financement mutualisé d'investissements
Droit fiscal	Redevance = impôt perçu par un EPA, allant dans le budget général ; elle n'est pas rendue aux pollueurs	Redevance = contrepartie d'un service rendu par un Epic ; budget affecté et géré de façon mutualisée
Politique publique	Démocratie représentative : argent public collecté et dépensé sous le contrôle des élus de la Nation	Démocratie participative : budget réuni et dépensé sous le contrôle d'un comité composé de représentants des usagers

l'aménagement du territoire et les grands travaux. Mais I Chéret avait aussi vécu l'opposition de sociétés locales sénégalaises à une hydraulique coloniale ne respectant pas les usagers dans leur mobilisation de l'eau, puis découvert les expériences de la Ruhr, portées *a contrario* par les acteurs des bassins versants concernés.

En définitive, I Chéret voulait des agences de bassin autonomes (financées par les usagers de l'eau) et qui construisent les ouvrages d'intérêt commun nécessaires : barrages multifonctions et stations d'épuration des eaux usées. Et donc ces agences devaient avoir la maîtrise d'ouvrage, comme les *Genossenschaften* de la Ruhr. Mais il fallait que le dispositif couvre l'ensemble du territoire, là où aux Pays-Bas et dans la Ruhr, les institutions de l'eau étaient bien davantage le fruit de volontés coopératives locales. Et de fait, la création des agences par la DATAR est essentiellement l'aboutissement de discussions au niveau national entre le gouvernement et les parlementaires d'une part, et au sein des corps d'ingénieurs de l'autre. Pourtant, au fil des années, la DATAR a évolué vers une conception plus contractuelle et moins aménagiste de l'action de l'État, ne serait-ce que pour remettre en cause la tradition de la 'régulation croisée' où les élus locaux négociaient l'allégeance à la modernisation de l'économie contre des subventions d'État, particulièrement dans le domaine des infrastructures (5). A cette époque, la réforme régionale a échoué, mais les agences ont pu se développer, non sans ambiguïté quant à leur rôle : d'un côté elles ouvraient la politique de l'eau à l'avis conforme des usagers, la rendant plus transparente ; mais de l'autre, l'État gardait la majorité dans les conseils d'administration, et donc le contrôle sur la distribution des aides des agences. Hostiles au début, les élus locaux ont accepté les agences une fois que les redevances qu'elles devaient payer ont été directement perçues sur les factures d'eau des usagers, les plaçant dans la logique du service rendu qui caractérisait déjà les tarifs de l'eau potable et les redevances d'assainissement. La fixation des budgets par programmes quinquennaux a permis de sécuriser des investissements coûteux et longs à mettre en œuvre.

A PARTIR DE 1982, L'ÉPÉE DE DAMOCLÈS

Arrivée au pouvoir en 1981, la Gauche connaissait peu les agences, ayant été longtemps dans l'opposition. Elle trouvait que les comités de bassin étaient dominés par des conservateurs (élus de petites villes, industriels …). Pour les rééquilibrer, le gouvernement Mauroy a voulu profiter du nouveau statut des conseils régionaux désormais élus au suffrage universel, pour qu'ils soient représentés dans les comités de bassin. De même pour les syndicats ouvriers. Mais comment leur ouvrir des sièges ? Il a demandé au Conseil constitutionnel si un décret suffisait ou s'il fallait une loi. Et la réponse, en juin 1982, a surpris tout le monde : il fallait une loi, et dans ces conditions la première chose à faire dans cette loi serait de requalifier les redevances en impositions, puisqu'à son avis il n'y avait pas service rendu ! En fait, le Conseil faisait un cadeau royal au ministère des Finances qui n'avait jamais accepté l'autonomie budgétaire des agences, et réclamait qu'on soumette leur budget à l'article 34 de la Constitution, donc au contrôle parlementaire annuel. Mais comprenant la bévue, le monde de l'eau décida de faire le gros dos, et de ne pas faire cette loi. Pire encore, en décembre 1982 fut créé un nouvel item de redevances, le coefficient de collecte, permettant

de faire payer des redevances plus élevées dans les villes ayant besoin de finir leurs réseaux d'égouts. Certes c'était devenu nécessaire puisque le ministère de l'Intérieur avait complètement tari ses subventions à l'assainissement collectif au cours du septennat précédent. Mais cela revenait à conforter la logique du service rendu pourtant invalidée par le Conseil constitutionnel.

A la fin des années 1980, l'acte unique européen de 1986 ayant donné la compétence en matière d'environnement à la Commission, celle-ci décida de renforcer la politique de l'eau par trois directives :

eaux résiduaires urbaines (DERU, 91/271/CE),
nitrates agricoles (91/676/CE),
et qualité écologique des cours d'eau[5].

Dans ce contexte, la France, alors dirigée par Michel Rocard avec Brice Lalonde comme ministre de l'Environnement, a relancé sa politique de l'eau avec d'une part la mise en place des SAGE et des SDAGE (Schémas directeurs – d'aménagement et de gestion des eaux), et d'autre part un doublement des redevances pour pouvoir appliquer la première des trois directives, la DERU[6]. De plus, par la loi de 1992, elle a redéfini l'eau, dans l'article 1, comme « patrimoine commun de la Nation » : expression qu'il faut traduire en clair par « bien commun », et dont l'État ne serait plus le maître, mais le gardien, veillant à une répartition raisonnable et équitable, avec dissociation du droit d'usage par rapport au droit de propriété (pour les eaux souterraines). Ainsi les SAGE sont élaborés par des commissions locales de l'eau où un quart des sièges sont attribués aux diverses catégories d'usagers concernés. Mais ce choix ne s'est pas appuyé sur une théorie des communs, car à ce moment Elinor Ostrom était inconnue en France (sauf pour quelques initiés). Son livre sur la gouvernance des communs n'a été publié qu'en 1990 et traduit en français qu'en 2010. Et d'ailleurs, la loi de 1992 a prudemment esquivé la question posée par le Conseil constitutionnel, et on n'y parle pas des agences. Le doublement de leurs budgets, s'est fait avec les redevances existantes.

LA LEMA OU LA FIN DE L'EAU PAYE L'EAU ?

Ceci a une importance, car en définitive, les conceptions de la gestion de l'eau en France restaient fondamentalement inscrites dans l'antagonisme réglé entre État et marché. Une preuve manifeste en a été apportée lors du retour inattendu de la Gauche en 1997 avec Lionel Jospin : paradoxalement, sa ministre de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, qui en tant qu'écologiste aurait dû soutenir les approches communautaires et subsidiaires de l'eau, fut invitée à mettre en œuvre une taxe générale sur les activités polluantes (TGAP), et à y inclure les redevances des agences ! Cela voulait dire que les redevances rentreraient dans le budget général au ministère des Finances, lequel en rendrait ce qu'il voudrait bien.

C'est dans ce contexte que divers rapports d'évaluation de la politique de l'eau, dont celui du CGP, ont été transmis à une presse complaisante vis à vis du discours à la mode chez certains économistes, élus et associations de consommateurs, dénonçant l'inefficacité des agences, ainsi qu'une dérive du principe pollueur-payeur vers un « principe pollueur-sociétaire », comme si le modèle initial de la Ruhr n'était pas justement un modèle mutualiste. Le plus incroyable est que ceci se produisait sous un gouvernement de gauche, ce qui a conduit le syndicat national de l'environnement à s'opposer ouvertement à la ministre de l'Environnement (6, 7) !

La multiplication des mises en garde a permis de sauver les redevances d'une annexion dans la TGAP, mais elle n'a pas pu éviter la diffusion de l'idée que les redevances des agences étaient des impôts et devaient être votées par le parlement. Et malheureusement, la Commission européenne en a déduit que les aides des agences étaient des aides d'État, soumises aux contraintes de plafonnement au nom de l'égalité des acteurs économiques des pays membres devant la concurrence. Une petite enquête chez les pays voisins aboutit à constater que la France fait exception : en Angleterre et au Danemark, les redevances servent à financer la police des installations industrielles, et elles ne sont pas rendues aux entreprises ; dans la Ruhr les redevances payées ne sont pas rendues non plus aux industriels ni aux villes, car ce sont les *Genossenschaften* qui font les investissements à leur place ; et en plus selon leur version du principe de subsidiarité, elles ne sont pas des établissements de l'État, ni même du Land, mais de leurs usagers … Et c'est en fait aussi le cas en France, sauf que nos parlementaires et notre administration prétendent ne pas pouvoir l'accepter, et donc les aides des agences sont devenues des aides d'État.

On en vient logiquement au contenu de la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA), qui en fait était préparée sous le gouvernement de gauche plurielle, mais n'avait pas pu être votée avant sa défaite de 2002. Après avoir fait ou entendu des discours, à plusieurs reprises[7], sur la nécessité de protéger le budget des agences d'une intégration dans le budget de l'État *via* le vote annuel du parlement dans la loi de finances, notamment en mobilisant la charte de l'environnement[8], les élus de la Nation se sont finalement rendus à l'avis du Conseil

constitutionnel de 1982, décidant de voter les redevances chaque année. Cela a permis de remplacer les redevances pollution et prélèvement-consommation, par un ensemble plus complexe de 8 redevances, ce qui a priori ne va guère dans le sens de la réduction de l'opacité qu'on reprochait au précédent système. Les députés se sont certes engagés à ne pas toucher le budget quinquennal du programme en cours, mais le gouvernement élu en 2012 n'était nullement tenu par ces promesses, et ce qui devait arriver arriva : le ministère des Finances a décidé de prélever 10 % des redevances au nom de la maîtrise des dépenses de l'État. Et dès 2018, le fonctionnement de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), transformé en Agence française de la biodiversité (AFB) par la loi du même nom, est assuré par un prélèvement sur le budget des agences, qui en plus doivent financer les personnels des parcs nationaux et de l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS). La ponction a atteint 23 % au niveau national. En 2019, la loi de finances supprime la ponction de Bercy de 200 M€ mais maintient les prélèvements pour l'AFB, l'ONCFS et les parcs à 280 M€. En revanche la loi crée un plafond de recettes pour les 6 agences ensemble, en baisse de 10% environ. Ce plafond est appelé poétiquement « plafond mordant » car si une agence dépasse son quota dans ce plafond, l'excédent est capturé par le budget général.

Quant à la prévention des inondations, là encore, après des décennies d'affirmation que les agences ne pouvaient pas la financer puisqu'elles n'avaient pas de redevance correspondante, on pourrait bien leur demander de soutenir financièrement la mise en œuvre de la Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (GEMAPI), le fonds Barnier étant tout à fait insuffisant pour couvrir les besoins des Programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI). Mais dans les factures d'eau, les usagers domestiques ne sont pas censés acheter la pluie…

UNE INCOHÉRENCE CORRIGIBLE ?

En conclusion, il faut revenir à la question qui se posait dans les années 1960 : les redevances des agences sont-elles la contrepartie d'un service rendu ? C'est le choix qui avait été fait au départ, en épousant la logique économique qui gouverne les services publics à caractère industriel et commercial, et bien que les agences aient été créées comme des EPA[9]. En Allemagne, les redevances pollution (*Abwasserabgaben*), sont payées par les villes aux Länder, parce que ce sont elles qui rejettent la pollution dans les rivières. D'après RA Kraemer, dans le cas des *Genossenschaften* de la Ruhr, qui ressemblent à nos EPTB (Établissements publics territoriaux de bassin) par la taille et par le fait qu'elles ont la maîtrise d'ouvrage, ce sont les collectivités locales qui payent leur contribution à la gestion mutualisée des investissements, ensuite de quoi elles répercutent ce qu'elles ont payé sur leurs habitants : dans les factures d'eau s'il s'agit d'améliorer la performance environnementale des services d'eau et d'assainissement ; ou dans les taxes d'habitation et foncières s'il s'agit de travaux d'amélioration directe du milieu aquatique.

Pour sortir de l'imbroglio actuel, on pourrait repartir de l'avis du Conseil d'État de 1967 créant une catégorie à part pour la parafiscalité de l'eau (et potentiellement pour toutes les ressources naturelles renouvelables)[10] et lui donner un nouveau sens : c'est la catégorie de gestion des biens communs, légitimée par divers travaux d'économie institutionnelle, et qui appelle la création d'institutions appropriées, comme justement, les comités de bassin, ainsi que les commissions locales de l'eau, les comités de contrats de rivière etc.

On pourrait alors simplement remettre en cause la partition de la parafiscalité de Michel Debré en 1959 : pourquoi n'y a-t-il que deux catégories, le service rendu qui renvoie à l'économie de marché, et l'impôt qui est l'apanage du ministère des Finances et du Parlement ? La solution serait évidemment de modifier enfin l'article 34 de la Constitution, laissant, par exception au régime général, la fixation de la parafiscalité des ressources naturelles à des instances dites communautaires et subsidiaires, par exemple les comités de bassin etc., et en conservant bien sûr la tutelle de l'État démocratique qui est le nôtre. Les redevances des services publics d'eau et d'assainissement seraient payés non pas directement par les usagers domestiques, mais par les collectivités responsables. Et ces dernières devraient répercuter ces sommes soit sur les consommateurs d'eau, soit sur les citoyens par la taxe GEMAPI. La réflexion conduit à poser la question de la suppression progressive de la taxe d'habitation, puisque cela revient à supprimer une des assiettes importantes de la GEMAPI…

On dira qu'on ne va pas modifier l'article 34 de la Constitution seulement pour une histoire de parafiscalité. Répondons sereinement que si la nouvelle mode est, à droite comme à gauche, de tenir le discours de l'eau comme bien commun, il faut aussi accepter que son application nécessite un dispositif institutionnel approprié. On pourrait aussi passer par le renforcement du rôle des EPTB, grâce à la redéfinition de leurs milieux aquatiques comme autant d'infrastructures naturelles ; ce qui conduirait le Conseil d'État à autoriser la perception de

redevances pour service rendu mutualisées auprès des usagers de ce milieu aquatique qui leur rend service…

NB. Je tiens à rendre ici hommage à PF Ténière-Buchot qui m'a sollicité pour écrire cet article et qui n'en a pas vu le résultat. Il m'a tellement appris sur les jeux de pouvoir dans le domaine de l'eau…

RÉFÉRENCES

(1) Ostrom E (1991) *Governing the Commons, The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press, 298 pages.
(2) CGP (Commissariat Général au Plan) (1997) *Évaluation du dispositif des Agences de l'eau* - Rapport au gouvernement. La Documentation Française, Paris, 215 pages.
(3) Godard O (2016) *Environnement et Développement Durable, une approche méta économique*. De Boeck, Louvain la Neuve, 494 pages (voir page 293 et suivantes).
(4) Orange M (1997) Les Agences de l'eau sous le feu des critiques, in *Le Monde*, 14 Novembre.
(5) Grémion P (1976) *Le Pouvoir périphérique, bureaucrates et notables dans le système politique français*. Seuil, 480 pages.
(6) Laigneau P (2014) *Tristes Eaux Françaises, Tome I – Regarder l'histoire des agences et comités de bassin en France depuis les tropiques*. Thèse en co-tutelle Université fédérale du Rio Grande do Sul et Agroparistech
(7) Laigneau P (2014) *Le syndicat national de l'environnement, Tome 2 1987-2003. Les personnels s'engagent pour construire un véritable service public de l'environnement*. Éditeur Syndicat National de L'environnement, 205 pages.

NOTES

(1) Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale.
(2) Les territoires de ces 11 agences de l'eau correspondent assez bien à la taille de ceux de nos EPTB.
(3) Olivier Godard s'appuie sur le rapport du CGP : « Ainsi, au vu des procédures d'attribution des aides et des méthodes de détermination des redevances et du prix de l'eau, il ressort que les agences de l'eau n'ont pas été organisées de façon à minimiser les coûts des services rendus, ni à atteindre des objectifs de qualité environnementale déterminés (CGP, 1997). Au fil des années, la logique de financement mutualiste a fortement éloigné ce dispositif de l'efficacité économique que certains de ses concepteurs avaient en tête dans les années 1960. L'affirmation d'efficacité de cette organisation a besoin de s'étayer sur d'autres références. » Dont acte.
(4) Ordonnance n°59-2 du 2 janvier 1959 portant loi organique relative aux lois de finances.
(5) La troisième n'est jamais sortie suite aux désaccords entre États-membres, et sa remise à plat a fini par aboutir à la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/UE).
(6) De fait le prix moyen de l'eau en France a doublé entre 1990 et 2004, par augmentation de la part assainissement-épuration des eaux usées.
(7) En particulier, voir le discours très clair du rapporteur B Sido au Sénat en 2005 : http://www.senat.fr/seances/s200504/s20050405/s20050405001.html#section26
(8) Adoptée en 2004, et insérée dans la Constitution lors de la modification de 2005.
(9) Avec pour conséquence d'ailleurs que les dépenses des agences sont contrôlées *a priori* par un contrôleur financier, alors que pour les Epic, le contrôle est *a posteriori*.
(10) Lors d'une présentation du rapport du Conseil d'État, L'eau et son droit, au Cercle français de l'eau, on a demandé au rapporteur Tiberghien pourquoi n'avoir pas réaffirmé cet ancien avis. Il a répondu que sa juridiction devait se plier aux décisions du Conseil constitutionnel. Mais alors, pourquoi ne pas modifier la Constitution. Comme dit le sage chinois, si tu n'aimes pas qu'un bâton te tape sur la tête, déplace le bâton…

Réutilisation des eaux usées : de nouvelles ressources en eau

***Marie-Noëlle Pons**, directrice de recherche émérite au CNRS, est spécialiste en traitement des eaux résiduaires urbaines et industrielles, en lien avec la santé des écosystèmes aquatiques. Ingénieur des industries chimiques (ENSIC, 1977), elle a réalisé une thèse d'État au laboratoire des Sciences du génie chimique en 1984. Depuis cette date ses travaux sont orientés vers des problématiques de métrologie pour l'environnement, de modélisation et de contrôle de systèmes biologiques et environnementaux, notamment pour le traitement intensif et extensif des eaux résiduaires, ainsi que d'analyse de cycle de vie appliquée aux procédés.*

***Résumé :** L'eau est indispensable à la vie. Cependant, la quasi-totalité de l'eau présente sur Terre est salée et impropre à la consommation. Les 2,5 % d'eau douce disponible sont en grand danger face à la pollution, à la surconsommation des ressources et au stress hydrique grandissant sous l'effet du changement climatique. L'option de réutiliser des eaux usées après traitement est donc séduisante. Cet article fait le point sur les difficultés rencontrées, notamment liées à la nature de la pollution affectant les eaux usées brutes d'origine urbaine. La présence de pathogènes et de micropolluants doit être plus particulièrement prise en compte et conduit à émettre des règlementations plus ou moins drastiques pour permettre la réutilisation des eaux usées urbaines après un traitement adéquat.*

Face à la diminution globale de la pluviométrie liée au changement climatique et au stress hydrique que cela implique même en Europe, la réutilisation des eaux usées d'origine urbaine devient un sujet qui interpelle le citoyen … et le chercheur, comme le souligne l'UNESCO dans son rapport *Les eaux usées : une ressource inexploitée* en 2017. Pourquoi rejeter ces eaux, une fois traitées, dans le milieu naturel et ne pas les ré-employer ?

L'agriculture utilise 70 % des ressources en eau, principalement pour l'irrigation, loin devant l'industrie (20 %) et les usages domestiques (10 %). L'irrigation par des eaux usées traitées (EUT) a été initiée depuis longtemps dans les pays soumis à un stress hydrique important. C'est, par exemple, le cas en Jordanie depuis le début des années 1980. Une soixantaine de pays réutilisent actuellement des EUT, les états les plus avancés dans le domaine étant notamment l'Australie, Singapour, Israël, des états du sud des USA ainsi que du Golfe Persique. En Europe, ce sont surtout les pays du Sud qui sont concernés : les applications visées sont principalement l'irrigation des cultures et espaces verts (Italie, Espagne, Chypre) et la production d'eau industrielle (1). Mais la recharge d'aquifère pour la production indirecte d'eau potable est appliquée en Belgique. D'autres applications sont possibles comme pour la lutte contre les incendies ou le lavage de la voierie. Peu de pays vont jusqu'à une production d'eau potable : Singapour mélange de la NEWater (eaux usées recyclées hautement traitées) à de l'eau naturelle avant de l'envoyer dans le réseau de distribution. En République tchèque, une bière (Erko) est brassée avec de l'EUT ; elle n'est pas la seule apparemment (par exemple, Newbrew à Singapour). La station de traitement des eaux usées (STEU) de Winhoek en Namibie est la seule à produire de l'eau potable à grande échelle (21 000 m^3 par jour), couvrant 35 % des besoins de la ville et de ses banlieues. La France n'est pas particulièrement en avance dans le domaine, mais face aux crises en approvisionnement des dernières années, la situation pourrait changer.

QUE CONTIENNENT LES EAUX USÉES BRUTES ?

Il faut tout d'abord se dire que les EUTs, même si elles respectent les normes de traitement en vigueur, ne sont absolument pas potables en sortie d'une station d'épuration conventionnelle. Que contiennent au départ les eaux usées ? Cela dépend de leur origine, urbaines ou industrielles. En milieu urbain, les eaux usées brutes (EUB) sont en grande partie issues des habitations. Elles proviennent des toilettes, des éviers, des lavabos et des douches, contiennent de la macropollution (à base de carbone, azote, principalement sous forme ammoniacal, et phosphore) (Tableau 1), de nombreux micropolluants (produits d'entretien, résidus de médicaments, cosmétiques, etc.), des éléments métalliques (cuivre, zinc, et.) et des pathogènes (virus, bactéries, notamment

fécales, protozoaires). La pollution issue des établissements communautaires (établissements de santé, établissements scolaires, etc.) est semblable à celle issue des habitations. Les eaux usées issues d'établissements commerciaux et industriels peuvent contenir des polluants plus particuliers, comme des détergents, des solvants, etc. À ces eaux usées urbaines s'ajoutent souvent des eaux pluviales, dues au ruissellement des précipitations sur des surfaces imperméabilisées (toits, trottoirs, chaussées) : elles vont transporter des micropolluants (résidus de combustion par exemple), des éléments métalliques (cuivre, zinc, etc.) et des pathogènes.

Tableau 1 : Composition moyenne des eaux usées urbaines brutes en termes de macropollution.

Paramètre	Gamme
Matières en suspension (MES)	100 à 400 mg/L
Demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO_5)	250 à 500 mg O_2/L
Demande chimique en oxygène (DCO)	300 à 1000 mg O_2/L
Azote global (NGL)	30 à 100 mg N/L
Phosphore total (PT)	5 à 15 mg P/L

DES EAUX USÉES BRUTES AUX EAUX USÉES TRAITÉES

En station d'épuration, le traitement de base des eaux usées est constitué d'étapes physiques, pour séparer la pollution particulaire (matières en suspension) de la phase dissoute (traitement primaire), et biologiques, pour traiter la macropollution (traitement secondaire). Un traitement dit tertiaire peut compléter la filière : élimination du phosphore (par précipitation), filtration sur sable (pour éliminer des particules en suspension), désinfection (par ajout d'ozone ou de chlore ou irradiation aux UV). Le devenir de la micropollution au cours de ces opérations ne suit pas de règles absolues : en fonction des propriétés physico-chimiques des molécules, les micropolluants vont se retrouver soit dans la phase dissoute, rejetée dans le milieu aquatique, soit liée à la pollution particulaire retenue.

Station d'épuration d'Achères. Source : ToucanWings, Creative Commons BY-SA 3.0

UNE RÉUTILISATION INDIRECTE EST POSSIBLE

Les normes de rejet concernent la macropollution et leur respect permet de les rejeter dans le milieu naturel (rivière, lac, milieu marin) avec quelques contraintes supplémentaires en cas de proximité d'un lieu de baignade ou de conchyliculture (Tableau 2). Ce simple rejet constitue déjà un mode de réutilisation indirecte. Si les eaux souterraines constituent la source de choix pour la production d'eau potable, certaines agglomérations n'ont pas d'autres solutions que d'utiliser de l'eau de surface, dans laquelle des communautés situées en amont ont pu déverser leurs rejets. Des opérations de potabilisation plus drastiques que pour des eaux souterraines seront alors appliquées pour pouvoir obtenir une eau consommable.

QUID DES MICROPOLLANTS ?

Ces normes ne font pas mention de la présence de micropolluants ni de pathogènes. En France une action de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans les eaux (RSDE) a été mise en place à partir de 2002 par le ministère en charge de l'Environnement. D'abord orientée vers les installations classées, cette action a ensuite été déclinée vers les eaux usées traitées (en 2015) et brutes (en 2016) des stations d'épuration. D'après la synthèse réalisée en 2021 par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), les micropolluants les plus rencontrés dans les EUBs sont, outre des métaux (zinc, cuivre, mercure, plomb), le DEHP[1] (agent plastifiant), la cyperméthrine (substance active d'insecticides), des alkylphénols (nonylphénols et octylphénols) et des HAP[2] (issus de la combustion incomplète de matières organiques), la plupart étant des perturbateurs endocriniens avérés. Dans les EUTs, on retrouve du cuivre, du zinc et du DEHP, mais aussi du chrome, de l'imidaclopride (pesticide), du diuron (herbicide) et du PFOS[3].

Tableau 2 : Normes de rejet dans l'environnement des eaux usées traitées (Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO_5).

	Paramètre* ** Voir Tableau 1 pour explication*	Concentration maximale à respecter	Charge brute de pollution organique (DBO_5) reçue en kg par jour	Rendement minimum
Toute zone	DBO_5	35 mg O_2/L 25 mg O_2/L	< 120 ≥ 120	60 % 80 %
	DCO	200 mg O_2/L 125 mg O_2/L	< 120 ≥ 120	60 % 75 %
	MES	35 mg/L	< 120 ≥ 120	50 % 90 %
Zone sensible à l'azote	NGL	15 mg N/L 10 mg N/L	600 à 6 000 > 6 000	70 %
Zone sensible au phosphore	PT	2 mg P/L 1 mg P/L	600 à 6 000 > 6 000	80 %

Les résidus médicamenteux ne sont pas concernés par cette surveillance de substances dangereuses. Or de nombreuses études montrent leur présence, non seulement dans les EUBs mais aussi dans les EUTs. Dans l'étude publiée en 2018 sur la présence de résidus médicamenteux en sortie des STEUs de l'agglomération parisienne (2), 41 substances ont été recherchées, 34 ont été trouvées, dont 16 avec une occurrence de 100 % et 22 avec une occurrence de plus de 75 % , cela avec des concentrations de l'ordre de 100 à 1 000 ng/L. On y trouve différentes familles de substances d'usage courant (c'est-à-dire non associées particulièrement à un usage en milieu hospitalier) comme des bêtabloquants (sotalol), des analgésiques (diclofénac, tramadol), des antibiotiques (ofloxacine, sulfaméthoxazole, érythromycine), des hypolimiants (acide fénofibrique), des antidépresseurs (oxazépam) et des anti-épileptiques (carbamazépine et ses deux métabolites).

L'Europe commence à se préoccuper de ces résidus et a développé une liste de 19 substances soumises à surveillance à l'échelle de l'Union, établie conformément à l'article 8 ter de la directive 2008/105/CE : on y trouve des antibiotiques (amoxicilline, sulfaméthoxazole et triméthoprime), un ectoparasiticide (métaflumizone), dix composés azolés (tels que le clotrimazole, un antimycosique), des fongicides (famoxadone et dimoxystrobine) et un antidépresseur (venlafaxine). Conçues pour traiter la macropollution, les STEUs conventionnelles ont des performances d'élimination de la micropollution très variées suivant leur conception et suivant la nature des molécules (3). Les principaux phénomènes conduisant à leur disparition partielle dans les STEUs sont l'adsorption sur de la matière organique particulaire (y compris les bactéries) et colloïdales, la volatilisation, la biodégradation et la photodégradation. Mais pour certaines substances, la STEU n'est pas une barrière. Cette problématique est illustrée notamment par la présence de micropolluants tels que le gadolinium (Gd). Cette terre rare est utilisée en imagerie par résonance magnétique (IRM) pour améliorer le contraste des images. Sa formulation permet une limitation de la toxicité de sa forme ionique. Le Gd est éliminé du corps humain par les urines directement au niveau des hôpitaux mais aussi dans les eaux domestiques puisque l'élimination peut durer un mois. Le Gd complexé n'est pas retenu dans les stations d'épuration à l'inverse de métaux tels que le cuivre et le zinc. En effet ceux-ci sont le plus souvent adsorbés sur des particules et donc retenus lors des premières étapes du traitement des eaux résiduaires urbaines. Quant à elle, la concentration en Gd dans les eaux de surface s'accroit entre l'amont et l'aval des cours d'eau (4) et on le retrouve le gadolinium dans les eaux à potabiliser, voire dans l'eau potable (5).

COMMENT RÉUTILISER DIRECTEMENT DES EAUX USÉES TRAITÉES ?

Pour pouvoir réutiliser des eaux usées traitées, il faut définir leur emploi qui peut être de l'irrigation (agriculture, espaces verts), du lavage (trottoirs, chaussées,

véhicules, toilettes), de l'eau pour incendie, de la recharge d'aquifère ou de la production d'eau potable. La principale crainte concernant la réutilisation des EUTs est liée à la présence des pathogènes. Les normes de réutilisation sont souvent basées sur la présence de coliformes. Ce sont des bactéries fermentant le lactose avec production de gaz à 35-37 °C en 48 h. Les coliformes thermotolérants (dits fécaux) en font partie, mais sont capables de fermenter le lactose à 44 °C. L'espèce la plus fréquemment associée aux coliformes fécaux est *Escherichia coli*. Cependant de nombreux pathogènes peuvent être trouvés dans les EUBs (Tableau 3). Lors de la récente épidémie de SARS-CoV-2, la détection de sa présence dans les eaux usées a contribué à la surveillance de sa circulation. Les STEUs conventionnelles ne permettent pas d'éliminer tous les pathogènes et des traitements adaptés doivent être mis en œuvre (6). Les normes de réutilisation des EUTs sont d'ailleurs basées en grande partie sur la présence de pathogènes (Tableaux 4 et 5). Cependant elles ne sont pas très drastiques dans certains pays (7). Des performances techniques concernant les méthodes d'irrigation peuvent par ailleurs être préconisées comme, en France, pour limiter la dispersion d'aérosols contenant des pathogènes (Instruction interministérielle DGS/EA4/DEB/DGPE/2016/135 du 26 avril 2016).

Les stations d'épuration conventionnelles ayant des performances très diverses vis-à-vis des micropolluants tels que les résidus de médicaments, ceux-ci se retrouvent dans les sols irrigués et parfois même dans les plantes. En Israël, où 85 % des EUTs sont réutilisées pour l'irrigation (représentant 50 % des eaux utilisées par les agriculteurs pour l'irrigation) une vaste étude (8) a été organisée pour quantifier les résidus pharmaceutiques

Tableau 3 : Quelques exemples de microorganismes pathogènes présents dans les EUBs (Australian guidelines for water recycling : managing health and environmental risks, 2006).

Type de pathogènes	Exemples	Maladies associées
Bactéries	*Salmonella*	Gastroentérite
	Campylobacter	Gastroentérite, syndrome de Guillain-Barré
	Escherichia coli pathogène	Gastroentérite, syndrome hémolytique et urémique
	Shigella	Dysenterie
	Yersinia	Gastroentérite, septicémie
	Vibrio cholerae	Choléra
	Legionella spp.	Maladies respiratoires
Viruses	Enterovirus, adenovirus, rotavirus, norovirus, hépatite-A	Gastroentérite
Protozoaires	*Cryptosporidium, Giardia*	Gastroentérite
	Naegleria fowleri	Méningoencéphalite amibienne primitive
	Entamoeba histolytica	Amibiase
Helminthes	*Taenia*	Téniasis
	Ascaris	Ascaridiose

Tableau 4 : Normes européennes (Règlement (UE) 2020/741 du Parlement Européen et du Conseil du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau).
**NUT : Unité de turbidité par néphélométrie*

Classe minimale de qualité de l'eau de récupération	Catégorie de cultures	*Escherichia coli* (nombre/100 mL)	DBO_5 (mg/L)	MES (mg/L)	Turbidité (NUT)*
A	Toutes les cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est en contact direct avec l'eau de récupération et les plantes sarclées consommées crues.	≤10	≤10	≤5	≤5
B	Cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est cultivée en surface et n'est pas en contact direct avec l'eau de récupération, cultures vivrières transformées et cultures non vivrières, y compris cultures servant à l'alimentation des animaux producteurs de lait ou de viande.	≤100	Conformément à la directive 91/271/CEE (Annexe I, tableau 1)	Conformément à la directive 91/271/CEE (Annexe I, tableau 1)	
C	Cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est cultivée en surface et n'est pas en contact direct avec l'eau de récupération, cultures vivrières transformées et cultures non vivrières, y compris cultures servant à l'alimentation des animaux producteurs de lait ou de viande.	≤1 000			
D	Cultures industrielles, cultures énergétiques et cultures semencières.	≤10 000			

dans les EUTs ainsi que dans des cultures vivrières : plus de 400 échantillons de légumes et de fruits ont été analysés et tous contenaient, à des degrés divers des résidus pharmaceutiques. Les antiépileptiques comme la carbamazépine et la gabapentine constituaient le groupe thérapeutique le plus dominant trouvé dans le continuum eaux usées récupérées-sol-plante. La réinjection dans la nappe phréatique via le sol avant utilisation a permis d'avoir une moindre contamination des cultures.

DOIT-ON VRAIMENT TRAITER LES EAUX USÉES ?

Nous avons vu les dangers associés aux eaux usées brutes. On peut cependant se poser la question de leur utilisation sans traitement pour l'irrigation, notamment parce qu'elles contiennent de l'azote et du phosphore, source de nutriments pour la végétation. L'épandage de ces eaux brutes a en fait constitué le premier traitement au XIXe siècle. Les exemples en France sont les champs d'épandage d'Achères (1895-2000) et d'autres communes de la région parisienne en aval de Paris ainsi qu'à Reims. Le risque associé aux métaux lourds (plomb, cadmium, etc.) a progressivement limité la culture maraîchère sur les zones concernées, jusqu'à l'interdiction des épandages. Cependant cette pratique qui n'est donc pas sans danger est appliquée dans de nombreux contextes, notamment dans les pays du Sud (Afrique sub-saharienne, Amérique Latine, Asie du Sud) (9).

Tableau 5 : Normes de réutilisation des eaux usées traitées aux Etats-Unis (EPA/600/R-12/618).

Utilisation en milieu urbain	Qualité* (* *Voir Tableau 1 pour explication*)
Pas de limitation d'accès	≤ 10 mg/L DBO_5 ≤ 2 NTU Pas de coliformes fécaux détectés /100 mL 1 mg/L Cl_2 résiduel au moins
Avec limitation d'accès	≤ 30 mg/L DBO_5 ≤ 30 mg/L MES ≤ 200 coliformes fécaux/100 mL 1 mg/L Cl_2 résiduel au moins
Utilisation en agriculture	
Cultures vivrières consommées crues	≤ 10 mg/L DBO_5 ≤ 2 NTU Pas de coliformes fécaux détectés /100 mL 1 mg/L Cl_2 résiduel au moins
Cultures vivrières transformées / cultures non vivrières	≤ 30 mg/L DBO_5 ≤ 30 mg/L MES ≤ 200 coliformes fécaux/100 mL 1 mg/L Cl_2 résiduel au moins

Une réutilisation sélective des eaux usées au niveau des bâtiments a aussi été proposée, éventuellement en parallèle d'une utilisation des eaux pluviales. Le projet européen Aquasave (1997-2001, LIFE97 ENV/IT/000106) a permis de tester la faisabilité d'une telle approche dans des immeubles d'habitation à Bologne (Italie). Les eaux grises provenant du lavage personnel (douches, bains, lavabos), soit 33 % de la consommation totale des ménages, ont pu être ré-utilisées pour satisfaire jusqu'à 23 % des chasses d'eau. L'eau de pluie a pu permettre aux ménages d'économiser jusqu'à 8 % d'eau et couvrir jusqu'à 66 % de la consommation totale des machines à laver (linge et lave-vaisselle). Cependant cela n'a pu être rendu possible que grâce à un système d'utilisation des eaux grises, qui les collecte, les traite (par filtration et désinfection) et les envoie ensuite vers les chasses d'eau des toilettes et un système d'utilisation des eaux de pluie, qui les collecte, les traite (par filtration et désinfection) et les envoie vers les appareils électro-ménagers.

QUEL DÉVELOPPEMENT POUR LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES ?

Compte tenu de la demande potentielle, c'est surtout à l'irrigation que l'on pense en termes de ré-utilisation des EUTs. En France, le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) avait répertorié en 2017 58 cas de réutilisation de EUT issues de STEU urbaines, principalement pour de l'irrigation de cultures et golfs (10). Outre les problèmes liés aux pathogènes et aux micropolluants, l'augmentation progressive de la salinisation des sols irrigués est préoccupante. L'Union Européenne a récemment proposé une règlementation concernant la réutilisation des EUTs. Cependant la proposition ne semble pas suffisante pour certains (1) car des points ne sont pas suffisamment traités, comme la présence de contaminants préoccupants (11), dont les microplastiques, et de sous-produits de désinfection (12) ainsi que la propagation de la résistance aux antibiotiques. Le potentiel de nouveaux outils bioanalytiques de suivi de la qualité de l'eau basés sur les effets sur l'environnement doit permettre de développer une surveillance globale vis-à-vis de l'ensemble des micropolluants, à destination des EUTs comme plus globalement à celle des écosystèmes aquatiques. Cette règlementation peut différer dans les différents pays membres. En France la règlementation actuelle est régie par le décret du 10 mars 2022, qui fixe notamment l'origine autorisée des EUTs et leur destination. Les craintes actuellement exprimées concernant les risques associés à la réutilisation des eaux traitées doivent inciter à poursuivre des travaux scientifiques sur l'assainissement pour les surmonter (désinfection, élimination des micropolluants),

tout en maintenant un coût raisonnable à l'obtention d'une eau de qualité.

RÉFÉRENCES

(1) Dingemans DML et al. (2020) Responsible water reuse needs an interdisciplinary approach to balance risks and benefits. *Water* 12 : 1264
(2) Azimi S et al. (2018) Les résidus médicamenteux dans les eaux de Seine et les rejets de stations d'épuration : cas de l'agglomération parisienne. *Techniques Sciences Méthodes* 6 : 45-57.
(3) Deshayes et al. (2018) Devenir des micropolluants au sein de la station d'épuration de Seine Centre : étude simultanée des filières eau et boue. *Techniques Sciences Méthodes* 6, 33-43.
(4) Louis P et al. (2020) Understanding Rare Earth Element concentrations, anomalies and fluxes at the river basin scale: the Moselle River (France) as a case study. *Science of the Total Environment* 742 : 140619.
(5) Kulaksiz M (2014) Anthropogenic gadolinium as a microcontaminant in tap water used as drinking water in urban areas and megacities. *Applied Geochemistry.*, 26 : 1877-1885.
(6) Mailler R et al. (2020) Évaluation du comportement des organismes pathogènes au sein des filières de traitement des eaux usées – Cas de l'agglomération parisienne dans le contexte de la réutilisation des eaux traitées. *Techniques Sciences Méthodes* 12 : 75-96.
(7) WHO (2006) A compendium of standards for wastewater reuse in the Eastern Mediterranean Region. WHO-EM/CEH/142/E
(8) Mordechay EB et al. (2021). Pharmaceuticals in edible crops irrigated with reclaimed wastewater: Evidence from a large survey in Israel. *Journal of Hazardous Materials* 416 : 126184
(9) Drechsel P, Qadir M, Galibourg D (2022) The WHO guidelines for safe wastewater use in agriculture: a review of implementation challenges and possible solutions in the global south. *Water* 14 : 864.
(10) Franck-Neel C (2018) Réutilisation des eaux usées traitées. Le panorama français. CEREMA, Collection Connaissances ISSN 2417-9701 2018/xxx
(11) Meffe R et al. (2021) Pharmaceutical and transformation products during unplanned water reuse: Insights into natural attenuation, plant uptake and human health impact under field conditions. *Environment International* 157 : 106835
(12) Leonel L et al. (2022) Impacts of disinfected wastewater irrigation on soil characteristics, microbial community composition, and crop yield. *Blue-Green Systems* 4 : 247.

NOTES

(1) DEHP = Di(2-ethylhexyl)
(2) HAP = Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
(3) PFOS = acide PerFluoroOctaneSulfonique

L'eau à découvert, *ouvrage collectif de Agathe Euzen, Catherine Jeandel et Rémy Mosseri (dir.), 2015 & 2017. CNRS Éditions, Paris, 365 pages.*

Indispensable à la régulation du climat, au développement de la vie sur Terre, au maintien des écosystèmes, aux populations, au développement de l'agriculture, de l'industrie comme à la production d'énergie, l'eau est un élément vital. Il convient donc, dans un contexte de changement global, d'analyser dans toute sa diversité la place et le rôle de l'eau et de se donner ainsi les moyens de mieux la préserver.

Autour de cet enjeu qui engage toute l'humanité, Agathe Euzen, Catherine Jeandel et Rémy Mosseri ont réuni près de cent cinquante contributions, visant à apporter un éclairage sur chacun des domaines et des approches que couvre cette thématique.

Quelle est l'origine de l'eau ? Son rapport avec l'apparition de la vie ? Quel rôle a-t-elle joué dans l'histoire de la planète et dans le développement de la vie végétale, animale et humaine ? Quel est son cycle ? Quelles sont ses propriétés chimiques ? Comment les sociétés se sont-elles emparées de cet élément précieux ? Allons-nous manquer d'eau ? L'eau est-elle source de conflits ? Comment l'eau est-elle gérée ? Comment recycle-t-on une eau polluée ? Quels sont les risques pour la santé mondiale ? Quels sont les grands enjeux liés à l'eau au XXIe siècle ?

Comprendre et proposer des solutions à ces défis majeurs est l'intention de cet ouvrage.

Chercheurs d'eaux au temps des changements globaux. Quelles perspectives pour les territoires ? *Anne Rivière-Honegger, Stéphane Ghiotti(Eds), 2022. Géocarrefour, volume 96, n° 1 et 2.*

Les recherches sur l'eau, tant dans leurs dimensions matérielles qu'idéelles, font l'objet d'un renouvellement dans le champ des sciences humaines et sociales. Ceci est à mettre en relation avec les défis majeurs actuels et futurs et les enjeux inédits que pose la gestion de l'eau. Dans un contexte de changements globaux qui accentue certains enjeux et en suggère de nouvelles hiérarchies à toutes les échelles spatio-temporelles, les questionnements évoluent, les valeurs sont bousculées, la gouvernance et l'action se réinventent. Ce numéro double de la revue *Géocarrefour* propose d'interroger les manières dont se construisent aujourd'hui les connaissances et savoirs pour penser la gestion territorialisée de l'eau et des milieux aquatiques. Trente-deux articles ont été retenus écrits ou co-écrits par près de 75 auteurs de disciplines et d'organismes de recherche pluriels en France et ailleurs.

Dans le premier numéro (https://journals.openedition.org/geocarrefour/17863), 17 articles proposent une réflexion en écho à la question : comment les recherches en sciences humaines et sociales peuvent-elles représenter et analyser spatialement les liens entre les sociétés et les milieux aquatiques ? Dans le second (https://doi.org/10.4000/geocarrefour.18864), 15 articles réunissent des réponses aux deux questions suivantes : quels sont les cadres théoriques, les notions et concepts mobilisés actuellement pour penser la gestion territorialisée de l'eau et des milieux aquatiques ? Quels méthodes/outils/données sont mobilisés, pour quels types de réponses ? Les coordinateurs de ces deux numéros ont fait un effort appréciable pour structurer cet ensemble de textes et présenter un état actualisé des recherches sur l'eau.

L'eau en milieu agricole - Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale, *de Delphine Leenhardt, Marc Voltz, Olivier Barreteau, 2020. Éditions Quae, 288 pages.*

L'eau est un enjeu majeur dans de nombreuses régions du monde du fait de besoins en forte croissance, mais aussi de la rareté et de la dégradation des ressources disponibles. L'agriculture étant le premier usager de la ressource en eau, la durabilité de la gestion de l'eau en milieu rural est cruciale. Elle nécessite de dépasser les approches sectorielles, encore largement en cours malgré divers courants appelant à une gestion intégrée, territoriale ou adaptative de la ressource. Prenant acte que la mise en œuvre des concepts proposés par ces différents courants est rarement effective et qu'il est plus pragmatique de rechercher la meilleure coordination possible entre les parties prenantes de la gestion de l'eau, cet ouvrage collectif analyse les enjeux, outils et démarches permettant de faciliter et d'accompagner cette coordination. En effet, une coordination effective et acceptée nécessite des méthodes et outils pour informer sur l'état de la ressource et des usages, rendre visible l'importance des enjeux, évaluer les effets et les expliquer, structurer les échanges, et élaborer et discuter des actions de gestion.

L'ouvrage aborde la gestion de l'eau en milieu rural en termes d'objectifs et de démarche, puis fait un panorama large des outils, des méthodes et des données actuellement disponibles. Enfin, il décrit des exemples de mises en œuvre dans différents cas d'étude.

Cet ouvrage de synthèse s'adresse à un public large allant des chercheurs, étudiants et enseignants en gestion de l'eau aux professionnels concernés par sa mise en œuvre.

La Terre a soif : Petit précis de mondialisation Tome VI, *Erik Orsenna, 2022. Éditions Fayard, Paris, 432 pages.*

Après *L'Avenir de l'eau* (2008), voici un grand voyage aux royaumes des fleuves. Trente-trois fleuves du monde, de l'Amazone au tout petit Trieux (Bretagne Nord).

Dans *La Terre a soif*, Erik Orsenna raconte son tour du monde des grands fleuves. En faisant le portrait de trente-trois d'entre eux, il nous donne à voir de près les causes de leurs maux : la pénurie mondiale d'eau, la pollution, la multiplication de barrages entraînant la destruction des ressources et des paysages. Un constat : aujourd'hui, les violences viennent de l'eau elle-même. Violences nées de sa rareté tout autant que de sa répartition.

La Terre a soif. Et la soif est un appel. Le plus bouleversant, car le plus vital de tous les appels. À cet appel, les rivières et les fleuves ont su répondre. En offrant l'eau réclamée, bien plus que les puits. Cette mission, essentielle entre toutes, combien de temps pourront-ils la remplir ? Dans ce livre l'auteur nous propose une géographie intimement mêlée d'histoire. Une musique venue du ciel, une pluie fatiguée de tomber qui continue son parcours dans un lit jusqu'à la mer. Un récit toujours semblable et chaque fois singulier : le théâtre de la Vie. À *Louang Prabang* (Laos), un lever du jour sur le Mékong ; à *Bâton-Rouge* (Louisiane), un pianiste chante le blues pour prier le Mississippi de bien vouloir calmer sa crue. Mille émerveillements nous attendent. De plus en plus souvent accompagnés d'effroi.

Atlas mondial de l'eau : Défendre et partager notre bien commun, *David Blanchon, 2022. Éditeur Autrement, 96 pages.*

L'eau est la ressource la plus précieuse sur la Terre. Irremplaçable pour l'homme, l'eau est pourtant menacée, parfois mal gérée, souvent inaccessible. Comment donner un accès à l'eau pour tous ? Cet atlas propose un tour d'horizon autour de divers aspects :

- L'eau, ressource vitale, abondante mais mal répartie, qui révèle des inégalités sociales et de genre.
- L'eau, bien commun menacé par la surexploitation, les pollutions agricoles, industrielles et urbaines.
- Préserver les ressources en eau et leur qualité : un défi sanitaire et social, économique et environnemental, mais aussi et surtout un choix politique.

Cette nouvelle édition, grâce aux plus de 100 cartes et schémas mis à jour, dresse un tableau complet des défis auxquels le monde est aujourd'hui confronté pour une meilleure gestion de l'eau.

Ancien élève de l'École normale supérieure, David Blanchon est professeur en géographie à l'université de Paris Ouest-Nanterre et membre du laboratoire Mosaïques (UMR 7218 CNRS). Il est membre junior de l'Institut universitaire de France, responsable de l'ANR Wamakhair, et membre du Comité de rédaction de l'Espace géographique.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'eau est universelle : on la détecte partout. Sur Terre, bien sûr, mais aussi à travers tout le Système solaire, dans le milieu interstellaire, dans les galaxies les plus éloignées... et même à la surface des étoiles. C'est grâce aux techniques permettant de détecter l'eau dans notre environnement planétaire proche que les astronomes l'ont trouvée à travers tout l'Univers, dans ses phases gazeuse et solide.

Des propriétés physiques et chimiques de l'eau à son apparition sur Terre, des océans hypothétiques cachés sous les glaces des satellites de Jupiter et de Saturne aux disques de matière où naissent des exoplanètes, du passé très reculé de Mars où l'eau liquide semble avoir coulé en abondance au futur lointain de notre planète où toute trace d'eau aura disparu, ce voyage dans l'espace et le temps vous entraînera jusqu'aux confins du cosmos.

L'eau dans l'Univers fait le point sur la présence de cette précieuse substance à travers l'espace, à la lumière des connaissances actuelles et des découvertes les plus récentes... et les plus étonnantes !

L'origine de l'eau sur terre ; d'où vient l'eau que nous buvons ?

Samantha Azevedo-Vannson ©IMPMC - Cécile Duflot

Jérôme Aléon ©IMPMC - Cécile Duflot

Laurent Remusat ©MNHN - Agnès Iatzoura

Samantha Azevedo-Vannson *est docteur du Muséum national d'histoire naturelle. Elle a soutenu une thèse à l'IMPMC en 2022 sur l'origine de l'eau contenue dans les minéraux anhydres des chondres, les constituants principaux des météorites primitives.* ***Jérôme Aléon*** *est DR CNRS. Géochimiste de formation, il est spécialiste des matériaux les plus anciens du système solaire. Ses recherches portent notamment sur l'enregistrement des interactions gaz-roches à la naissance du système solaire.* ***Laurent Remusat*** *est DR CNRS. Il s'intéresse aux volatils dans les roches terrestres et extraterrestres et étudie également la formation et l'évolution de la matière organique contenue dans les petits corps du système solaire. Ils réalisent leurs recherches dans les équipes COSMO (Cosmochimie) et ROCKS (Recherche sur des échantillons-clés riches en carbone) de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC-UMR7590).*

L'eau, indispensable à la vie, sert notamment de solvant aux molécules organiques dans les cellules. Composante principale du corps humain, il est impossible de survivre sans apports réguliers en eau. Cette dernière est omniprésente sur notre planète. Les océans couvrent environ 70 % de la surface terrestre, tandis que l'atmosphère peut contenir jusque 5 % de vapeur d'eau. Le manteau terrestre renferme probablement la majorité de l'eau de notre planète. L'équivalent de 10 (±5) masses océaniques d'eau est stockée dans cette couche de silicates entre le noyau et la croûte (1). L'eau modifie le comportement et affecte la fusion des roches. Sa présence a de nombreuses implications sur les reliefs de la Terre en permettant la formation des continents ou la tectonique des plaques (2).

La concentration en eau et plus largement celle en éléments volatils permet de diviser le système solaire en deux parties : le système solaire interne composé des quatre planètes telluriques (Mercure, Vénus, Terre et Mars) et le système solaire externe composé des quatre

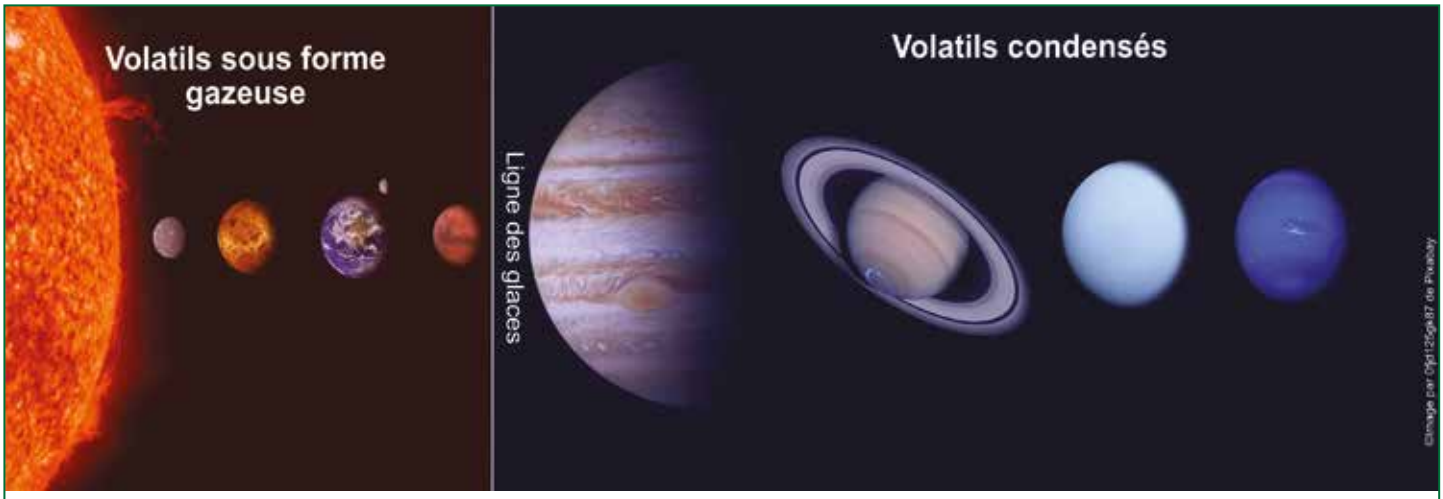


Fig. 1 : Représentation du système solaire divisé en deux ensembles : le système solaire interne proche du Soleil et le système solaire externe. Ces zones sont séparées par la ligne des glaces qui se situe entre Mars et Jupiter. Au-delà de cette

s p # u l # w l # É # j v u k # z v # m z y # z t v l s # N t l # 2 p # k # k l y # ? # p ‖ | w z > 3 3 w p ä h i h ç 2 j v t 3 m y

solaire-soleil-mercure-439046/

géantes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune). Une des principales distinctions entre système solaire interne et externe repose sur la quantité d'éléments volatils (e.g. eau, azote, carbone, xénon…) contenus dans ces planètes ; les planètes du Système solaire interne étant appauvries en volatils par rapport à celles du système solaire externe (Fig. 1).

Ces planètes se sont formées dans le disque protoplanétaire lors de multiples épisodes de collisions et accrétions. L'hydrogène du disque protoplanétaire se trouve majoritairement sous forme de dihydrogène (H_2). Ce disque protoplanétaire provient de l'effondrement d'un nuage moléculaire au centre duquel s'est formé le Soleil et où la température pouvait atteindre 1500 °C à proximité du jeune Soleil et décroissait avec la distance à l'étoile. C'est au-delà d'une zone appelée ligne des glaces que la température était suffisamment faible pour permettre la condensation des éléments volatils tels que l'eau (Fig. 1) sous forme solide. Son existence explique la dichotomie observée entre zone interne du système solaire, en-deçà de la ligne des glaces, et zone externe au-delà.

QUELLE EST L'ORIGINE DE L'EAU TERRESTRE ?

La présence d'eau sur Terre constitue une anomalie car l'eau devrait avoir été vaporisée hors du système solaire interne (2, 3). Or la Terre est hydratée. Comment justifier ce paradoxe ? Deux grandes hypothèses ont été proposées. La première considère que l'eau fut apportée tardivement, après la formation de la Terre, par des objets hydratés, tandis que la deuxième envisage une incorporation tout au long de la formation planétaire (Fig. 2).

L'apport tardif de l'eau sur terre

Dans le cadre de la première hypothèse, la Terre se serait accrétée à sec. L'eau aurait par la suite été apportée par des objets hydratés comme les astéroïdes carbonés (Fig. 2d) ou les comètes (Fig. 2e). Les astéroïdes carbonés n'ont pas suffisamment chauffé depuis leur formation pour entraîner leur fusion et leur différenciation suivant une structure noyau-manteau-croûte. Ils contiennent encore leurs constituants primordiaux et nous pouvons les étudier au laboratoire par l'intermédiaire des chondrites.

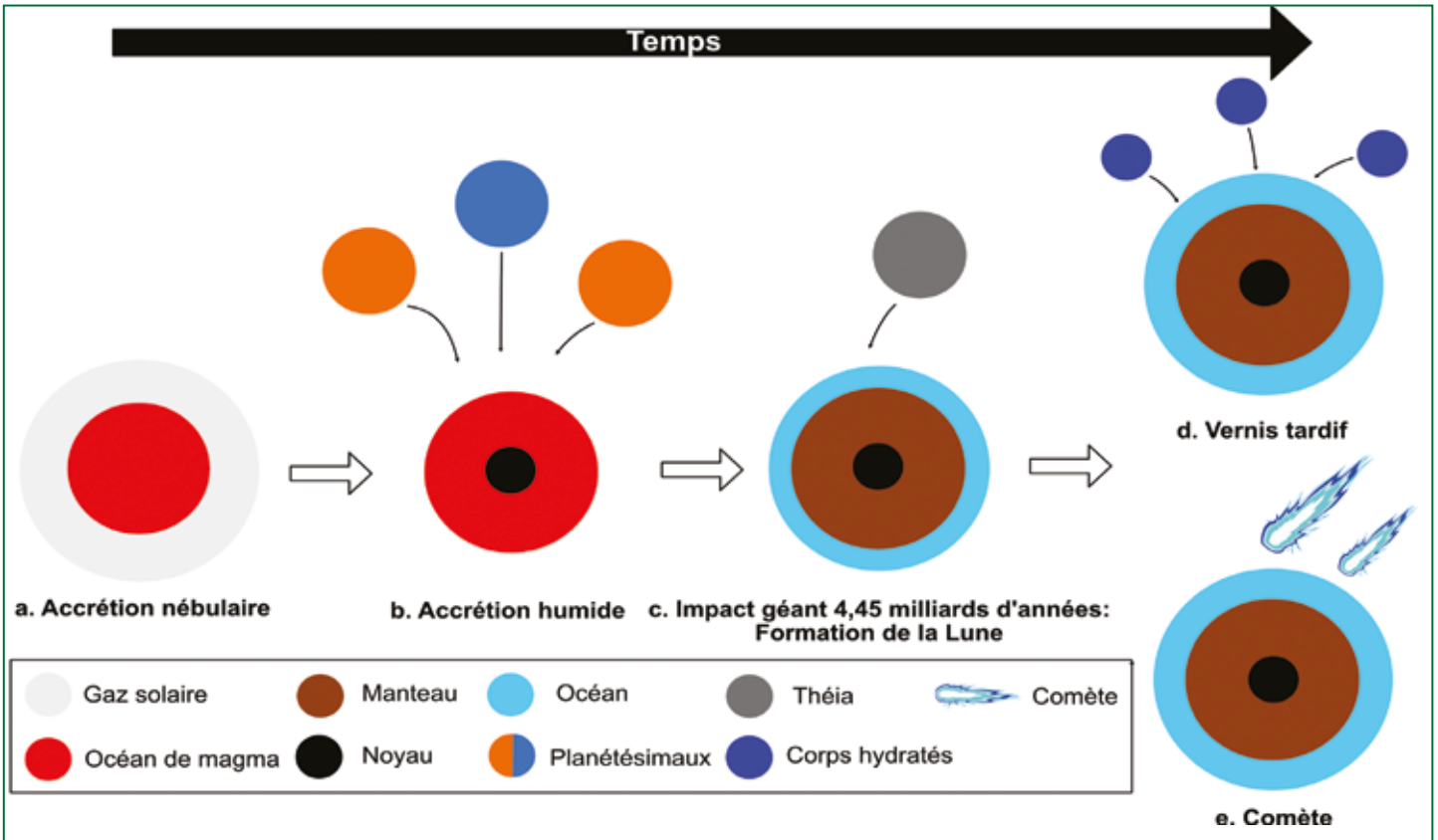


Fig. 2 : Schéma synthétisant les grandes hypothèses sur l'origine de l'eau terrestre. L'eau peut être accrétée au moment de la formation de la Terre par incorporation de l'hydrogène du disque protoplanétaire (a), soit par accrétion humide de corps peu à modérément riches en eau comme les chondrites à enstatite (b). Une fois la Terre formée, l'eau peut également être apportée [illegible] *Vannson.*

Fig. 3 : Photo de Banten (CM2), chondrite carbonée.
© Louis-Dominique Bayle, MNHN.

Les chondrites carbonées (Fig. 3) sont les plus riches en volatils, notamment l'eau et les gaz rares. L'hydrogène contenu dans les chondrites carbonées montre une composition isotopique comparable à celle de l'eau terrestre (rapport deutérium/hydrogène ou D/H) (1, 2). La composition isotopique d'un objet est définie par la proportion des isotopes d'un même élément au sein de cet objet, les isotopes étant des atomes avec le même nombre d'électrons et de protons mais un nombre différent de neutrons. L'hydrogène possède par exemple trois isotopes : l'hydrogène (H), le deutérium (D ou 2H) et le tritium (3H).

Cet apport de chondrites carbonées aurait eu lieu au cours des derniers moments de la formation de la Terre constituant le « vernis tardif », entre 50 et 100 millions d'années après l'impact géant entre la proto-Terre et Théia (une protoplanète d'une taille similaire à celle de Mars) qui aurait entraîné la formation de la Lune (Fig. 2c). Le vernis tardif permettrait d'expliquer non seulement l'apport d'eau sur Terre mais aussi la présence d'éléments très sidérophiles (ayant une forte affinité pour les phases métalliques) à la surface de la Terre (4). En effet, la Terre a vécu une période de différenciation pendant laquelle les éléments sidérophiles ont migré vers le noyau laissant les silicates du manteau et de la croute appauvris par rapport aux concentrations observées dans les chondrites. La présence d'eau et d'éléments sidérophiles à la surface de notre planète, comme les métaux précieux, pourraient donc être le résultat d'un apport tardif par des astéroïdes carbonés une fois que la Terre s'est dotée d'une croûte solide stable.

Plusieurs limites s'opposent au modèle d'accrétion tardive par chondrites carbonées (5). Tout d'abord, seul 0,03 à 0,1 % d'apport chondritique serait nécessaire pour expliquer la quantité d'éléments très sidérophiles dans le manteau (4), tandis que 0,3 à 2 % de matériel extraterrestre hydraté sont requis pour expliquer les teneurs en eau terrestre (2). Il apparait donc difficile pour les chondrites carbonées d'apporter simultanément les éléments sidérophiles et l'eau sur la Terre. De plus, la Terre et la Lune possèderaient un contenu en eau similaire mais des contenus en éléments hautement sidérophiles différents. Or, si l'eau fut délivrée dans des proportions similaires entre la Terre et la Lune, la même observation est attendue pour les éléments sidérophiles dans le cas d'un apport de chondrites carbonées postérieur à la formation de la Lune (4, 5). Enfin, les chondrites présentent un rapport Xe/Kr (où Xe est le xénon et Kr, le krypton) élevé par rapport à celui de la Terre.

Les comètes constituent la deuxième source ayant pu approvisionner la Terre en eau (Fig. 2e). Principalement constituées de glace d'eau, les comètes ont également des concentrations importantes en composants atmosphériques tels que les gaz rares ou le diazote (5). Pendant longtemps, on mesurait des comètes ayant des rapports D/H au moins 2 à 3 fois supérieurs à celui de l'eau terrestre, excluant les comètes comme unique source d'eau. Cependant, plusieurs études ont récemment montré qu'une population de comètes présentaient des rapports D/H de l'eau similaires à celle de la Terre (6). Malgré tout, en prenant d'autres éléments en compte (par exemple argon), la contribution des comètes au réservoir d'eau totale sur Terre est estimée à 1 %. Ainsi, il est nécessaire d'avoir un apport de type chondrite carbonée en parallèle de celui des comètes. Il est important de noter que la probabilité de collision cométaire est assez faible. Si celle-ci a tout de même lieu, le choc peut entraîner l'éjection des volatils dans l'espace (3).

Des processus plus précoces

La présence d'eau sur Terre peut aussi résulter de processus plus précoces, tout au long de la formation de la planète bleue. L'eau pourrait alors provenir de l'incor-

Fig. 4 : Photo de Sahara 97096 (EH3), chondrite à enstatite.
© Louis-Dominique Bayle, MNHN.

poration d'hydrogène venant du disque protoplanétaire (Fig. 2a) ou du matériel à l'origine de la Terre (Fig. 2b). Au cours de sa formation, la Terre a accrété du matériel chondritique, mélange entre chondrites carbonées (hydratées) et chondrites à enstatite (anhydres) (3, 7). La principale limite à ce modèle est de comprendre comment du matériel chondritique hydraté a pu être apporté du Système solaire externe vers le Système solaire interne. Le scénario le plus plébiscité est celui du « Grand Tack », qui peut expliquer les différences (i.e. chimiques, isotopiques, morphologiques) entre le système solaire interne et externe (8). Dans ce modèle, juste après la formation des planètes géantes qui a débuté plus tôt que celle des planètes telluriques (3), Jupiter a migré vers le Soleil avant d'être rejointe par Saturne. Ces migrations ont engendré des résonances gravitaires qui ont perturbé les trajectoires de l'ensemble des corps du système solaire interne. Ainsi, Saturne et Jupiter ont ensuite effectué un mouvement opposé pour regagner leurs trajectoires actuelles. En conséquence de cette série de mouvements planétaires à grande échelle, le matériel formé dans le système solaire interne a été catapulté loin de l'étoile, et du matériel condensé loin du soleil s'est retrouvé entrainé vers le Soleil. Du matériel chondritique hydraté a donc été intégré au système solaire interne et a pu participer à la formation de la Terre.

Des chondrites à enstatite (Fig. 4). De récentes études envisagent que l'eau terrestre ait pu être délivrée de façon précoce par du matériel chondritique considéré comme anhydre. En 2020, il a été montré que ces chondrites à enstatite pouvaient avoir contribué au réservoir d'eau sur Terre avec un rapport D/H comparable au manteau terrestre. Ces météorites se sont formées dans le système solaire interne et ont des compositions isotopiques similaires à celle de la Terre (isotopes du silicium, de l'oxygène, notamment) qui en font un matériau représentatif des constituants ayant formé la Terre. Un bilan de masse révèle que les chondrites à enstatite pourraient apporter l'équivalent de plusieurs océans terrestres à la proto-Terre (9). Il ne serait alors pas nécessaire d'apporter de l'eau en provenance du Système solaire externe lors d'événements tardifs car elle serait présente dès le début de l'accrétion terrestre.

Le dihydrogène (H_2) du disque protoplanétaire présent au moment de la formation de la Terre pourrait également avoir participé au budget en eau sur Terre. Ce dernier est en effet toujours présent 3 à 6 millions d'années après la naissance du Soleil, lors des premiers stades de formation de la Terre (5). L'hydrogène du disque est appauvri en deutérium avec des rapports D/H 7 à 8 fois plus faibles que les rapports D/H terrestres (1, 10). Le rapport D/H initial de l'eau terrestre était donc certainement inférieur à celui des chondrites carbonées et plus proche des rapports D/H du disque protoplanétaire. Cette source est cohérente avec la présence probable d'eau très appauvrie en deutérium dans les silicates du manteau terrestre profond actuel, qui est resté isolé depuis la formation de la planète (11). Si on peut trouver des traces d'eau formée à partir du dihydrogène nébulaire, il ne peut expliquer l'ensemble de l'eau terrestre et une source plus riche en deutérium (e.g. chondritique ou cométaire) reste donc nécessaire pour expliquer l'origine de l'eau terrestre.

L'incorporation précoce d'hydrogène et d'eau nébulaire est aussi proposée pour des minéraux formés dans le système solaire interne et formant les inclusions réfractaires des chondrites carbonées. Ces assemblages sont les premiers objets à s'être condensés et permettent de dater l'âge du système solaire à 4,567 milliards d'années. De très faibles rapports D/H, similaires à celui du dihydrogène du disque protoplanétaire, ont été mesurés dans certains de ces minéraux et des rapports D/H identiques à celui de la Terre dans d'autres (12), ce qui suggère la présence d'eau très tôt dans le système solaire interne. Ces mesures laissent donc supposer qu'un processus encore mal contraint permet la formation d'eau et son incorporation dans des minéraux pouvant par la suite être intégrés aux planètes en formation.

CONCLUSION

Malgré les avancées scientifiques récentes, l'origine de l'eau terrestre reste débattue. Bien que des études récentes aient tendance à favoriser une incorporation précoce d'hydrogène, les apports plus tardifs par du matériel cométaire ou chondritique ne peuvent pas être exclus. Il est ainsi tout à fait possible que l'eau terrestre soit le résultat d'un mélange entre plusieurs sources accumulées tout au long de la formation de la planète. Il existe dans le système solaire actuel d'autres corps rocheux (manteau martien ou certains astéroïdes comme Vesta) qui montrent des rapports D/H similaires à celui de la Terre indiquant qu'un réservoir majeur d'hydrogène/eau a existé dans le système solaire interne il y a 4,56 milliards d'années. L'étude des roches provenant de ces objets a des implications sur la compréhension de l'origine de l'eau sur Terre.

RÉFÉRENCES

(1) Lécuyer C, Gillet P, Robert F (1998) The hydrogen isotope composition of seawater and the global water cycle. *Chemical Geology* 145 : 249–261.
(2) Albarède F (2009) Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature* 461 : 1227–1233.
(3) Morbidelli A et al. (2012) Building terrestrial planets. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 40 : 251–275.
(4) Sharp ZD (2017) Nebular ingassing as a source of volatiles to the terrestrial planets. *Chemical Geology* 448 : 137–150.
(5) Day JMD, Brandon AD, Walker RJ (2016) Highly siderophile elements in Earth, Mars, the moon, and asteroids. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 81 : 161–238.
(6) Lis DC et al. (2019) Terrestrial deuterium-to-hydrogen ratio in water in hyperactive comets. *Astronomy & Astrophysics* 625 : L5.
(7) Warren PH (2011) Stable-isotopic anomalies and the accretionary assemblage of the Earth and Mars: A subordinate role for carbonaceous chondrites. *Earth and Planetary Science Letters* 311 : 93–100.
(8) Raymond SN, Morbidelli A (2014) The Grand Tack model: a critical review. *Proceedings of the International Astronomical Union* 9 : 194–203.
(9) Piani L et al. (2020) Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. *Science* 369 : 1110–1113.
(10) Genda H, Ikoma M (2008) Origin of the ocean on the Earth: Early evolution of water D/H in a hydrogen-rich atmosphere. *Icarus* 194, 42–52.
(11) Hallis LJ et al. (2015) Evidence for primordial water in Earth's deep mantle. *Science* 350 : 795–797.
(12) Aléon J et al. (2022) Determination of the initial hydrogen isotopic composition of the solar system. *Nature Astronomy* 6 : 458–463.

Zoom sur la recherche française dans le domaine d'eau douce : cellule Eau CNRS, ICIREWARD et Chaire EACC

par Vivienne Gianinazzi-Pearson (Éditrice de l'A3 Magazine), avec la contribution d'Agathe Euzen (Directrice de la cellule Eau CNRS), Sandra Bardin (Responsable animation scientifique du Centre UNESCO ICIREWARD), et Gilles Belaud (Coordinateur scientifique de la Chaire EACC)

CELLULE EAU CNRS

L'eau fait l'objet des recherches abordées par de nombreuses disciplines dans les dix instituts du CNRS, allant du fonctionnement des écosystèmes, de la régulation du climat, de ses disponibilité et répartition, à son utilisation et sa gestion pour préserver les écosystèmes et satisfaire les différents usages à toutes les échelles. Plus de 210 laboratoires du CNRS, en lien avec ses partenaires, soit 2 900 chercheurs, ingénieurs et techniciens, travaillent sur des sujets de recherche relatifs à l'eau sous toutes ses formes, transformations et usages, allant de la molécule au grand cycle (www.cnrs.fr/sites/default/files/pdf/DossierThématique_Eau_web.pdf). C'est dans ce contexte que le CNRS a créé une cellule Eau le 22 mars 2021 à l'occasion de la Journée mondiale de l'eau.

Effet d'une goutte d'eau qui coule d'un robinet © Agathe Euzen/CNRS Photothèque.

Cette cellule Eau vise à mieux identifier et faire savoir les savoirs faire et l'excellence des recherches produites dans les laboratoires du CNRS dans tous les domaines. Elle participe aussi à la stratégie de développement de partenariats avec l'ensemble de la filière eau afin d'accélérer la coopération entre les acteurs du secteur et favoriser l'émergence de solutions innovantes. L'objectif est de mieux faire connaître, de développer et de valoriser les compétences du CNRS sur les thématiques de l'eau, tout en structurant son offre de recherche dans ce domaine, et en favorisant une approche inter/pluridisciplinaire et multi partenariale. De nombreux acteurs s'intéressent de près aux recherches sur l'eau : des ministères aux associations, en passant par les agences de l'eau, les ONG, les collectivités locales et les entreprises. La cellule Eau est le point de contact au CNRS pour tous ces acteurs des secteurs académique et non académique, afin qu'ils disposent d'un accès privilégié à l'ensemble des connaissances et savoir-faire susceptibles d'appuyer leurs actions, leurs recherches et leurs démarches d'innovation.

Agathe Euzen, directrice adjointe de l'Institut écologie et environnement du CNRS (INEE) dirige la cellule Eau du CNRS, avec un comité de pilotage formé d'un représentant de chacun des dix instituts du CNRS, de la Direction des relations avec les entreprises (DRE), de la Direction europe de la recherche et coopération internationale (DERCI), des délégations régionales et de la Direction de la communication.

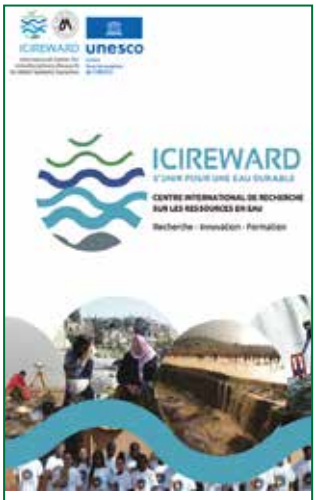
Agathe Euzen dirige depuis fin 2021 le programme national « PEPR Exploratoire OneWater-Eau Bien Commun », co-piloté par le CNRS, l'INRAE et le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), qui a vocation à mettre les recherches sur les ressources en eau au cœur de la transition durable des territoires (www.cnrs.fr/fr/pepr/pepr-exploratoire-onewater-eau).

Logo du programme OneWater © OneWater.

ICIREWARD

En 2021, l'Institut montpelliérain de l'eau et de l'environnement (IM2E) est devenu Centre international UNESCO de Catégorie 2 - ICIREWARD (*International Center for Interdisciplinary Research on Water Systems Dynamics*). Ce centre international pour la recherche interdisciplinaire sur la dynamique des systèmes hydrologiques a été officiellement créé en 2020 par l'UNESCO, le ministère de l'Enseignement supérieur de la recherche et de l'innovation, et l'université de Montpellier. Il rassemble près de 400 scientifiques issus de 17 laboratoires de recherche publics, et 150 doctorants.

Le siège du Centre UNESCO ICIREWARD est localisé sur le Campus de Pharmacie de l'université de Montpellier dans le bâtiment Hydropolis. Financé par le Contrat plan état région (CPER), ce bâtiment rassemble également les équipes du laboratoire HydroSciences Montpellier, l'OSU OREME[1], des plateformes d'analyses de haut-niveau et prochainement les bureaux du pôle Aqua-Valley.



Plaquette ICIREWARD, fr.unesco-montpellier.org/

ICIREWARD, dont le CNRS est partenaire, a comme ambition de fournir une expertise, effectuer des recherches et soutenir des actions de formation en matière de gestion et de gouvernance, de science et de technologies de l'eau dans les régions du Sud, devenues vulnérables en raison de l'urbanisation rapide des sociétés, de la pression démographique croissante et des effets observés du changement climatique. Les axes de recherche allient les sciences hydrologiques, chimiques et biologiques aux sciences sociales pour apporter une expertise complète face aux défis de la ressource en eau : sa disponibilité, sa qualité, son partage ou encore les phénomènes extrêmes (inondations, sécheresses). ICIREWARD s'appuie sur les réseaux IRD et Cirad et s'inscrit dans le cadre du Programme hydrologique intergouvernemental (PHI) de l'UNESCO où il assure le Secrétariat exécutif du programme *FRIEND-Water* qui rassemble plus de 120 pays dans le monde.

Le Centre UNESCO d'ICIREWARD s'adresse aux professionnels du domaine de l'eau, institutions (villes, métropoles, collectivités, etc.), ONG, grand public, étudiants, lycéens. Il est dirigé par Eric Servat, DR à IRD, qui a créé l'IM2E en 2015 et qui est aussi directeur de l'OSU OREME à Montpellier.

CHAIRE EAU, AGRICULTURE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Face aux défis majeurs posés par les changements climatiques et sociétaux sur la gestion et les usages de l'eau, l'agriculture doit être en mesure de s'adapter et établir de nouvelles relations avec la ressource en eau considérée comme un bien commun, sur le court et le long terme. C'est dans ce contexte que l'Institut Agro et l'INRAE de Montpellier ont lancé, en 2021, la Chaire partenariale Eau, agriculture et changement climatique (Chaire EACC ; chaire-eacc.fr). Les coordinateurs scientifiques sont Gilles Belaud, professeur à l'Institut Agro, et Sami Bouarfa, directeur adjoint du département AQUA à INRAE.

L'objectif de la Chaire EACC est de mobiliser l'ensemble des acteurs impliqués afin d'éclairer la décision publique notamment sur les sujets de controverse, explorer et d'actionner des solutions concrètes pour une meilleure gestion et un partage durable des ressources en eau à l'échelle des territoires. Ses activités ciblent en particulier : les systèmes de production agricole moins vulnérables vis-à-vis des aléas hydroclimatiques ; l'économie d'eau en agriculture grâce à l'amélioration technique et des pratiques plus efficientes ; le recyclage et la réutilisation des eaux ; le stockage d'eau sous toutes ses formes (dans les sols, le sous-sol, en surface).

La Chaire EACC rassemble des instituts de recherche et de formation, entreprises, acteurs publics et représentants du monde agricole dans un réseau de recherche, d'innovation et de pédagogie sur la gestion de l'eau en agriculture face au changement climatique dans le grand Sud de la France (Occitanie, Sud PACA, Auvergne Rhône-Alpes). Elle fait appel à des chercheurs issus de plusieurs unités de recherche (Toulouse, Montpellier, Avignon), pour la participation à des groupes de travail thématiques et pour l'encadrement scientifique d'actions spécifiques.

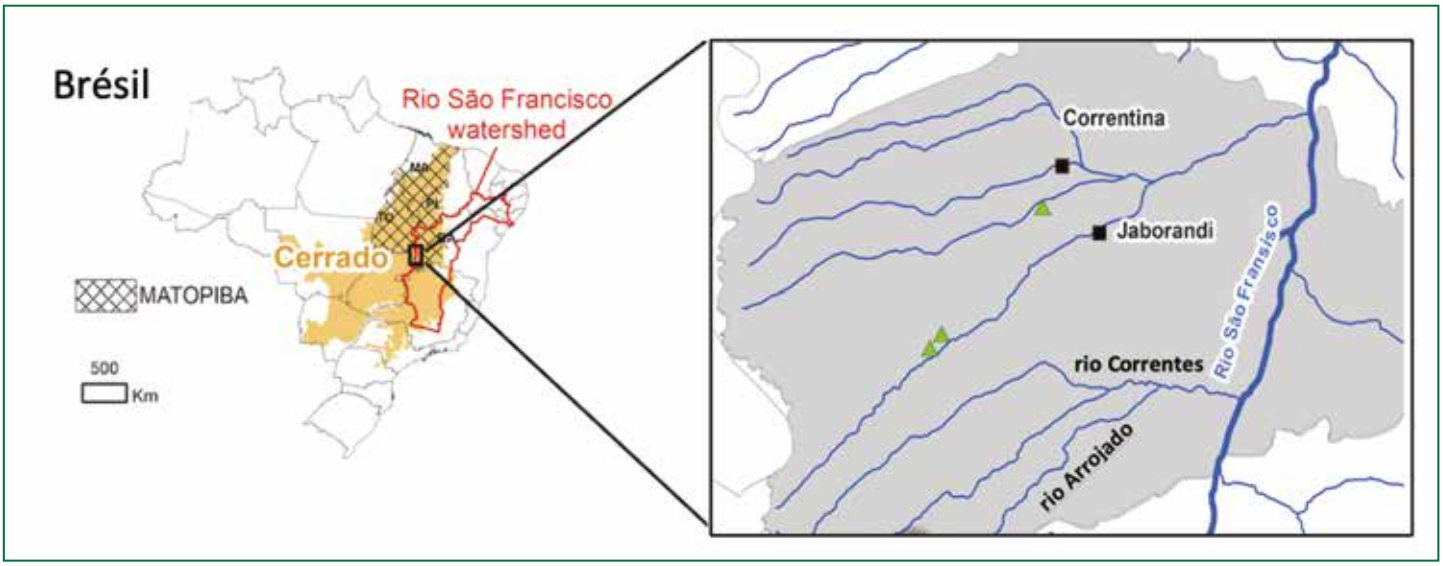
NOTE

(1) Observatoire des sciences de l'univers, observatoire de Recherche montpelliérain de l'environnement.

Une crise hydrique dans le Cerrado brésilien : dimensions, implications et controverses

Ludivine Eloy, agronome et géographe, est chargée de recherche au CNRS (UMR ART-Dev, Montpellier) depuis 2008. Elle s'intéresse aux pratiques de gestion des ressources et à leurs interfaces avec les normes environnementales au Brésil (Amazonie et Cerrado). Grâce à des collaborations avec des collègues en SHS et en sciences de la vie (écologie, botanique, hydrologie), avec les responsables de politiques environnementales et de la société civile organisée, ses recherches explorent les dialogues possibles entre savoirs scientifiques et savoirs locaux et ont des applications pour la gestion des aires protégées. Elle a coordonné l'équipe interdisciplinaire du projet HydroCerrado (2019-2022) sur l'expansion agroindustrielle et gestion de l'eau dans le Cerrado brésilien.

Le Brésil est le premier producteur de soja au monde, et les savanes du plateau central (Cerrado) constituent sa principale zone d'expansion. S'il est connu que le développement des monocultures en Amérique Latine repose sur la déforestation, ses implications sur les ressources en eau sont en revanche moins débattues. Or, le développement récent de l'irrigation associé à l'expansion du soja dans le Cerrado pose des problèmes à l'échelle locale, avec la multiplication des conflits entre agriculteurs familiaux et grands producteurs. De plus, ce modèle de développement agricole est de plus en plus contesté aux échelles régionales et nationales, non seulement en raison de la biodiversité remarquable du Cerrado, mais également pour son rôle crucial dans la distribution des ressources hydriques du continent. En effet, malgré un climat semi-aride, cette mosaïque de forêts sèches, savanes arborées et prairies fonctionne comme le « château d'eau » du Brésil : huit des douze grands fleuves du pays prennent naissance dans cet espace géographique, distribuant une eau dont dépendent des millions de familles rurales et des écosystèmes variés. C'est le cas par exemple des vallées des rivières Correntes et Arrojado, situées dans le Cerrado à l'extrême Ouest de l'état de Bahia :



LE PROJET HYDROCERRADO

Le cadre du projet HydroCerrado (1) financé par le CNRS, une équipe internationale - composée de chercheurs géographes, sociologues, hydrologues et de représentants de la société civile locale - propose une contribution originale au débat sur la place de l'eau dans la globalisation de la production agricole basée sur l'étude de l'expansion agroindustrielle et gestion de l'eau dans le Cerrado brésilien. Coordonnée par Ludivine Eloy et Sérgio Sauer, professeur en sociologie à l'université de Brasilia (UnB), cette équipe interdisciplinaire a étudié les transformations d'un territoire hydrosocial dans une

région connaissant un développement agroindustriel récent, à l'ouest de l'État de Bahia, l'une des dernières frontières agricoles du pays (Fig. 1). La méthodologie adoptée consiste à cartographier les transformations des paysages de l'eau, à comparer les usages de l'eau entre différents groupes d'acteurs, et à analyser les représentations et négociations impliquées dans la définition de normes de gestion.

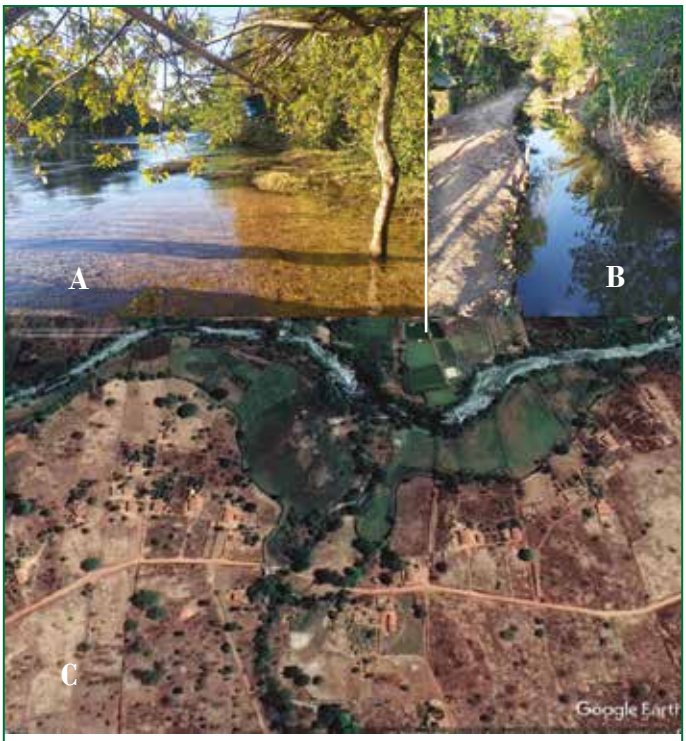


Fig. 1 : La vallée de l'Arrojado à l'ouest de l'État de Bahia dans le Cerrado brésilien. (a) En haut à gauche : rio Arrojado, lieu de baignade, de pêche, et d'approvisionnement en eau. Cliché : Ludivine Eloy @CNRS (2022). (b) En haut à droite : un canal d'irrigation dans la moyenne vallée de l'Arrojado. Cliché : Ludivine Eloy @CNRS (2022). (c) En bas : l'effet « oasis » du canal d'irrigation, village de Malhadina, basse vallée de l'Arrojado. Source : Google Earth (2018).

Les résultats réunis dans deux articles, l'un publié dans la revue Water en 2021 (2) et l'autre dans la revue IDS (3), montrent que le développement de l'irrigation par pivot centraux (Fig. 2) pour la culture du soja sur les plateaux (+687 % de surfaces irriguées depuis 2000 dans le bassin versant du fleuve Corrente) est devenu nécessaire et possible dans un contexte de variabilité climatique, d'expansion territoriale vers l'est, de modernisation technologique et de financiarisation de la production. Il s'est appuyé sur la dérégulation des politiques environnementales, qui s'est accélérée depuis 2012 (3). En conséquence, le volume d'eau alloué aux entreprises agroindustrielles a augmenté de 639 % entre 2013 et 2019.

Fig. 2 : Un pivot central dans une exploitation agro-industrielle de l'extrême Ouest Baianais. Source : D. Galdieri @Hilaea Media (2021).

CRISE HYDRIQUE : EXPANSION AGROINDUSTRIELLE OU CHANGEMENTS CLIMATIQUES ?

Les enquêtes et observations de terrain montrent que la baisse des débits fluviaux et l'assèchement progressif de l'agroécosystème déstructurent les systèmes agricoles situés en aval des monocultures. Dans l'Ouest de Bahia, c'est le système agricole des communautés traditionnelles de *fecho de pasto* qui est menacé (Fig. 3), avec son réseau ingénieux de canaux d'irrigation par gravité, datant du début du XXe siècle, associé à la conduite de l'élevage pastoral sur des terres collectives. Cette déstructuration explique en partie l'épisode de « la guerre de l'eau » qui a marqué la région de Correntina en 2017.

Fig. 3 : Un canal asséché dans la basse vallée de l'Arrojado. Cliché : D. Galdieri @Hilaea Media (2021).

Mais les résultats du projet HydroCerrado montrent également que ce conflit est marqué par une controverse scientifique autour des causes de la crise hydrique : alors que certains géologues et hydrologues indiquent la responsabilité du modèle agroindustriel dans la perturbation du cycle hydrologique, d'autres mettent en cause les changements climatiques et insistent sur les grandes réserves encore disponibles dans les nappes phréatiques. Or, les résultats des analysent hydrologiques (2) indiquent que la surexploitation des ressources hydriques induits par l'expansion agroindustrielle (déforestation et irrigation à grande échelle - Fig. 4) sont les principales causes

K p #8#2N u z | h #k #w h v t p w #h #m l #z lÉ Ív l y #k h #q Ú #L z #s l h #w k v w #y #p À l| à Ù| Ý #G z h p h #a h w #k d #z z
sources de l'Arrojado). Source : D. Galdieri @Hilaea Media (2021).

de la baisse des débits fluviaux, et non pas les changements climatiques.Enfin, cette controverse scientifique autour des causes de la crise hydrique reflète les jeux d'acteurs locaux. Alors que les villageois, installés dans les vallées en aval des plantations, rejettent la responsbilité de la pénurie d'eau sur la déforestation et l'irrigation sur les plateaux en amont (zones de recharge de la nappe phréatique), les grands producteurs de soja expliquent ce problème par les changements climatiques et les pratiques agropastorale dans les vallées (notamment l'usage du feu). En somme, la naturalisation du problème et son déplacement (de l'amont vers l'aval) aident les producteurs de soja à décliner leur responsabilité dans l'épuisement des ressources en eau. Ainsi, depuis 2015, le secteur agroindustriel régional cherche à conserver son leadership en matière de gouvernance environnementale grâce à sa participation active dans la production de connaissances hydrologiques.

En 2021, l'équipe du projet HydroCerrado, contrainte par le travail en distanciel, a approfondi la recherche afin d'identifier et de localiser les principales entreprises installées dans le sous-bassin de l'Arrojado, ainsi que leurs logiques d'accès à l'eau. Pour cela, la cartographie (interprétation d'images satellites, projection de données) (3) est combinée à des savoirs non académiques produits par des collaborateurs locaux (expériences, mémoire collective, et observation de terrain sur l'installation des entreprises), ainsi qu'à la compilation de données secondaires, aboutissant à la constitution d'une base de données sur les droits d'eau. Ces résultats seront publiés dans un ouvrage (4) qui met en évidence le rôle du gouvernement de l'état de Bahia dans l'exploitation croissante des nappes phréatiques.

COLLECTIF *ÁGUAS DO OESTE*

En parallèle, les membres du projet ont participé à la constitution d'un réseau - le Collectif *Águas do Oeste* - associant des représentants des communautés traditionnelles, de la société civile organisée, de l'État (Ministère Public Fédéral) et des scientifiques. Ce groupe avait pour but initial de contribuer au débat sur le plan de bassin des rivières Corrente et Grande, en apportant une expertise scientifique (hydrologie, géologie, géographie, analyse spatiale, histoire agraire) qui manquait aux mouvements sociaux. Cette construction institutionnelle, bien qu'informelle et appuyée sur un réseau social virtuel, a donné lieu à un processus de partage et de production collective de connaissances, qui s'est récemment déployé sous forme journalistique, à travers des reportages écrits et audiovisuels, en portugais (5) et en français (6).

Les résultats du projet HydroCerrado ont été présentés et discutés lors d'un séminaire international le 8 mars 2022 à Montpellier (« Nouvelles frontières de l'irrigation en Amérique Latine : moyens, effets, controverses »), durant lequel deux chercheurs brésiliens de l'UnB ont été accueillis ainsi que des chercheuses venues du Chili et du Costa Rica pour présenter des travaux similaires. Les résultats ont également fait l'objet d'un Webinaire pour MSH-SUD TV en 2022 (7).

RÉFÉRENCES

(1) *HydroCerrado – Nouveaux enjeux et pratiques de régulation des flux d'eau dans les territoires de frontières agricoles des savanes brésiliennes*. Projet IEA (International Emerging Actions) du CNRS, 2019-2022.
(2) da Silva AL et al. (2021) Water appropriation on the agricultural frontier in Western Bahia and its contribution to streamflow reduction: revisiting the debate in the Brazilian Cerrado. *Water* 13 : 1054 ; doi.org/10.3390/w13081054
(3) KRA et al. (2022) *Mapeamento das empresas usuárias de água no Rio Arrojado Correntina, Bahia. Brasília* : Universidade de Brasilia, 87 pages. (hal-03764797).
(4) da Silva AL et al. (sous presse) Environmental policy reform and water grabbing in an agricultural frontier in the Brazilian Cerrado. *IDS Bulletin*, Spécial issue : Frontier Territories: Countering the Green Revolution Legacy in the Brazilian Cerrado.
(5) https://apublica.org/2021/12/os-privilegiados-com-a-agua-do-cerrado-baiano/
(6) https://information.tv5monde.com/video/bresil-l-eau-paradoxe-de-l-abondance
(7) Eloy L, Sauer S (2022) La surexploitation de l'eau dans les frontières agricoles. https://www.mshsud.tv ' spip ' article1060

Si la nature avait des droits ? À propos du fleuve Tavignano en Corse

Fabrice Bonardi, auteur de deux essais consacrés à la Corse et de deux romans, a été Rédacteur en chef de l'A3 Magazine du numéro 57 en 2011 au numéro 75 en 2020. Co-fondateur en 2004 du concours de la Nouvelle George Sand, il en est aujourd'hui Secrétaire général.

Et si la nature avait des droits ? Tel est le titre d'une communication de Sébastien Mabile[1], Vice-président du Comité français de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN).

Un sujet qui fait écho au dossier du numéro 77 d'A3 Magazine *L'environnement et nos conditions de vie aujourd'hui et demain* et plus particulièrement à l'article de Florent Kohler intitulé *Un champ disciplinaire nouveau : les Humanités environnementales*. En effet, le postulat de Sébastien Mabile est que « l'effondrement du vivant, la modification du climat et la dégradation continue des écosystèmes sont les conséquences de la domination des humains sur leur environnement ». Faire de la nature un sujet de droits ne lui semble pas plus saugrenu que de doter de la personnalité morale des « fictions juridiques » telles que les associations, collectivités ou entreprises… De fait, les parcs naturels, par exemple, sont gérés par des personnes morales pouvant les représenter en justice pour en défendre l'intégrité contre les préjudices écologiques dont ils pourraient être victimes…

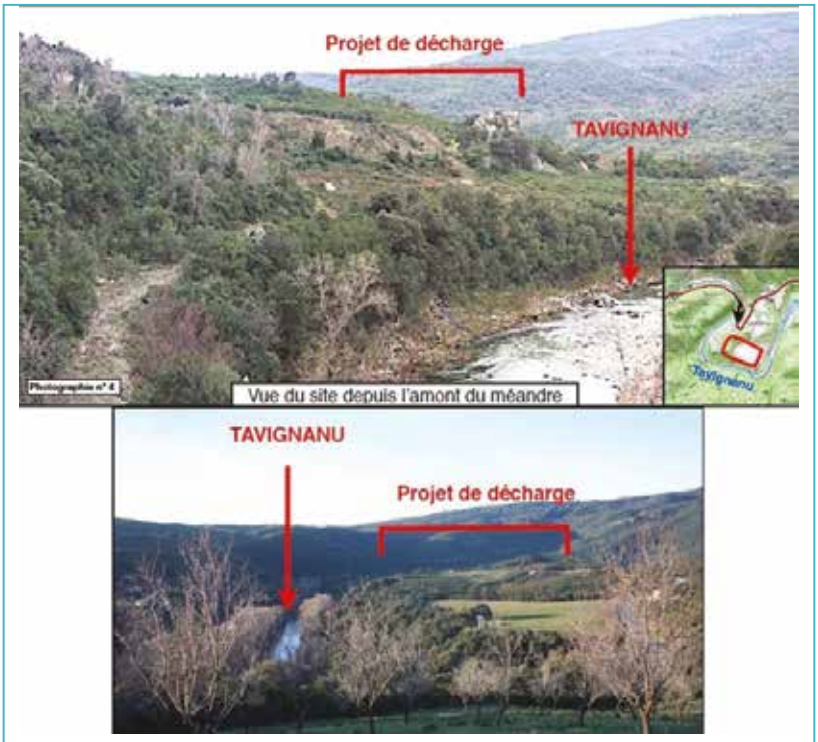
L'idée de doter la nature de la capacité de se défendre elle-même, esquissée dès 1972 aux États-Unis, a réellement pris corps en Amérique du Sud, lorsque la Constitution équatorienne de 2008 en fait un sujet de droits, obligeant à réparation en cas de dommages (l'action en justice étant confiée aux autorités par les personnes ou groupes les ayant saisies). En 2010 la Bolivie donne également force légale aux droits de la nature. Depuis, ce sont principalement des fleuves qui se sont vus reconnaître des droits :

- l'Atrapo (Colombie) en 2016,
- le Gange et le Yamuna (Inde)
- le Whanganui (Nouvelle-Zélande) en 2017.

L'eau tient effectivement une place prépondérante dans cette judiciarisation des atteintes à la nature, puisque des droits sont aussi accordés en 2018 à des glaciers et des lacs en Inde, aux États-Unis (cas du lac Érié), voire à des lagunes en Espagne.

LE TAVIGNANO N'EST PAS *UN LONG FLEUVE TRANQUILLE…*

En France, la démarche du « parlement de Loire », initiée en 2019 à Tours par le POLAU[2] réunit professionnels et riverains qui, « à la croisée des arts, des sciences, des usages et des droits de la nature », se sont donnés pour mission d'imaginer « ce que pourrait dire le fleuve ». L'auteur Camille de Toledo a retranscrit les échanges du parlement de Loire dans un livre au titre évocateur : « *Le fleuve qui voulait écrire* »[3]. L'axe du projet est d'imaginer que le fleuve puisse s'exprimer et défendre, avec ses intérêts, celui de l'ensemble des espèces de l'écosystème ; il s'agirait ensuite d'instituer le fleuve comme une entité juridique, à l'instar des exemples évoqués précédemment. Si d'autres initiatives se font jour sur le territoire national, par exemple en faveur du Rhône - la ville de Lyon s'étant associée à l'action d'une association suisse œuvrant à doter le Rhône de la personnalité juridique-, l'initiative développée en Corse en faveur du fleuve Tavignano mérite d'être soulignée. Souvent considéré comme un des joyaux de l'île, le Tavignano prend sa source au lac de Ninu, à 1743 mètres d'altitude, arrose Corte, et, au terme d'un parcours de 88 kilomètres à travers des gorges spectaculaires, atteint la mer Tyrrhénienne sur la côte est de l'île, à Aléria. Le cours du fleuve abrite nombre d'espèces animales et végétales rares et protégées. La vie du Tavignano étant loin d'être un long fleuve tranquille, elle est aujourd'hui contrariée par un projet d'enfouissement de 70 000 tonnes de déchets ménagers et amiantifères dans



Projet de décharge sur les rives du Tavignano.
© Tavignanu Vivu (www.tavignanuvivu.com).

un de ses méandres, en amont des captages pour l'eau potable et l'irrigation de la région.

L'opposition à ce projet donna naissance en 2016 au collectif Tavignanu Vivu[4] composé de riverains, d'agriculteurs, de professionnels… Tavignanu Vivu, qui s'est ainsi donné pour objectifs de protéger les espaces naturels, de protéger et valoriser les espaces agricoles et de lutter contre les pollutions et les nuisances, a élaboré une « déclaration des droits du fleuve Tavignano », une première en France pour pareille entité naturelle.

Logo Tavignanu Vivu.

« Le fleuve Tavignanu est une entité vivante et indivisible de sa source jusqu'à son embouchure […] En tant que personne juridique, il possède les droits fondamentaux suivants : le droit d'exister, de vivre et de z À j # É s y l # y # l ? t # w s p y

z #nzv u j #À jp w su v#nzpzxl Éu#z#k ly #k su#l|#z *pas être pollué… ».*

Cette déclaration a été officialisée dans les jours ayant suivi la validation du projet d'enfouissement par le Conseil d'État. Les initiateurs de la déclaration, destinée à terme à attribuer au fleuve une personnalité juridique propre, entendent ainsi la doter des droits fondamentaux *comme le droit d'exister, de vivre et de s'écouler*, ainsi que *le droit de ne pas être pollué*. La reconnaissance d'un tel statut permettrait de fait à des citoyens de saisir la justice, au nom du Tavignano, face aux pollueurs, à l'instar des riverains de la lagune *Mar Menor* espagnole : *Mar Menor* est en effet le premier écosystème européen à se voir reconnaître une personnalité juridique et des droits, après la double validation du Congrès puis du Sénat espagnols.

Si en France le principe de droits accordés à l'environnement a encore une portée limitée, la Loi Climat a néanmoins instauré le « délit d'écocide » pour pénaliser les intentions de polluer, avec des sanctions allant jusqu'à dix ans de prison et 4,5 millions d'euros d'amende.

Il est en tout état de cause certain que l'exemple espagnol n'aura pas manqué d'insuffler l'espoir le long des rives du Tavignano…

NOTES

(1) https://www.village-justice.com/articles/nature-avait-des-droits-par-sebastien-mabile-avocat,41512.html
(2) Fondé en 2007, le POLAU est une structure associant notamment arts et architecture.
(3) Une recension de ce livre est à retrouver en rubrique Kiosque de ce numéro, page.....
(4) Le nom officiel du fleuve est *Tavignano*, *Tavignanu* étant sa graphie en langue corse. https://www.tavignanu.corsica/declaration-des-droits-du-fleuve-tavignanu

Les enjeux de l'alimentation en eau potable des grandes agglomérations. L'exemple de Paris et de Bruxelles

Christian Girault est géographe, DR CNRS émérite dans l'UMR 7227 CREDA-IHEAL « Amé- y p x# É# # z É u p# v l yy iz# p u ÉÀ # N # # z l w2À j # k # s pFzt | À Q y lp | x# É# # h y h# Â# l z *membre du Comité de rédaction de l'A3 Magazine.*

La question de l'approvisionnement en eau est l'objet de bien des questionnements et d'angoisses, non seulement dans les régions sèches ou arides mais aussi dans des régions du monde considérées comme plus favorisées, l'Europe occidentale, la France et la Belgique en particulier. La fourniture d'eau potable est encore plus vitale puisque d'elle dépend la situation sanitaire des populations humaines. Deux exemples pris dans une publication géographique récente (1, 2) présentent certains aspects de ce problème peu connu du grand public et révèlent des enjeux sérieux. En effet, dans nos pays, « tirer l'eau potable du robinet » semble le geste le plus facile pour disposer d'une ressource de qualité en quantité suffisante et à un prix raisonnable. Mais il faut comprendre que derrière ce geste la mise à la disposition de cette eau exige la mise en œuvre de savoirs et de moyens souvent considérables. Il convient également de rappeler que l'accès à l'eau potable est reconnu comme un droit de l'homme (Assemblée générale des Nations unies, 28 juillet 2010).

L'AGGLOMÉRATION DE PARIS

La capitale française est fière, à juste titre, de son système d'approvisionnement en eau qui repose sur un réseau ancien, bien entretenu et qui apporte une eau de qualité. Pour environ la moitié de son approvisionnement Paris « se sert » de prélèvements réalisés dans la Seine, la Marne et l'Oise, tandis qu'une autre moitié est tirée de ressources provenant de captages de sources et de nappes souterraines à moyenne et grande distance dans les départements de l'Eure et Loir (environ 120 km), de l'Yonne et de l'Aube (environ 150 km). Des aqueducs conduisent l'eau à Paris par pompage et par gravité.

Soucieux de maintenir la qualité de l'eau, l'établissement public Eau de Paris (agence.eaudeparis.fr/) tente

Aqueduc de la Vanne. Photographie d'Audrey Vincent (1), ISARA, université de Lyon 2.

d'éviter le plus possible une pollution chimique, causée par l'utilisation de pesticides et de nitrates dans le cadre des grandes cultures céréalières pratiquées dans ces régions de captage, en particulier dans la vallée de la Vanne (région de Sens). Eau de Paris a donc établi un partenariat avec certains agriculteurs, moyennant des contrats de Logo Eau de Paris production en « agriculture biologique », assortis de subventions. Cette politique, débutée en 2011, n'est encore qu'expérimentale et le nombre d'exploitants concernés est limité (une cinquantaine de contrats). L'article « Reconquérir la qualité de l'eau potable » rédigé par A. Vincent et P. Fleury de l'université de Lyon 2, est bien éclairant sur cette question (1).

À titre pédagogique, la Ville de Paris s'est même engagée dans la

distribution dans les cantines scolaires de produits maraîchers issus de l'agriculture biologique de cette vallée de la Vanne, pour montrer aux enfants leur salubrité et surtout faire apprécier la qualité et la valeur de l'eau servie à table. Les auteurs de l'étude notent pourtant que malgré la loi française sur l'eau de 2009 et les différentes directives européennes, on observe encore des freins à l'adoption de l'agriculture biologique qui doit réduire l'usage des pesticides et permettre à terme d'améliorer la qualité des eaux.

LE CAS DE BRUXELLES

L'article très informé de Xavier May et al. (Université Libre de Bruxelles) sur Bruxelles (2) montre qu'une partie relativement importante de la population vivant dans la Région de Bruxelles-Capitale souffre d'une véritable « vulnérabilité hydrique ». Ce sont au minimum 100 000 personnes (soit 8,2 % de la population bruxelloise) pour qui l'accès à l'eau d'hygiène et à l'eau potable est difficile et représente une charge importante. Des cartes précises montrent la quasi-absence de fontaines et de toilettes publiques dans l'agglomération. Les auteurs notent aussi la montée très nette, sur la période 2000-2019, des interruptions de fourniture d'eau par VIVAQUA, la société intercommunale publique qui distribue l'eau. Le montant des factures impayées a beaucoup augmenté et les coupures d'eau ont l'effet d'isoler les populations des quartiers pauvres. Cependant, depuis 2020 (et le Covid), les coupures d'eau ont été interdites d'abord provisoirement et à présent définitivement. On ne peut donc plus couper l'eau des ménages bruxellois pour des raisons d'impayés.

La lecture de cet article est l'occasion d'apprendre que Bruxelles, l'une des capitales de l'Europe, subit depuis deux décennies un processus de paupérisation. En 2018 le revenu moyen par habitant est inférieur de 22 % pour Bruxelles-Capitale (19 communes), par rapport à la moyenne nationale de la Belgique. Et pendant cette période le coût des logements et le niveau des loyers ont beaucoup augmenté. À la fin de leur article les auteurs suggèrent que les étrangers pauvres récemment arrivés sur le territoire de la Région de Bruxelles-Capitale sont sans doute parmi les premiers touchés par les difficultés d'accès à l'eau. Il y avait à Bruxelles en 2020 plus de 50 000 étrangers en situation irrégulière et pendant les

Fontaine d'eau à Bruxelles. Photographie de Xavier May (2), IGEAT, université Libre de Bruxelles.

fêtes de fin d'année 2022-2023, on ne comptait pas moins de 10 000 personnes sans abri : (www.lemonde.fr/article/2022/12/22/ international international/a-bruxelles-une-nouvelle-crise-migratoire_6155391_3210.html).

Pour Bruxelles, les « perspectives sont plutôt sombres » notent les responsables de l'équipe de l'ULB.

RÉFÉRENCES

(1) Vincent A, Fleury P (2021) Reconquérir la qualité de l'eau potable par le développement de l'agriculture biologique et de systèmes alimentaires dédiés. *EchoGéo* [en ligne], 57 | 2021, doi.org/10.4000/echogeo.22457.
(2) May X, Bacquaert P, Decroly J-M, de Guiran L, Deligne C, Lannoy P, Marziali V (2021). Formes, facteurs et importance de la vulnérabilité hydrique dans une métropole européenne. *EchoGéo* [en ligne], 57 | 2021, doi.org/10.4000/echogeo.22098.

Le CNRS se préoccupe d'éthique. Pour la science et pour la société.

***Michèle Leduc** est DR CNRS émérite au laboratoire Kastler Brossel à l'École normale supérieure (Paris) (ENS). Son domaine de recherche est la physique quantique. Elle a été présidente puis membre du Comets (Comité d'éthique du CNRS) entre 2012 et 2021. Elle est actuellement membre du CoFIS (Conseil français de l'intégrité scientifique).*

Il y a déjà près de 30 ans que le CNRS s'est doté d'un Comité d'éthique, le Comets. Ce Comité est une instance consultative et indépendante dont les avis sont rendus publics. Placé auprès du Conseil d'administration du CNRS et avec une possibilité de s'autosaisir qu'il utilise largement, il peut aborder librement la portée éthique des grands enjeux liés à la recherche. Il rend des avis, 43 à ce jour, assortis de recommandations destinées aux personnels et aux institutions de recherche, en premier lieu le CNRS. Il a l'ambition plus générale de développer une réflexion sur les questions éthiques suscitées par la recherche scientifique dans toutes ses dimensions.

D'une part le Comets a la mission de dégager les principes qui sous-tendent les activités de recherche, les comportements individuels, les attitudes collectives et le fonctionnement des instances de l'organisme. Il a ainsi le rôle de sensibiliser les personnels de la recherche à leur responsabilité dans l'exercice de leur métier, en soulignant le juste équilibre à trouver entre leurs obligations et leur liberté individuelle. D'autre part, dans une perspective plus générale, le Comets développe une réflexion éthique sur les conséquences morales et sociales de l'exercice de la science et questionne les situations nouvelles que celle-ci fait naître. Il est évidemment mobilisé par tous les grands défis pour l'avenir de l'homme et de la planète (le climat, la biodiversité, la pollution, la sécurité, etc.) : il peut éclairer ces thèmes, en général sensibles, mais sans s'autoriser à prendre parti dans les controverses.

Le Comets n'est pas mandaté pour donner des évaluations éthiques sur des projets de recherche - d'autres comités s'en chargent. Il n'est pas non plus accrédité pour traiter les cas particuliers des personnels qui parfois s'adressent spontanément à lui pour révéler des conduites supposées non conformes à l'éthique – il les renvoie vers les instances appropriées dans les établissements concernés. Ses réflexions sont plutôt inspirées des préoccupations qui lui remontent du milieu des chercheurs[1], dont ses membres sont tous issus. Les comités d'éthique sont nombreux dans l'ESR (Enseignement supérieur recherche). Beaucoup s'assurent du respect des lois, dont celles de la bioéthique, encadrant par exemple l'utilisation des animaux en recherche ou les travaux faisant intervenir des humains. L'éthique au Comets n'est pas positionnée sur de telles activités opérationnelles.

Le Comets a un rôle moins focalisé et se présente plutôt comme un *think tank* en appui au CNRS. Il est formé d'un président ou une présidente et de 12 membres qui ne sont pas élus mais cooptés et approuvés par le Conseil d'administration. Six invités peuvent participer aux travaux du groupe, issus des instances dirigeantes du CNRS et aussi du CCNE (Conseil consultatif national d'éthique). Les membres du Comets peuvent appartenir à d'autres institutions que le CNRS (universités, grandes écoles, éventuellement entreprises privées). On compte trois présidentes et quatre présidents depuis la création du comité. La parité est assurée parmi les 12 membres. Ce qui fait l'originalité de ce comité est qu'il reflète globalement dans sa composition la diversité disciplinaire de l'établissement CNRS, qui couvre à peu près tous les champs de la recherche, des sciences dites exactes aux sciences humaines et sociales. Il peut en principe traiter avec pertinence de tout sujet éthique touchant à la science en général.

Ma participation au Comets s'est étendue sur 10 ans, d'abord comme présidente de 2012 à 2017 en succédant au mathématicien Jean-Pierre Bourguignon, ensuite

comme membre du comité sous la présidence de l'informaticien Jean-Gabriel Ganascia. Je commenterai ici seulement quelques avis dans lesquels je me suis particulièrement impliquée, tant pour les analyses développées que pour la rédaction des avis et de leurs recommandations.

L'avis sur *La politique de l'excellence en recherche*, élaboré après saisine par le président du CNRS, me semble l'un des moins susceptible d'obsolescence, bien que datant déjà de 2014[2]. Contrairement à certains messages récents du président actuel, cet avis affirmait, à juste titre je pense, qu'« *il existe une pyramide des compétences en recherche dont les chercheurs et les laboratoires dits d'excellence ne constituent que la pointe : nous nous interrogeons sur les relations qui devraient se développer entre la base et le sommet de cette pyramide, dans une perspective d'équité et d'efficacité* ».

LE COMETS ET L'INTÉGRITÉ SCIENTIFIQUE

L'exigence de l'excellence en recherche conduit logiquement à s'intéresser à l'intégrité scientifique, qu'on peut définir comme l'ensemble des valeurs et des règles qui garantissent l'honnêteté et la rigueur de la recherche dans l'ESR. Cette préoccupation a surgi au CNRS vers les années 2014 lorsque la grande presse a révélé un cas de falsification de résultats dans les publications d'une de ses étoiles en biologie – une affaire qui a malheureusement entraîné d'autres révélations de fraude encore plus traumatisantes pour l'institution. Avant qu'elle éclate, dès 2012, le Comets avait alerté sur la *nécessité de mise en place au CNRS de procédures en vue de promouvoir l'intégrité scientifique*[3]. Le comité s'est trouvé ensuite en bonne position pour faire des recommandations aux instances dirigeantes. L'intégrité scientifique est un volet essentiel de l'éthique de la recherche, qui a été reconnu comme tel au point d'être intégré dans la loi de Programmation de la recherche de 2021. Celle-ci a rendu obligatoire la nomination d'un Référent à l'intégrité scientifique (RIS) au CNRS (c'est même un regroupement de plusieurs RIS compte tenu de la taille de l'institution) et dans tous les établissements qui font de la recherche. Sans détailler ici toutes les méconduites possibles dans les pratiques des chercheurs, le cas le plus fréquent et bien souvent le plus douloureux est celui du plagiat, auquel le Comets a consacré un avis détaillé[4] incluant le plagiat des résultats et même celui des idées. Notons que ce texte est en passe de devenir obsolète avec les possibilités d'articles complétement fabriqués (*fake*) grâce aux récentes « avancées » de l'Intelligence artificielle : un robot dit *chatGPT* susceptible d'alimenter les moulins à papier (*paper mills*) qui vendent de faux articles scientifiques. L'apprentissage constant du robot à partir des raisonnements des humains constitue un vrai danger pour le futur de la science.

En fait la politique des publications scientifiques se modifie rapidement. Dans son avis très détaillé *Les publications à l'heure de la science ouverte*[5], le Comets s'est penché sur les mutations en cours, avec les perspectives très stimulantes offertes par un accès universel, pour tous, depuis n'importe quel lieu, et à n'importe quel moment, à l'intégralité du savoir humain. Il a tout de même souligné certains revers éthiques de l'ouverture qui, si l'on n'y prend garde, peut développer un système inéquitable créant des inégalités entre chercheurs et aussi générer des profits indus à certaines maisons d'édition.

Le questionnement sur les publications a débouché sur plusieurs thèmes qui relèvent de la déontologie de la profession de chercheur. Ainsi a été envisagé le problème des conflits d'intérêt faussant l'équité des expertises. L'avis *Des liens d'intérêts aux conflits d'intérêts*[6] souligne la distinction à faire entre conflits et liens d'intérêt. Ces liens peuvent être divers, tangibles ou intellectuels, directs ou indirects ; ils doivent donner lieu à des déclarations sans conduire à des situations de blocage par élimination excessive des compétences nécessaires. Un autre sujet relevant de la déontologie est celui des mauvais comportements des personnels les uns par rapport aux autres dans les laboratoires. Ainsi le Comets eut la relative audace de se préoccuper du *Harcèlement sexuel dans les laboratoires de recherche*[7] (avant MeToo !), en publiant un avis qui au demeurant est resté longtemps le plus cité de tous.

LA RECHERCHE AU-DELÀ DU CERCLE DE LA FRANCE

Il a paru ensuite important d'élargir la réflexion éthique sur les pratiques de la recherche au-delà du cercle de la France. C'est ainsi que le Comets a abordé la question du lien entre le droit à la recherche et les droits des populations autochtones dans son avis *La recherche un droit mondial*[8]. Ce travail a ouvert le champ à un dialogue sur la diplomatie scientifique avec le Ministère de l'Europe et des Affaires Étrangères, interrompu par la crise sanitaire mais qui pourrait reprendre. Les analyses de cet avis sont particulièrement d'actualité : « *Dans des pays où la religion a un fort impact sur la politique, les recherches non conformes au credo officiel sont menacées. La place des femmes dans l'activité de recherche y fait l'objet de luttes quotidiennes. […]. Lorsqu'un pays est en proie à une violence permanente, qu'il s'agisse d'une guerre civile ou de la terreur imposée par des groupes armés de nature politique ou mafieuse, l'activité de recherche peut être de fait limitée et le chercheur menacé* ».

Les divers volets des *Libertés et responsabilités dans la recherche académique* ont été rassemblés dans un avis[9], rédigé à l'occasion de la révision par l'UNESCO en 2016 de sa recommandation de 1974 sur la condition des chercheurs scientifiques. La réflexion sur la liberté des chercheurs y est envisagée aux plans politique, économique et sociologique, complétée de son pendant, leur responsabilité face aux grands défis lancés aux sociétés humaines. La science a certes contribué à l'accroissement du bien-être mondial et il y a tout lieu d'espérer qu'elle continuera à le faire. Pourtant certaines des applications de la recherche induisent des risques graves et irréversibles tant pour les individus que pour la planète. Le Comets dans *Science, risques et principe de précaution*[10] analyse comment ce principe inscrit dans la Constitution - à bien distinguer des mesures de prévention - offre une chance de limiter les risques potentiels mais non encore avérés de certaines technologies, par exemple du côté de la géo-ingénierie, la biologie de synthèse ou l'intelligence artificielle. La responsabilité morale des chercheurs eux-mêmes est questionnée quant aux risques occasionnés par les applications de leurs propres travaux. La réflexion se prolonge avec le tout dernier avis du Comets, sur une saisine du président du CNRS, relative à l'impact environnemental de la recherche scientifique. Comment articuler des enjeux sociétaux cruciaux avec les injonctions *a priori* contradictoires « d'excellence » et de compétitivité de la recherche ? Faut-il que l'éthique de la recherche s'enrichisse désormais d'une « éthique environnementale » ? Les réponses sont contrastées.

L'IMPACT DE LA RÉFLEXION ÉTHIQUE DU COMETS

On peut s'interroger sur l'impact de la réflexion éthique du Comets. Ses avis sont envoyés à 550 destinataires dont 368 extérieurs au CNRS). Ils sont postés sur son site internet (40 à 100 000 visites pas an) et diffusés régulièrement dans CNRS-Hebdo (141 000 abonnés) donc accessibles à tous les directeurs de laboratoire et même à tous les chercheurs du CNRS. Tous les nouveaux recrutés signent avoir reçu le guide *Promouvoir une recherche intègre et responsable*. Certains journalistes scientifiques relaient à l'occasion les recommandations ainsi affichées. L'Académie des sciences est une chambre d'écho attentive aux avis du Comets. Notons que ceux-ci sont publiés sur les archives ouvertes HAL et bénéficient d'une traduction en anglais qui favorise leur relais sur les plates-formes européennes.

A l'extérieur de l'institution CNRS, c'est à travers quelques communiqués de presse que les alertes du Comets ont eu le plus de retentissement. La crise sanitaire et les manquements à l'éthique auxquels elle a donné lieu ont fourni des occasions de rappeler les impératifs « *garantissant le caractère fiable, rigoureux et honnête des recherches* ». Le communiqué du Comets du 16 avril 2020 *Recherche en temps de crise sanitaire : débat éthiques et respect de l'intégrité scientifique*[11] a été la seule voix issue du CNRS à souligner les dérives observées dans certaines publications médicales : il a valu au Comets de se faire quelque peu bousculer sur les plateaux de télévision ! Le monde change, les canaux de communication se diversifient, il est de plus en plus difficile de distinguer le vrai du faux, la recherche et la technologie sont questionnées. Il demeure que le CNRS aura toujours besoin du socle de ses réflexions éthiques qu'il ne cesse d'enrichir.

NOTES

(1) Le terme de chercheurs désigne dans ce texte les femmes et les hommes et s'applique à tous les personnels de la recherche (chercheurs - titulaires ou contractuels, ingénieurs, techniciens et administratifs)
(2) https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2022/12/AVIS-2014-29.pdf
(3) https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2022/12/AVIS-2012-26.pdf
(4) https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2022/12/AVIS-2017-34.pdf
(5) https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2020/02/AVIS-2019-40.pdf
(6) https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2022/12/AVIS-2019-39.pdf
(7) https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2022/12/AVIS-2018-36.pdf
(8) https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2022/12/AVIS-2018-38.pdf
(9 https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2020/03/AVIS-2018-35.pdf
(10) https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/05/Avis-2021-41.pdf
(11) https://comite-ethique.cnrs.fr/comets-mis/

Une résilience ou les trois Marie-Odile, *Marie-Odile Soyer-Gobillard, 2021. NomBre7 éditions, 366 pages.*

Marie-Odile Soyer-Gobillard est directeur de recherche émérite honoraire au CNRS et ancienne directrice-adjointe du laboratoire Arago à Banyuls sur mer. Ses deux enfants, Valérie et Nicolas se sont suicidés en 1995 et 1998, respectivement à l'âge de 28 et 27 ans. C'est leur histoire, celle du combat de leur mère pour comprendre ce qui leur est arrivé, celle de sa résilience que raconte ce livre particulièrement poignant et émouvant. Tout avait bien commencé pour ces enfants brillants et affectueux jusqu'à ce qu'en fin d'adolescence, ils basculent dans une vie déséquilibrée, avec des troubles du comportement, où alternaient phases d'euphorie et de dépression jusqu'au geste fatal. Six mois après le décès de son fils, elle réalise que les troubles psychiatriques de ses enfants sont peut-être liés à la prise d'un traitement au di-éthylstilbestrol (DES) pendant ses deux grossesses, un traitement par une hormone de synthèse, couramment prescrit pour prévenir les fausses-couches. Commence alors une longue quête de scientifique, pour réunir des témoignages d'autres parents ou enfants exposés au DES, en collaboration avec plusieurs médecins, marquée par la création de l'association HHORAGES (Halte aux HORmones Artificielles pour les GrossES) en 2002. Une partie de ces témoignages complètent celui de l'auteur. Le dépouillement de l'enquête réalisée sur cette cohorte de patients, reconnue par l'Inserm établit sans ambiguïté le rôle néfaste du DES et des molécules apparentées dans l'apparition des troubles psychiatriques. Reste à comprendre les mécanismes qui produisent ces effets. La suite du livre rapporte les expériences de biologie moléculaire, menées avec Marie-Odile Krebs, professeur de médecine à l'hôpital Sainte Anne, à Paris, sur les prélèvements sanguins réalisés sur des membres de la cohorte HHORAGES. Ces expériences apportent les premiers éléments de preuve d'un effet du DES sur certains gènes humains impliqués dans le développement du système nerveux, confirmant des travaux antérieurs sur des souris. Ces effets sont de nature épigénétique et expliquent sans doute en partie les manifestations transgénérationnelles. D'autres expériences seront bien sûr nécessaires pour déterminer l'étendue de ces effets. Ces travaux mettent en évidence que les hormones de synthèse prescrites pendant la grossesse constituent une véritable bombe à retardement et un scandale médical. La dernière partie du livre met en scène la troisième Marie-Odile, la juge Marie-Odile Bertella Geffroy, qui tenta de mettre en examen les trois laboratoires pharmaceutiques responsables de la production et de la promotion du DES, alors qu'ils avaient connaissance des effets délétères sur l'animal. Il a été mis fin à ses fonctions trop tôt pour que la procédure aboutisse, mais le combat juridique de HHORAGES pour faire reconnaitre la responsabilité des laboratoires pharmaceutiques dans ce drame continue.

On ne saurait trop recommander la lecture de ce livre à tous ceux et celles qui ont été exposés au DES ainsi qu'aux médecins qui suivent les grossesses. Il est une illustration éclatante du courage d'une mère pour surmonter un drame familial et tenter d'en comprendre la cause.

Michel Delseny

Sur les pas de Lucy, Expéditions en Éthiopie, *Raymonde Bonnefille (préface de Yves Coppens), 2018. Éditions Odile Jacob, 306 pages.*

Raymonde Bonnefille retrace dans cet ouvrage la

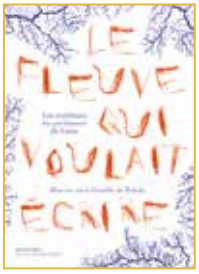
grande épopée des expéditions archéologiques et paléontologiques qui furent organisées en Éthiopie au XXe siècle et que conclut en 1974 la découverte de la plus célèbre australopithèque, Lucy, par une équipe conduite par Yves Coppens, Donald Johanson et Maurice Taïeb. Normalienne, géologue de formation et palynologue (spécialiste des pollens), la jeune chercheuse découvre à la fin des années soixante l'Afrique du rift est-africain en participant au début des années soixante-dix en Afrique de l'Est à plusieurs missions paléontologiques françaises, notamment dirigées par Yves Coppens qui lui mit le pied à l'étrier, et américaines sous la férule de Clark Howell, professeur à l'université de Berkeley, ce qui facilita la reconnaissance internationale de son remarquable travail. Elle côtoie tous les présents et futurs grands noms de la paléontologie africaine. Ses travaux la consacreront comme la spécialiste mondiale de l'utilisation des pollens pour la reconstitution de l'histoire des forêts et des paléoclimats en Afrique et contribueront à identifier l'environnement dans lequel a vécu Lucy. Mais son livre vaut aussi pour la description de la vie dans ces missions scientifiques, vie rude et rudimentaire qui n'était pas sans risque, souvent dans des conditions spartiates où les femmes étaient rares, et où les relations aussi bien avec les collègues de travail qu'avec les populations locales nécessitaient souvent de grandes facultés d'adaptation et d'ouverture mêlées d'un peu d'humilité et d'humour. Cela n'empêchait pas de nouer des amitiés solides qui résistèrent au temps. C'était aussi pour elle un premier contact avec l'Afrique qui se prolonge encore aujourd'hui

et une rencontre avec les peuples africains qui la marqua profondément.

Le hasard fit que Raymonde Bonnefille n'était pas sur place le jour même de la découverte de Lucy, bien qu'elle fît partie de l'expédition. Il n'en reste pas moins que le témoignage qu'elle donne des expéditions auxquelles elle participa très activement, est irremplaçable. Il montre clairement que cette découverte fut aussi le fruit de nombreux travaux préalables sur le terrain. Remontant aux premières expéditions du XXe siècle dont elle fait un historique détaillé et haut en couleur, ses récits mêlent les détails de la vie quotidienne qui ne manquent ni d'intérêt ni parfois de piquant et les considérations scientifiques qui permettent de mieux appréhender la genèse d'une grande découverte qui contribua à bouleverser et revoir les connaissances concernant les origines des Humains.

Véronique Machelon

Le fleuve qui voulait écrire, les auditions du parlement de Loire, *Camille de Toledo, 2021. Manuella Éditions, Paris, 380 pages.*



Ce copieux volume très ambitieux se veut « l'histoire d'un soulèvement légal terrestre » : Et si un fleuve, Loire, et les divers éléments terrestres écrivaient une constitution ? Et si les entités naturelles, rivières, montagnes, forets, océans, glaciers et sols... etaient, à force d'exploitation, de prédation, en voie d'inventer leur grammaire, exigeant leur représentation ? C'est le résultat des délibérations et auditions d'une « commission » qui se réfère à d'autres situations (Australie, Colombie, Nouvelle Zélande) pour faire attribuer à notre grand fleuve une personnalité morale et un statut juridique.

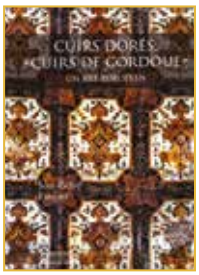
Mis en récit par l'écrivain Camille de Toledo, il a réuni plusieurs dizaines de professionnels, philosophes, juristes, écologistes, urbanistes, paysagistes et autres spécialistes du patrimoine. Les débats ont eu lieu en Touraine, principalement en l'église Saintt Libert. Le « parlement de Loire » est une démarche initiée par le Pôle Arts & Urbanisme (POLAU) à Tours. Le regretté Bruno Latour a été l'un des premiers témoins audités. Parmi les hautes références invoquées on trouve Philippe Descola et de nombreux chercheurs CNRS.

D'une agréable présentation, illustré de photos, croquis et notes manuscrites en noir et blanc, pourvu d'une large bibliographie, l'ouvrage est structuré en cinq « jours » : un soulèvement légal terrestre / à l'écoute de tous les vivants / conflits et négociations entre les espèces / vers des institutions animistes / délibération. Parmi les nombreux mots-clés on pourra retenir et approfondir : nature, Gaia, colère du vivant, homéostasie, réchauffement, eutrophisation, animisme, anthropocentrisme, contrat social, sujet de droit, logique du vivant, résilience...

Chacun pourra juger ces idées enthousiastes, audacieuses ou utopiques... Il est plus difficile de se référer à la mythologie, voire aux usages des Maoris, considérant un élément naturel comme membre ancestral de la famille, amenant la question : que veut la rivière ? et débouchant sur un animisme juridique. La question fondamentale reste : l'animal, le végétal, le fleuve et toutes les entités terrestres, peuvent-ils devenir justiciables afin que leurs droits soient opposés aux excès de l'espèce humaine ? De toute façon, comment recueillir cette volonté ou le point de vue de « Loire » pour les porter devant un tribunal (humain) et obtenir des dommages et intérêts ?

Paul Gille

Cuirs dorés, « cuirs de Cordoue », un art européen, *Jean-Pierre Fournet. 2019, éditions Monelle Hayot, 388 pages.*



Hormis quelques spécialistes et historiens d'art, qui se souvient des merveilleux cuirs dorés qui firent les délices de la Renaissance avant de disparaître peu à peu, matériellement d'abord, de la mémoire des hommes ensuite ? Jean-Pierre Fournet les a fait sortir de l'oubli où ils étaient tombés, dans un livre à la fois beau et savant, qui raconte leur histoire.

L'auteur s'attache d'abord à expliquer la partie technique. Les cuirs, de veau, de mouton ou de chèvre, étaient longuement travaillés : les peaux étaient tannées, assouplies, aplanies, taillées en « carreaux » aux dimensions d'une planche à imprimer qui permettait d'y appliquer des motifs ornementaux, puis elles étaient recouvertes de feuilles d'argent collées et polies, avant de recevoir un vernis jaune et éventuellement un décor peint. Les panneaux ainsi obtenus étaient ensuite assemblés en tentures suspendues aux murs, ou bien ils recouvraient des sièges, voire des objets.

Jean-Pierre Fournet conte ensuite l'histoire de ces décors qui étaient originaires du sud de l'Espagne où ils

avaient été mis au point sous la domination arabe, même si le cuir était déjà travaillé à Cordoue au temps de l'occupation romaine. Ils se sont diffusés un peu partout en Europe, puis, à partir du XVe siècle et surtout au XVIe siècle, des ateliers se sont ouverts en Italie, aux Pays-Bas, en Angleterre, au Portugal, en Allemagne, en Autriche, en France et même dans les pays de la mer Baltique. L'auteur a recherché patiemment comment les cuirs dorés s'étaient développés dans chacun de ces pays, il présente les centres de productions, les artistes, les commanditaires et les grands chantiers du temps. À Venise où beaucoup de Maures s'étaient installés, on trouve encore le Ponte del barcariol del cuiridoro (le pont du fabricant de cuir doré), mais à Rome, seules les sources d'archives permettent de savoir que, en 1576, le Palais Ricci-Sacchetti comportait neuf pièces ornées de cuirs dorés, chacune contenant entre quatre-vingt-dix-huit et cent-quatre-vingt-cinq carreaux, soit une surface totale de 322m^2, chaque carreau mesurant environ 0,45 m par 0,55 m. Quelques décors plus tardifs ont survécu, comme la tenture murale de cuir doré ciselé à décor de « chinoiseries » qui orne une pièce du château de Moritzburg en Allemagne, fabriquée dans la première moitié du XVIIIe siècle en Italie. En France, il est possible de voir des panneaux du début du XVIIe siècle au musée national de la Renaissance au château d'Ecouen.

Au fil du voyage, Jean-Pierre Fournet s'attache à mettre en valeur les particularités stylistiques et les influences réciproques qui confèrent aux cuirs une organisation parfois singulière comme en témoigne la mixité des styles mudejar et Renaissance. Ainsi, il n'était pas rare de voir un décor d'autel avec un thème central chrétien, encadré d'une bordure composée d'éléments géométriques, réalisée par un artisan musulman qui puisait dans son répertoire.

A la fin du XVIIIe siècle, les cuirs dorés passèrent de mode, entraînant la fermeture des ateliers. Peu à peu l'oubli s'est installé, particulièrement en France où le livre de Jean-Pierre Fournet vient combler un grand vide dans les publications sur le sujet.

***Nota** : Une longue recension détaillée de cet ouvrage, rédigée par Dominique Hervier, Conservateur général du patrimoine honoraire, paraîtra dans le Bulletin monumental (n° 181-1, Mars 2023).*

Evelyne Thomas

Tout comprendre (ou presque) sur le climat, *Bonpote, Anne Brès & Claire Marc, 2022. CNRS Éditions, 136 pages.*

Avec le bloggeur *BonPote* et la graphiste Claire Marc, Anne Brès (chargée de communication du CNRS-Insu) a orchestré ce petit livre en forme de bande dessinée pour « tordre le cou aux idées reçues » sur le climat, telles que :

- le climat change ? mais il a toujours changé !
- le CO_2 ? ce n'est pas un poison !
- les ours polaires ? ils prospèrent sur la banquise !
- prévoir le climat ? mais on n'est même pas capable de prévoir la météo de la semaine prochaine !
- de toutes façons, l'être humain s'est toujours adapté et s'adaptera encore !...

Sous la direction de Jean-François Doussin, préfacé par Valérie Masson-Delmotte, il associe Jean Jouzel et d'autres experts du GIEC, du HCC ou des labos CNRS. De forme ludique, mais de contenu très didactique, c'est donc un argumentaire critique en 20 questions à l'encontre des climato-sceptiques. Il a probablement peu de chances de les atteindre (encore moins de les convaincre), mais il vise au moins les citoyens incertains, qui ne savent pas trop et s'informent *via* internet. Il peut servir de boîte à outils, par exemple lors de la fête de la Science, vis à vis d'un public ouvert à la connaissance. Les initiés y apprendront ou conforteront différentes notions telles que la circulation de retournement ou le plan national d'adaptation.

L'ouvrage est consultable en numérique sur le site de CNRS Éditions. Pour un événement ou une exposition sur le climat, le site de l'Insu https://www.insu.cnrs.fr/fr/Kakemono-climat permet d'imprimer des « kakémonos » des 3 premiers chapitres :

- y a-t-il un consensus scientifique sur le réchauffement climatique ?
- le climat a-t-il vraiment toujours changé ?
- météo et climat, comment ne plus confondre ?

Le sujet est inépuisable, mais sa gravité est malheureusement renforcée par la canicule et autres excès climatiques de 2022.

Paul Gille

TROIS MILLIONS D'ANNÉES PLUS TARD

Le 24 novembre 1974, l'*International Afar Research Expedition (IARE)* dirigée par Maurice Taieb annonçait à la presse internationale la découverte en Éthiopie de Lucy (*Australopithecus afarensis*).

C'est en Cessna bimoteur que je vais rejoindre mes collègues dans la basse vallée de la rivière Awash où les recherches sont entreprises. Je survole le plateau éthiopien verdoyant à plus de 3000 mètres d'altitude et je distingue de rares véhicules sur une piste qui sinue au gré des montagnes. Elles s'étendent au Nord pour disparaître dans la mer Rouge au-delà de l'Érythrée. Vers l'Est apparaît le rift dont le plateau somalien s'ouvre sur le golfe d'Aden et la Somalie. C'est là que serpente la rivière Awash comme un ruban d'argent de 1200 km. Une zone de recherche géologique et paléontologique s'est établie à hauteur de l'Afar où le bassin de la vallée s'élargit sur 300 km. On le nommera le berceau de l'Humanité.

Le pilote n'a pas dit un mot depuis notre départ d'Addis-Abeba, capitale de l'Éthiopie, pour rejoindre Hadar et mes collègues à 500 km au nord. Son souci est de retrouver les siens au plus tôt, loin d'une guerre fratricide. L'aviateur m'indique un espace plat sur le plateau d'Harar où nous devons atterrir … si, suivant le protocole, un véhicule est garé en bout de piste. Mais il n'y a pas de voiture ! Après que le pilote ait menacé de repartir, Maurice et Nicole sortent de la voiture enfin arrivée en tenant leurs chapeaux contre le vent des hélices. Le Cessna se pose enfin dans un tourbillon de poussière et se positionne, moteur tournant, prêt au décollage. Les bagages, le matériel et le courrier transférés, l'avion n'est déjà plus qu'un point noir dans le ciel. Juchés au bord de l'escarpement, mes collègues m'indiquent au loin la forêt riveraine de l'Awash qui fait contraste dans cette immensité désertique.

C'est dans cette vallée fossilifère que dès 1973, un morceau de temporal d'hominidé a été dégagé, puis, à quelques dizaines de mètres, un genou, composé d'un bas de fémur et d'un haut de tibia. Ce fossile est baptisé « le genou de Claire » par Yves Coppens. L'année suivante, le dimanche 24 novembre 1974 aux alentours de midi, c'est l'allégresse. Tom Gray, doctorant-archéologue de Donald Johanson chef de l'équipe américaine, pousse des cris de joie, provoquant la curiosité de Maurice Taieb et de quelques Français à proximité. Déjà courbés sur le site, Donald et Tom étudient des éléments fossiles éparpillés sur le sable, certains recouverts d'une gangue gréseuse. Sur un pan de colline à Hadar, l'équipe a mis au jour les pièces d'un squelette dont la première s'avère être un avant-bras. Grâce à un cadre stratigraphique géologique très bien daté, les chercheurs peuvent aisément en estimer l'âge à près de 3 millions d'années. Le site est noté AL288-1. 52 pièces totalisant 40 % du squelette d'un australopithèque femelle sont collectées. La taille est estimée à 1,10 m pour un poids évalué à 25 kg. C'est le premier australopithèque aussi complet. La découverte du premier fragment présenté à Tom Gray, revient à

Camp de base à Hadar (sur la rive de la rivière Awash), de 1974 à 1976. Photographe Maurice Taieb.

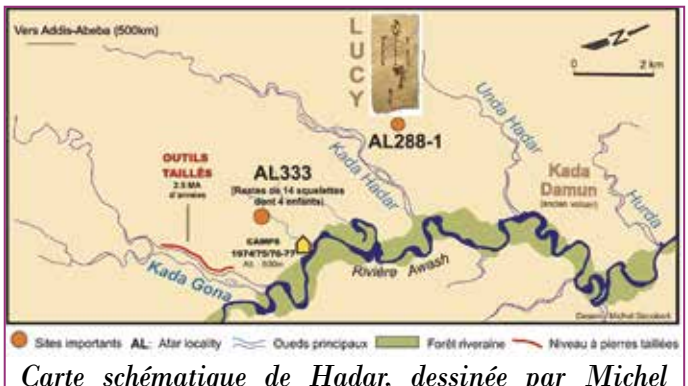
Dato, le guide Afar de Maurice. Il faudra des études complémentaires en laboratoire pour nommer une espèce nouvelle, *Australopithecus afarensis*, et déterminer un âge révisé à 3,18 millions d'années.

Le soir, l'équipe trinque joyeusement avec les canettes de bière rafraîchies dans la rivière, en prenant peu à peu conscience de la portée de l'événement. Un des magnétophones à cassettes diffuse une chanson des Beatles, *Lucy in the sky with diamonds*, et Pam Alderman, la petite amie de Donald, lance au hasard :

> « Si vous pensez vraiment que c'est une femelle, pourquoi ne pas l'appeler Lucy ? »

Ce prénom sera finalement adopté comme une évidence. Les Éthiopiens vont s'empresser de la nommer, *Dinknesh* en amharique, que l'on peut traduire par « Tu es merveilleuse », gardant ainsi son origine locale.

C'est sur ce site extraordinaire qu'en cette année 1975, après une descente chaotique sur la plaine à la limite de la résistance d'une Land Rover, je retrouve avec plaisir Pierre Planques, ingénieur IGN. Je vais lui apporter mon aide pour la réalisation d'une cartographie de 60 km². Elle servira de support à la carte géologique que je devrai dresser en laboratoire. J'effectuerai aussi les levers topographiques des divers sites en collaboration avec le chercheur concerné. Jean-Jacques Tiercelin, dit JJT, le doctorant-géologue de Maurice Taieb, m'invite aussitôt chaleureusement à partager sa tente. D'autres collaborateurs sont attendus, mais Maurice nous incite déjà, Pierre, JJT et moi, à considérer le labeur dantesque à réaliser durant ce mois de terrain.



Carte schématique de Hadar, dessinée par Michel Decobert.

Tandis que les topographes arpentent les plus hauts escarpements, les scientifiques sont accroupis autour de leurs dernières découvertes. Là, une tête entière, ici une mandibule d'*Elephas recki* (espèce éteinte d'éléphant énorme), pour les plus gros fossiles, mais aussi des fragments de crocodiles ou de rongeurs, qui semblent nous attendre depuis quelques millions d'années. Ayant étudié succinctement le débitage des industries lithiques, je repère par hasard dans la vallée du Gona, des outils taillés [1], qui datés en 1977 [2] de 2,6 millions d'années, se révèlent alors les plus anciens connus.

Alors que sur le site de Lucy, on tamise encore le sable, espérant quelques pièces supplémentaires du squelette, à 4 km de là, un autre événement se joue plus proche du camp. Quatorze fragments de squelettes dont ceux de quatre jeunes individus contemporains de Lucy viennent d'être dégagés ! Fortuitement découvert par Michèle et Daniel Cavillon de l'équipe de télévision et par Mike Bush, un étudiant américain en médecine, docteur en anthropologie. La fouille notée AL333 est située sur une petite avancée à mi-hauteur d'un escarpement difficile d'accès. C'est la première découverte d'un groupe d'hominidés organisés. Elle est majeure pour la paléontologie et aurait certainement eu la vedette si Lucy n'avait pas existé.

TF1 représentée par Pascale Breugnot, productrice, et Denis Chegaray, réalisateur, nous a rejoints sur le terrain. Avec les Cavillon, qui travaillent habituellement pour Haroun Tazieff, ils vont produire un film de 52 minutes sur nos travaux en Afar. À Addis-Abeba, l'ambassade de France invite toute l'équipe à un déjeuner royal en l'honneur du succès des recherches et d'une Lucy déjà devenue une légende grâce aux médias. Les fouilles se termineront en janvier 1977, stoppées par le début d'une guerre de quinze ans. La reprise de l'exploration et l'extension des fouilles paléontologiques, dirigées par des scientifiques éthiopiens, permettront de réunir un total de 427 fossiles d'hominidés !

RÉFÉRENCES

(1) Decobert M (2021) *Lucy : une aventure scientifique*, Paris, L'Harmattan, 238 pages. Préface rédigée par Maurice Taieb, inventeur du site de Hadar. (Ce livre a été recensé dans l'A3 Magazine n°79).
(2) Roche H, Tiercelin J-J (1977). Découverte d'une industrie lithique ancienne *in situ* dans la formation de Hadar, Afar Central, Éthiopie. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences Paris*, tome 284, série D, 1871-1874.

Michel Decobert

ROUFFIGNAC, LA GROTTE DES MAMMOUTHS

Au cœur du Périgord Noir, à quelques kilomètres de la vallée de la Vézère, la grotte de Rouffignac est un site archéologique de premier plan qu'un aménagement unique rend accessible au visiteur. En effet, depuis 1959, un train électrique circule dans les galeries ornées d'œuvres d'art vieilles de 17 000 ans. En septembre 2022, cette grotte a fait l'objet d'une visite de l'A3 lors de la sortie *en Dordogne sur les traces de Neandertal, organisée par la Représentation d'Occitanie Ouest*.

Des kilomètres de galeries !

La grotte de Rouffignac est une caverne de 8 km de galeries réparties en trois étages. Creusée par l'eau dans un calcaire riche en nodules de silex, elle est toujours demeurée accessible depuis son assèchement il y a environ 2 millions d'années. Le niveau supérieur offre les plus grands volumes avec des couloirs dépassant parfois une dizaine de mètres de large et atteignant ailleurs une douzaine de mètres de haut. Il est le seul à présenter un véritable intérêt archéologique. Les lieux furent d'abord fréquentés par les ours des cavernes, qui pendant des millénaires ont pu s'y réfugier pour hiverner. Les traces de leurs griffes apparaissent partout, souvent associées aux bauges (« nids ») que creusaient les animaux dans l'argile du sol avant d'entrer en léthargie.

L'artiste qui venait du froid

Bien plus tard, il y a seize ou dix-sept mille ans, l'Homme s'aventure dans ce labyrinthe souterrain. Le nouveau venu est *Homo sapiens*, c'est-à-dire un Homme Anatomiquement Moderne, dont le mode de vie repose sur la chasse, la pêche, la cueillette. Il est nomade et parcourt de manière saisonnière un espace géographique plus ou moins vaste. Au sein de ce territoire, son groupe connaît plusieurs lieux de campement installés en plein-air, à l'entrée d'une grotte ou au pied d'un escarpement rocheux dont le surplomb fournit un abri sûr. Imaginons ces populations évoluant dans un environnement peu boisé, plutôt steppique, lié à un climat continental froid, plutôt aride. Des images peuplent leur vie quotidienne. De nombreux objets en os, en bois de renne (parce que le renne est le gibier principal), en ivoire ou en pierre portent un décor gravé ou sculpté. A cela s'ajoute la paroi de certains abris-sous-roches, elle-même gravée, sculptée ou peinte. Bien que non conservée pour des raisons évidentes, on peut encore imaginer la décoration des vêtements, le maquillage, et l'ornementation de toute sortes d'objets en matière périssable. Ces populations ornent aussi des grottes, sans en faire des lieux de vie. Cette pratique semble se développer il y a au moins 36 000 ans (voir la Grotte Chauvet en Ardèche) et perdure jusqu'à la fin de la période glaciaire il y a une douzaine de millénaires. L'art de la grotte de Rouffignac est donc plutôt tardif associé à une phase culturelle appelée Magdalénien moyen qui constitue une espèce d'âge d'or de l'art paléolithique, par son abondance comme du point de vue stylistique par le développement d'une expression graphique « naturaliste », c'est-à-dire faisant la part belle au rendu des détails anatomiques, au respect des proportions et à une mise en perspective proche de celle que nous pratiquons.

Le mammouth, le bison et les autres

Dessins noirs de bouquetins et mammouths sur le Grand Plafond.

Des mammouths partout. Le mammouth est un thème plutôt secondaire de l'art des grottes dont les vedettes sont le cheval et le bison. Pourtant, ici, 170 des 250 figurations animales évoquent ce proboscidien. Rouffignac abrite ainsi 30 % de toutes les images de mammouth de l'art pariétal paléolithique européen. Outre le mammouth, le bison, le cheval, le bouquetin et le rhinocéros laineux sont représentés. Les mammouths ne sont pas seulement les plus nombreux, ils sont aussi les seuls animaux partout présents dans la grotte. Souvent, ils apparaissent en petits groupes où ils sont les seuls protagonistes ; parfois, on les retrouve accompagnés des autres animaux. Globalement, ils semblent former le motif fondamental dans la grotte.

La composition en frise est une autre originalité du site. Les images (mammouths en priorité) sont distribuées sur la paroi ou le plafond pour former des séries de sujets en file indienne et/ou en vis-à-vis. La grande Frise des dix Mammouths dans la galerie Henri Breuil donne l'exemple le plus spectaculaire de ce type de construction.

Le dessin noir règne en maître. Bien qu'une majorité de figurations soient gravées, 40 % environ des œuvres sont dessinées et le seul pigment utilisé est un matériau noir à base de dioxyde de manganèse utilisé comme un crayon. Ni ocre, ni charbon de bois, et pas de peinture. Ce choix technique exclusif est exceptionnel. En général, en plus des gravures qui dominent souvent, une grotte livre des images noires et des images rouges, dessinées et/ou peintes.

Une expression non figurative originale. L'art paléolithique est constitué de figurations animales mais aussi, et en proportion considérable, de tracés ou de motifs qui ne font référence à aucun objet ou être vivant observable. On parle à leur propos d'art d'abstrait ou non figuratif. À Rouffignac, l'essentiel des ces graphismes fut obtenu par le tracé digital, c'est-à-dire la gravure avec le doigt sur une paroi ou un plafond suffisamment altéré pour être entamé par le simple passage du doigt. En bandes parallèles, en tracés ondulés dits « serpentiformes » ou sous la forme de longues lignes plus ou moins enchevêtrées, ces tracés digitaux abstraits couvrent environ 500 m² de parois ou de plafonds dans la grotte. C'est aussi avec cette technique que furent réalisés des signes géométriques singuliers : les « tectiformes ». Ces motifs triangulaires ou pentagonaux, construits autour d'un axe vertical de symétrie, ne sont connus que dans quatre grottes ornées magdaléniennes de la vallée de la Vézère.

La dispersion. En l'état actuel des découvertes, la grotte de Rouffignac est celle où la dispersion des images est la plus grande. Ainsi les artistes ont-ils distribué leurs œuvres sur près de 3 km de galeries. Pour autant, cette répartition n'est ni homogène, ni aléatoire avec une zone de forte densité des images qui réunit 60 % des œuvres dans deux galeries adjacentes entre 700 m et 1 km de l'entrée, et des secteurs périphériques qui livrent de petits groupes disséminés. De plus, existe une relation forte avec les puits d'accès aux niveaux inférieurs, à proximité desquels les images sont plusieurs fois regroupées. Le Grand Plafond est ainsi l'ensemble le plus riche avec 65 dessins réunis au plus près du puits le spectaculaire de la grotte.

Des images pour quoi faire ?

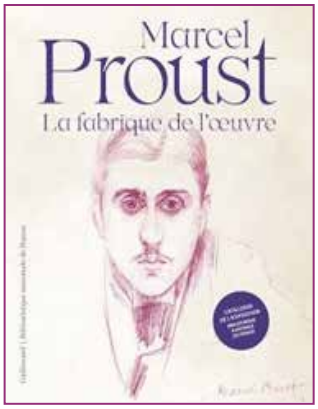
Bien que l'interprétation détaillée de l'art des grottes ne soit pas possible, quelques constats s'imposent. Le premier d'entre eux est la pérennité de cette pratique pendant près de 25 000 années en Europe, conduisant à la figuration des mêmes espèces animales (6 espèces de grands herbivores correspondant à 80 % des figurations) suivant des conventions graphiques constantes dans un environnement improbable qu'aucune contingence matérielle n'impose : la grotte. Une autre observation est la dimension probablement assez marginale de cette pratique dans des groupes humains qui ont produit de très nombreuses images dans leur quotidien à la lumière du jour. On peut en déduire que les images des grottes prenaient, de par leur localisation, une signification et une fonction différentes d'images analogues créées à l'extérieur. Ce sont donc des images signifiantes dans des lieux signifiants. Le plus vraisemblable est que cette pratique, qui ne répond à aucun impératif technique évident, ait été liée à des croyances dont le contenu nous échappe. En outre, la stabilité des choix iconographiques, leur faible diversité, l'association entre abstrait et figuratif laisse penser que cette expression est le résultat de conventions culturelles inscrites dans la durée et assimilables à un système symbolique de représentation. La figuration d'un cheval, par exemple, dit ainsi plus que l'évidence zoologique qu'elle véhicule. Derrière une lecture naïve, au premier degré, on peut soupçonner l'existence d'une signification fondée sur des arbitraires culturels auxquels nous sommes étrangers et dont le contenu nous est inaccessible. S'il n'est donc pas possible de préciser la signification de cet art, ni la place qu'il tenait dans la vie de ceux qui l'ont produit, on peut au moins affirmer qu'il joua un rôle suffisamment important dans leur culture pour avoir été transmis sur environ un millier de générations au travers de l'Europe.

Frédéric Plassard

Frédéric Plassard est responsable de la grotte de Rouffi- n u h#p#h?j j v t #w#j n u À #s #h |p Àkp#s| l#F #
2022. Il est docteur de l'université de Bordeaux en Géologie du Quaternaire et Préhistoire, et rattaché à l'UMR 5199 PACEA de l'universite de Bordeaux. Frédéric Plassard s'intéresse principalement à l'art Paléolithique. Il a récemment co-dirigé une synthèse consacrée au bouquetin dans l'art préhistorique, publiée en hommage à Jean Clottes, Conservateur général du patrimoine honoraire et spécialiste des arts préhistoriques (Bouquetins et Pyrénées, 2021, Presses universitaires de Provence).

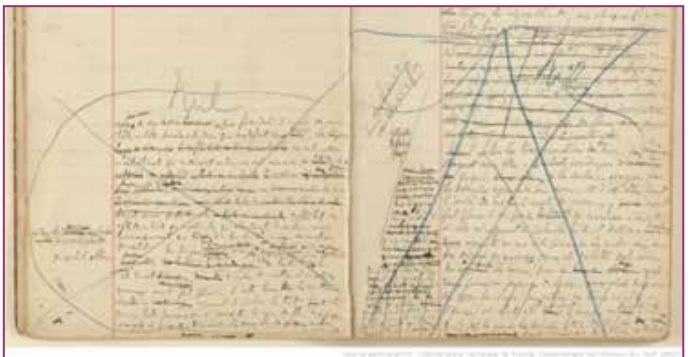
MARCEL PROUST (1871-1822)

Le 22 janvier 2023 s'achevait la très belle exposition : *Marcel Proust, la fabrique de l'œuvre* à la Bibliothèque nationale de France. L'ouvrage du même nom publié sous la direction d'Antoine Compagnon, Guillaume Fau et Nathalie Mauriac Dyer prolonge cet évènement organisé dans le cadre de la commémoration du centenaire de la mort de Marcel Proust (1871-1822). Plus qu'un simple



catalogue, le livre en forme d'abécédaire trace le parcours de la création d'*À la recherche du temps perdu* dont la publication s'étend de 1913 avec *Du côté de chez Swann* et s'achève en 1927 avec celle posthume du *Temps retrouvé*.

L'auteur a toujours écrit sur des cahiers d'écolier et sur des carnets qui renvoient aux cahiers à partir de 1909, s'ajoute la dactylographie. La BNF conserve le fonds le plus important de manuscrits de Marcel Proust. Longtemps accessible sur microfilms, en 2008, la Bibliothèque a fait le choix de le numériser grâce aux différents programmes menés par l'équipe Proust de l'ITEM (Institut des textes et manuscrits modernes) dirigée par Nathalie Dyer-Mauriac (UMR 8232 – CNRS/ENS). La collaboration entre chercheurs et conservateurs a permis de mettre l'ensemble des manuscrits en accès libre et gratuit à tous sur Gallica (http://www.item.ens.fr/fonds-proust-numerique/).



Exemple d'un manuscrit de Proust. Source : gallica.bnf.fr

Dans les dernières pages du Temps retrouvé le narrateur prend la décision d'écrire : « …car épinglant ici un feuillet supplémentaire je bâtirais mon livre, je n'ose pas dire ambitieusement comme une cathédrale, mais tout simplement comme une robe ». Pour les admirateurs nombreux de Marcel Proust le livre Marcel Proust, *La fabrique de l'œuvre* nous invite dans l'atelier de travail de l'auteur. Il célèbre la beauté du texte et de la langue.

Dominique Simon

GESTION DE L'EAU EN AGRICULTURE : LE MICROBIOME DU SOL, UN OUTIL BIOLOGIQUE SOUS EXPLOITÉ

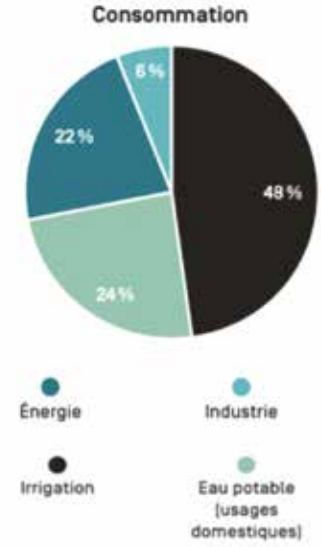


Fig. 1 : Eau consommée (eau prélevée - eau restituée) par secteur d'activité en France (extrait de Ressources, la revue de l'INRAE du 1.6.2022).

Si on regarde la consommation d'eau douce en France par secteur d'activité, basée sur la différence entre la quantité prélevée et celle restituée, on constate que l'agriculture est de loin la plus gourmande, avec 48 % destinée à l'irrigation (Fig. 1). Une grande partie de l'eau prélevée pour des fins agricoles est déplacée suite à l'évapotranspiration des sols et des plantes, pour être réintégrée dans le cycle de l'eau sous forme de vapeur, avant de retomber ailleurs sous forme de précipitations.

Repenser les pratiques en agriculture : agroécologie et agriculture de conservation

L'augmentation de gaz à effet serre est une des causes majeures du dérèglement climatique qui perturbe le cycle de l'eau et rend la disponibilité de cette ressource plus aléatoire. L'agriculture, notamment par sa capacité à stocker du carbone dans les végétaux et dans les sols, peut être source de solutions pour limiter le changement climatique à condition toutefois de l'orienter vers des pratiques adaptées. Non seulement des nouveaux systèmes agricoles plus économes en eau doivent être conçus, mais ces nouvelles pratiques doivent aussi permettre d'agir sur la cause du manque d'eau, c'est-à-dire atténuer le réchauffement climatique, en favorisant le stockage de carbone et surtout en diminuant les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, dans cette perspective l'agriculture intensive et ses pratiques d'aujourd'hui doivent être modifiées.

Pour cela il est nécessaire de se tourner vers l'agroécologie et ses nouveaux concepts de production. En clair, plutôt que de cultiver la variété (ou d'élever la race animale) la plus performante dans un environnement homogène et contrôlé par l'utilisation d'intrants (y compris l'eau), il faut combiner une diversité de variétés et d'espèces pour adapter l'agriculture à des conditions climatiques fluctuantes, la rendre moins vulnérable et augmenter sa résilience. L'agriculture de conservation,

une nouvelle forme de production végétale qui se fait jour au sein de l'agroécologie, développe des pratiques culturales basées sur trois piliers : (i) une perturbation mécanique minimale du sol, ce qui perturbe au minima les réseaux microbiens, (ii) le maintien d'une couverture organique du sol, ce qui enrichit et réduit l'évaporation, et (iii) une diversification et un allongement des rotations et dans les rotations, ce qui réduit les risques de développement de maladies. De ce fait, elle peut rendre les systèmes de production moins vulnérables et plus résilients aux aléas du climat.

En ce qui concerne l'eau, on observe que la « réserve utile en eau » augmente dans les sols non travaillés de 8 à 15 % par rapport à des sols travaillés ; non seulement, ce système est aussi plus productif en biomasse : + 15 à 20 % (P Mollier, L Alletto, dans Ressources, la revue d'INRAE, 1.06.2022). Diverses explications sont avancées : (i) présence des galeries de vers de terre, (ii) réseaux de racines plus profondes et (iii) microbiotes telluriques plus abondants. Si les deux premières hypothèses paraissent vraisemblables, la troisième peine à être reconnue malgré des résultats probants.

Le microbiome tellurique : le cas des symbiotes racinaires
Dans la nature la diversité des plantes et leur fitness doivent beaucoup à la présence dans et autour des racines d'un microbiome tellurique composé de combinaisons de microbiotes bénéfiques ayant des fonctions complémentaires dans le développement et la santé des plantes. L'utilisation raisonnée du microbiome tellurique devient donc un facteur incontournable dans une agriculture plus économe en eau.

Parmi ces microbiotes, ceux qui colonisent les tissus racinaires formant des symbioses sont des acteurs majeurs du microbiome du sol ; ils modifient l'architecture des racines de même que l'environnement d'alentour. Bref, d'une part, les champignons symbiotiques formant des mycorhizes créent un continuum racines-sol qui permet aux plantes de mieux explorer le sol à la recherche d'eau et de nutriments. Continuum qui est interrompu par le labour du sol pratiqué en agriculture conventionnelle. Les bactéries symbiotiques, d'autre part, fournissent de l'azote à la plante en créant des nodosités fixatrices de l'azote atmosphérique au niveau des racines de légumineuses (voir l'article de Selosse et Gianinazzi-Pearson, A3 Magazine n° 76).

Ces deux microsymbiotes peuvent modifier l'empreinte racinaire dans le sol et améliorer la résistance végétale au déficit hydrique. Par exemple, chez le pois, la sécheresse induit la sécrétion par les racines nodulées d'acides aminés (comme la proline, l'homoserine et l'alanine) qui limitent le dessèchement du sol et aident la plante à mieux résister au manque d'eau. Le réseau fongique extra radiculaire des mycorhizes sécrète aussi des composés organiques, en particulier une glycoprotéine, la glomaline, tolérante à la chaleur et qui aide à la rétention de l'eau dans le sol. Ce rôle du microbiome tellurique mérite plus d'attention, car non seulement il augmente la résilience de la plante à la sècheresse, mais la sécrétion de composés carbonés pourrait participer à la séquestration du carbone dans le sol et ainsi à la réduction d'émissions de gaz à effet serre.

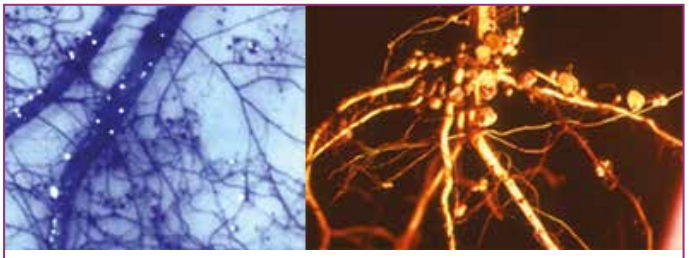


Fig. 2 : Réseaux fongiques des mycorhizes créant un j v u | p#yuhÉj Épt u# l#z hl Éz j#ts v k v#z ä p h | À#z p j *de l'azote sur une racine de soja (à droite). ©Silvio Gianinazzi.*

CONCLUSION

Au vu des changements climatiques qui se dessinent et l'inquiétante avancée de la dégradation de terres agricoles, l'évolution vers une agriculture respectueuse de l'environnement, non polluante et plus économe en eau est inévitable. Selon la FAO plus de 40 % des terres cultivables sont dégradées, voir complètement improductives, un phénomène particulièrement intense dans les pays du pourtour méditerranéen où les ressources en eau sont limitées. La mise en route de pratiques agroécologiques et en particulier celles de l'agriculture de conservation (Regenerative Agriculture) offre un espoir de solution. Dans ce contexte l'intégration de techniques agricoles valorisant au mieux le microbiome du sol est incontournable, d'autant plus que le microbiome tellurique accomplit bien d'autres fonctions vitales pour les végétaux.

Silvio Gianinazzi

ALAIN ASPECT : PRIX NOBEL 2022 DE PHYSIQUE

Alain Aspect, DR émérite de CNRS, est un scientifique remarquable qui a fait des découvertes et des avancées majeures en physique quantique. En décembre 2022 il a reçu le prix Nobel de Physique pour ses expériences utilisant des photons intriqués, avec lesquels il a réalisé un test concluant sur le paradoxe d'Einstein Podolsky Rosen, un des éléments fondamentaux de la mécanique quantique. En 2005, il avait eu la médaille d'Or du CNRS, et d'autres prix comme le prix Holweck, la médaille Niels Bohr, la médaille Albert-Einstein, le prix Wolf de physique et d'autres encore, qui récompensaient ses travaux exceptionnels.

Les expériences qui lui ont valu le prix Nobel ont été réalisées au tout début de sa carrière, dans un contexte tout à fait inhabituel. Après des études secondaires au lycée d'Agen, puis une classe préparatoire à Bordeaux, il est reçu à l'ENS Cachan, il fait une licence de physique et un DEA d'optique à l'université d'Orsay, et obtient l'agrégation de physique en 1969. De 1969 à 1971, il prépare une thèse de 3e cycle à l'institut d'Optique sur l'holographie. Dans le cadre de la coopération, il part ensuite au Cameroun comme enseignant à l'Ecole normale supérieure de Yaoundé. C'est là qu'il lit le livre de Mécanique Quantique de Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu et Franck Laloë, qui le passionne et qui pour lui est une révélation sur la physique quantique. Lorsqu'il revient en France, en 1974, il obtient un poste de maitre-assistant à l'ENS Cachan et se propose de commencer une thèse de doctorat à l'institut d'Optique. Christian Imbert, professeur à l'institut d'Optique, lui donne quelques articles sur la mécanique quantique dont l'article de 1965 de John Bell.

Cet article traite de l'intrication, une propriété découverte par Einstein et présentée dans un célèbre article de 1935, qui donne lieu à de nombreuses discussions et contestations dans le monde de la physique. Car elle établit que deux particules intriquées restent dans des états corrélés, même à très grande distance et même si ces états ne sont pas prévisibles avant de les mesurer. L'article de John Bell propose des mesures détaillées permettant de vérifier si deux particules sont « intriquées » au sens quantique du terme. Ce sont les « inégalités de Bell ». Alain Aspect est passionné par ce sujet et il propose de consacrer sa thèse à ce sujet, qui est évidemment très risqué.

John Clauser (lauréat du prix Nobel avec Alain Aspect) venait de faire en 1972 une première expérience sur le sujet, qui montrait la violation des inégalités de Bell, mais qui ne répondait pas à tous les critères de l'article de Bell et chaque enregistrement prenaient plus de 200 heures. En 1975 et 1976, Alain Aspect publie deux articles où il propose des expériences pour tester les inégalités de Bell et en 1981 et 1982, deux articles donnant des résultats expérimentaux très détaillés avec des systèmes plus élaborés qui répondent aux critères de Bell, et où les enregistrements ne prennent que quelques centaines de secondes. Ces articles ont soulevé un intérêt extraordinaire dans la communauté scientifique avec des milliers de citations.

Après ces résultats remarquables, Alain Aspect s'est tourné vers diverses méthodes pour générer des états quantiques de la lumière, utilisant des atomes ou des systèmes optiques comme les fibres optiques, puis il est allé travailler avec Claude Cohen-Tannoudji sur le refroidissement et la manipulation d'atomes avec la lumière. En 1992, il retourne à l'institut d'Optique avec un poste de directeur de recherche au CNRS et crée une nouvelle équipe sur les condensats de Bose-Einstein et l'optique atomique où les atomes se comportent (un peu) comme des photons, avec un nombre impressionnant de résultats originaux.

Au cours de sa carrière, il est aussi professeur à l'Ecole polytechnique, professeur affilié à l'ENS Paris-Saclay, titulaire de la chaire Augustin Fresnel à l'institut d'Optique, et membre de l'Académie des sciences, de l'Académie des technologies et de plusieurs autres académies étrangères. Il anime pendant toutes ces années de nombreuses opérations de communication et de diffusion de la culture scientifique. Il intervient aussi beaucoup auprès des responsables politiques pour renforcer le soutien à la recherche, en insistant sur le fait que la recherche est à la base de toutes les nouvelles technologies, ce qui vrai en particulier pour la 2e révolution quantique, qui promet actuellement des développements impressionnants.

Avec ses résultats exceptionnels et son impact sociétal, Alain Aspect est une personnalité scientifique majeure au niveau mondial et nous sommes très heureux qu'il ait eu le prix Nobel de physique, qu'il méritait depuis longtemps.

Elisabeth Giacobino

JEAN-MARIE TARASCON, MÉDAILLE D'OR 2022 DU CNRS

© Frédérique PLAS / CSE / CNRS Photothèque

Jean-Marie Tarascon, mondialement reconnu pour ses travaux pionniers et ses innovations sur les batteries, a largement contribué avec ses collaborateurs aux remarquables performances des batteries de nos ordinateurs, de nos téléphones portables et de nos véhicules électriques. Originaire du Lot-et-Garonne, Jean-Marie Tarascon est un « terrien » que la chimie a fait voyager sur toute la planète. Formé à l'école de chimie de Bordeaux, il y rencontre un professeur passionnant qui l'amène à s'orienter vers la chimie des solides. La suite, c'est un post-doc dans la prestigieuse université de Cornell (USA) où il y est fasciné et séduit par l'ambiance de la recherche où se côtoient passion, émulation et grande liberté de travail. Il est ensuite recruté par les laboratoires Bell où il travaille sur la supraconductivité et a carte blanche pour explorer les propriétés des matériaux afin d'améliorer l'efficacité des batteries. À cette époque, en 1981, les objets portatifs se développent à une vitesse fulgurante et ils ont besoin de batteries. Dans ce domaine, une révolution vient d'avoir lieu : celle des accumulateurs lithium-ion (Li-ion). Jean-Marie Tarascon fait une véritable percée dans ce domaine des batteries Li-ion en remplaçant la cathode à base de cobalt par une cathode à base de manganèse, métal plus vertueux et plus performant que le cobalt. Cette technologie sera d'ailleurs utilisée par le constructeur Renault pour équiper ses premières voitures ZOE.

Poussé par l'intensification des recherches pour améliorer les performances des batteries, suite aux faiblesses avérées des batteries au plomb lors du séisme qui touche la Californie en 1989, Jean-Marie Tarascon va provoquer une nouvelle percée dans le domaine des batteries Li-ion. Il conçoit des accumulateurs plats et flexibles pour remplacer les batteries cylindriques difficiles à introduire dans les appareils connectés. C'est grâce à cette technologie, mise au point en 1994 et protégée par 25 brevets, que des batteries Li-ion peuvent aujourd'hui équiper des véhicules électriques et des smartphones. De retour en France en 1995, Jean-Marie Tarascon s'installe à Amiens où il prend la direction du Laboratoire des matériaux et où il est nommé professeur de classe exceptionnelle. Il y impulse une dynamique « à l'Américaine » comme en témoigne Mathieu Morcrette, aujourd'hui directeur de ce laboratoire, avec qui il a longtemps travaillé : « *C'est un expérimentateur, quelqu'un qui entend mettre lui-même les mains dans le cambouis, quitte à dormir au laboratoire pour surveiller une manip.* ». Soucieux de travailler dans le cadre d'un développement durable, le groupe mène des travaux pionniers, notamment sur des composés de batteries fabriqués à partir de la biomasse.

Face à la forte demande de la société connectée d'avoir des batteries toujours plus performantes, il devient évident de fédérer les efforts et les talents de la communauté scientifique. C'est ce que va faire Jean-Marie Tarascon en mettant en place dès son arrivée à Amiens une unité de prototypage, où les chercheurs de tous laboratoires peuvent venir tester le potentiel de leur produit, sans être tributaires des entreprises. C'est ainsi que naît en 2009 *Alistore*, réseau de recherche européen sur les batteries, toujours en activité. Poussé par la même volonté de ralliement, Jean-Marie Tarascon parvient à créer en 2011 un réseau français du CNRS, le RS2E (Réseau de stockage électrochimique de l'énergie) avec le fort soutien du ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche. Ce réseau, coordonné par Jean-Marie Tarascon et le Pr. Patrice Simon (Toulouse) rassemble aujourd'hui dix-sept laboratoires universitaires et autant d'industriels répartis sur toute la France. Nommé au Collège de France en 2014, Jean-Marie Tarascon s'intéresse à un nouveau mécanisme : l'anionique redox qui exploite l'activité électrochimique de l'oxygène, ce qui peut en théorie doubler les performances des batteries. Avec ses collègues, il conçoit des batteries sodium-ion (Na-ion), utilisant l'élément sodium, des milliers de fois plus abondant sur Terre que le lithium. Trente ans après la technologie Li-ion, cette nouvelle technologie plus écoresponsable est à l'aube de sa commercialisation. Pour accompagner son développement, JMT et ses partenaires du RS2E créent en 2018 la société Tiamat, spécialisée dans le Na-ion.

Soucieux de réduire l'impact négatif des batteries, Jean-Marie Tarascon se préoccupe de prolonger leur durée de vie. Afin de suivre l'état des batteries, il cherche à concevoir des batteries intelligentes équipées de capteurs permettant de mesurer en direct leurs propriétés pour mieux optimiser leur durée de vie. Ces batteries dites « intelligentes », dotées de fonctionnalités de diagnostic non intrusives, mais aussi d'autoréparation font appel à la chimie supramoléculaire. Jean-Marie Tarascon est cosignataire d'une centaine de brevets, auteur de plus de sept cents articles scientifiques, membre de l'Académie des sciences depuis 2004, et lauréat d'une vingtaine de prix prestigieux dont la médaille Lavoisier de la Société chimique de France.

Gilberte Chambaud