

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique

Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 26, printemps 2024

Les systémiques de l'eau

Res-Systemica, volume 26, article 03

La dynamique systémique de l'« eau planétaire »
Du niveau moléculaire et tellurique aux systèmes écologiques
et à la gestion de nos enjeux sociétaux

Jacques de Gerlache

34 pages

contribution reçue le 25 septembre 2024



Creative Commons

La dynamique systémique de l' « eau planétaire » :
Du niveau moléculaire et tellurique aux systèmes écologiques
et à la gestion de nos enjeux sociétaux.

Jacques de Gerlache

Plan de la présentation

1. Contexte ;
2. L'eau moléculaire, composante déterminante de tous les systèmes terrestres ;
3. L'eau, élément catalyseur fondamental de la complexité moléculaire ;
4. Les interactions entre molécules d'eau et molécules organiques ;
5. L'eau comme constituante essentielle du climat planétaire ;
6. L'eau comme milieu générateur des états vivants de la matière :
 - 6.1. Le rôle ago-antagoniste de l'eau dans l'origine de la vie ;
 - 6.2. L'eau comme soutien de la structure cellulaire ;
 - 6.3. Une forme de *confinement cellulaire*: un état nécessaire à la synthèse de macromolécules et à leur reproduction ;
7. L'état des ressources planétaires en eau : quelques indices ;
8. Une approche intégrative de la gestion des ressources en eau :
 - 8.1. La nature fondamentale de la question ;
 - 8.2. Une approche « holarchique » pour maîtriser l'évolution des systèmes aquatiques et l'exploitation humaine de l'eau planétaire ;
 - 8.3. Quels(s) statut(s) juridique(s) pour les ressources en eau ?
9. Un enjeu particulier : la gestion opérationnelle en temps réel d'une gouvernance de la gestion mondiale des ressources en eau.

1

Annexe : la question d'une possible propriété de « mémoire de l'eau »

1. Contexte

**: « Comment espérer bien nous porter, nous humains,
si le reste du monde animal va mal, si les végétaux dépérissent,
si l'environnement se dégrade ?**

**Le vivant est UN, de même que la santé de l'Océan
n'est pas séparable de celle des fleuves.**

**Voilà pourquoi tout fleuve, même le plus modeste,
même la Seine, peut prétendre à l'appellation "géopolitique ;"»**

Eric Orsenna

**« Prenez par exemple la mer constituée de milliers de vagues :
entendez-vous chacune de ces vagues, chacune des gouttes qui la composent ? »**

Gottfried Leibniz ,

Nouveaux essais sur l'entendement (1704)

**« On ne peut pas entrer une seconde fois dans le même fleuve, car c'est une autre eau qui
vient à vous ; elle se dissipe et s'amasse de nouveau ; elle recherche et abandonne, elle
s'approche et s'éloigne. Nous descendons et nous ne descendons pas dans ce fleuve, nous y
sommes et nous n'y sommes pas. »**

Héraclite

L'eau, fluide de toutes les origines omniprésent, absent, source de vie et cause de mort. Si courant, si commun que sa valeur est longtemps restée sous-évaluée. Mais il suffit que ce fluide commence à manquer pour ses usages humains pour que tout ce qu'il contribue à y constituer commence à s'écrouler. En 2022, quatre milliards de personnes subissaient déjà de graves pénuries d'eau et 80% des eaux polluées par les activités humaines sont rejetées dans des « cours d'eau » sans traitement alors que la demande en eau potable augmente de 1% chaque année.

Ivan Illich, dans un texte intitulé « H2O : les eaux de l'oubli » (1988), critiquait la réduction de l'eau à sa formule brute : « Elle est plus que ça, elle déborde. Ne pourrait-on donc voir dans l'existence de l'eau une forme de *miracle rationnel* dans l'émergence de l'Univers, un exemple paradigmatique des organisations systémiques ? Héraclite considérait que l'eau était un élément de transformation perpétuelle du monde, la continuité et le changement représentant les deux côtés du même processus de devenir. Quelle autre merveille de la Nature que l'eau regroupe en effet autant d'aspects systémiques ? Pour Géraldine Mosna-Savoie et Marianne Chassort, c'est le problème philosophique de l'eau : celui d'un composé informe mais qui creuse pourtant son sillon, qui file entre les doigts mais qui a pourtant une épaisseur ; elle ne s'échappe pas comme l'air s'envole, l'eau est à la fois pesante et légère, présente et absente.¹

Si la crise environnementale nous mobilise tant autour de l'idée de stress hydrique, de guerre de l'eau, de gaspillage, c'est parce que, pour Jean-Philippe Pierron², elle est également *une crise de la modernité* dans sa façon de symboliser l'eau : **La précarité de la nature est simultanément une crise de la culture** ; Dans son ouvrage "*Rationalités, usages et imaginaires de l'eau*", il nous explique comment la modalité de présence de l'eau nous met face à notre propre présence, comme vivant humain, qui est aussi, comme tous les vivants, une « *créature de la soif* ». Une dimension, pour nous qui nous étonnons d'être vivants sur la Terre, qui interroge notre disposition, à envisager *le sens d'une appartenance* ; il ne s'agit pas de se demander si l'eau nous appartient, mais **en quel sens nous nourrissons avec elle de certaines appartenances**. Sauver ou préserver une ressource naturelle questionne donc plus largement les réserves symboliques d'une culture dans sa capacité à redéfinir quel type de monde elle veut construire dans l'articulation avec le milieu environnant : **si l'eau est à la fois constituée et constituante des relations sociales**.

¹ <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/le-journal-de-la-philo/philosophie-de-l-eau-5563409>

² doyen de la faculté de philosophie directeur de la chaire industrielle Université Jean Moulin Lyon 3

2. L'eau moléculaire, composante déterminante de tous les systèmes terrestres.

**« S'il y a de la magie sur cette planète,
elle est contenue dans l'eau. »**

Loren Eiseley

**« Rien n'est plus doux ni plus flexible que l'eau,
et pourtant rien ne peut lui résister. »**

Lao Tseu

« Quoi de plus systémique que l'écologie ? »

Olivier Maurice

**« Nous remercions toutes les eaux du monde d'étancher notre soif et de nous donner de la force.
L'eau, c'est la vie. Nous connaissons son pouvoir sous de nombreuses formes :
chutes d'eau et pluie, brumes et ruisseaux, rivières et océans.
D'une seule voix, nous adressons nos salutations et nos remerciements à l'esprit de l'eau. »**

Discours d'action de grâce des aborigènes Haudenosaunee

Ce que l'on appelle « eau » au sein de la Terre primitive est une référence à l'atome d'hydrogène incorporé sous différentes formes dans les minéraux, les laves et les fluides. Cet hydrogène qui s'associe à l'oxygène présent dans des minéraux pour former la molécule d'eau H₂O si les conditions, notamment de pression et de température le permettent³. Dans le gaz au sein duquel se sont formées les briques des planètes telluriques, et notamment celles de la Terre, il y aurait eu déjà une vapeur d'eau ayant la bonne composition isotopique. Si des résultats (dé)montrent cette existence très précoce d'une vapeur d'eau omniprésente à la surface de la Terre contemporaine, elle n'aurait cependant pu constituer à ce stade que de l'ordre de 0,02 % de sa masse. Selon une théorie longtemps dominante, ce serait un apport tardif par des objets riches en eau, comme des comètes ou des astéroïdes hydratés, qui aurait apporté la quantité d'eau toujours présente aujourd'hui dans le manteau de la Terre, suffisante pour en former les océans.

Et si l'eau, qui couvre aujourd'hui plus de 70 % de la surface terrestre, a joué ensuite un rôle fondamental dans l'émergence de phénomènes complexes qui ont conduit à l'apparition des états dits *vivants* de la matière, c'est par sa présence à la fois à l'état solide, liquide et gazeux et son pouvoir de dissolution⁴. Cela via notamment des structures capables de capter l'énergie tellurique ou solaire et de la transformer en énergie chimique. Au point que "notre" *Planète Bleue* pourrait se nommer la *Mer* plutôt que la *Terre* ... Elle est ainsi une composante terrestre déterminante de tous les éco-systèmes organisés, étant essentielle à la vie et constituant notamment environ 60 % du corps humain.

³ <https://theconversation.com/pourquoi-y-a-t-il-de-leau-sur-terre-147783>

⁴ Éléments de géologie, 16e éd., Dunod, 2018 https://www.elements-geologie.com/IMG/pdf/lements_geologie_Renard_chap-2.pdf

L'association de l'eau et à l'existence et à la purification de la Vie elle-même est ancrée dans la plupart des religions du monde, si ce n'est dans toutes, comme en témoignent le baptême dans le christianisme et les sept rivières sacrées de l'hindouisme. Le respect et la vénération de l'eau que sont les rivières sont également sacrées dans les cultures autochtones⁵.

En raison de cette importance de l'eau pour la société - à des fins allant de la consommation et de son assainissement à l'irrigation, la navigation et la production d'énergie - la gestion de l'eau dans toutes ses dimensions a toujours été l'une des principales responsabilités des sociétés tout au long de leur histoire. Les infrastructures hydrauliques notamment ont souvent représenté un investissement majeur de la part des sociétés et ont considérablement modifié l'étendue et la fonction des masses d'eau naturelles et des cours d'eau. De fait, trois de ses dimensions essentielles, les dimensions culturelles, politiques et économiques, ont toujours revêtu une importance considérable qui sont notamment abordées dans l'initiative "Valoriser l'eau" du Groupe de haut niveau des Nations unies sur l'eau⁶, initiative qui inclut explicitement des valeurs non monétaires et tient compte des contextes culturels.

Dans ce contexte, comment les méthodes développées pour comprendre les organisations *systé(dyna)miques* dans toutes leurs composantes peut et doit mieux inspirer celles devant intégrer celles de toutes les autres formes d'organisation complexes liées à l'eau et ayant émergé sur cette planète : physico-chimique, biologiques, sociologiques, philosophiques et culturelles ; et en particulier aujourd'hui les enjeux *agricologiques*.

Il est envisagé ici de mieux comprendre comment les méthodes développées pour en intégrer la *dynamique circulaire* dans toutes ses composantes peut-elle et doit-elle mieux inspirer celles devant intégrer la dimension de circularité de toutes les formes d'organisation complexes ayant émergé sur cette planète : physico-chimiques, biologiques, certes, mais aussi sociologiques, philosophiques, culturelles et technologiques ...

3. L'eau, élément catalyseur fondamental de la complexité moléculaire⁷

Ce que l'on appelle « eau » au sein de la Terre primitive est une référence indirecte à l'atome d'hydrogène incorporé sous différentes formes dans les minéraux, les laves et les fluides. Cet hydrogène peut s'associer à l'oxygène, aussi présent dans des minéraux, pour former des molécules d'eau si les conditions, notamment de pression et de température le permettent⁸.

Si des résultats (dé)montrent cette existence très précoce d'une vapeur d'eau ayant la bonne composition isotopique dans le gaz au sein duquel se sont formées les briques des planètes telluriques, et notamment celle aujourd'hui omniprésente à la surface de la Terre, elle n'aurait

⁵ Carole Lindstrom Nous Sommes Les Protecteurs De L'eau <https://www.bookey.app/fr/book/nous-sommes-les-protecteurs-de-l'eau>

⁶ <https://www.worldwatercouncil.org/fr/retour-sur-la-conference-des-nations-unies-sur-leau>

⁷ André Brack. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 23: 3-10, 1993

⁸ <https://theconversation.com/pourquoi-y-a-t-il-de-leau-sur-terre-147783>

cependant pu constituer à ce stade que de l'ordre de 0,02 % de sa masse. Selon une théorie longtemps dominante, ce serait un apport tardif par des objets riches en eau, comme des comètes ou des astéroïdes hydratés, qui auraient apporté la quantité d'eau présente aujourd'hui dans le manteau de la Terre et suffisante pour en former les océans.

Les scientifiques ont mis en évidence que l'eau pouvait aussi revêtir un état « super-ionique », une forme cristalline aux propriétés étranges. Cette forme est introuvable sur la Terre, mais pourrait se rencontrer ailleurs dans notre système solaire. Notamment, affirment le physicien américain Marius Millot et ses collègues du *Lawrence Livermore National Laboratory* de l'université de Californie, dans le manteau des planètes géantes comme Uranus et Neptune. Ce qui, si cette hypothèse se confirme, accroîtrait la probabilité de trouver une forme de vie extra-terrestre sur ces lointaines planètes.

En revanche, les dernières découvertes battent en brèche l'idée que l'eau présente sur la Terre a elle-même une origine extraterrestre. Une équipe internationale de chercheurs, dont fait partie le Français Jean-Alix Barrat, de l'université de Bretagne-Occidentale, a publié dans « *Science Advances* » des mesures inédites de l'isotope 17 de l'oxygène contenu dans une cinquantaine de roches lunaires et des basaltes océaniques terrestres prélevés dans les fonds. Elles indiquent que la composition des roches de l'intérieur de la Terre et de la Lune est identique. « *Pendant longtemps, on a cru que l'essentiel de l'eau présente aujourd'hui sur la Terre avait été apporté tardivement, après la formation de la Lune, par des astéroïdes et des comètes. Notre travail démontre le contraire. Nous avons réussi à apporter la preuve que l'eau, formée par les gaz originels de la nébuleuse pré-solaire, a toujours été présente sur la Terre. Seulement de 5 % à 30 % ont pu venir d'ailleurs* », explique le scientifique brestois. Reste à comprendre comment l'énergie de la collision entre la Terre et la planète Théia, qui a donné naissance à notre Lune il y a 4,5 milliards d'années, ne l'a pas vaporisée.

D'après son poids moléculaire, dans les conditions terrestres standard, l'eau devrait être un gaz par comparaison avec le CO₂, le SO₂, le H₂S, etc. Mais si l'eau a pu jouer un rôle fondamental dans l'émergence de phénomènes complexes qui ont conduit à l'apparition des états dits *vivants* de la matière, c'est par sa présence à la fois à l'état solide, liquide et gazeux et son pouvoir de dissolution⁹. L'eau liquide présente en effet de nombreuses particularités qui lui confèrent des propriétés spéciales¹⁰. Les plus importantes d'entre elles sont une polarité élevée, une constante diélectrique élevée, ce qui contribue à sa capacité à établir ce que l'on nomme des liaisons hydrogène. Ce phénomène n'est pas limité aux molécules d'eau puisque des alcools présentent un comportement similaire. Cependant, le réseau polymérique de molécules d'eau qui se crée via ces *liaisons hydrogène* est si serré que le point d'ébullition de

⁹ Éléments de géologie, 16e éd., Dunod, 2018 https://www.elements-geologie.com/IMG/pdf/lements_geologie_Renard_chap-2.pdf

¹⁰ Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society, edited by Patricia A. Maurice. Copyright © 2019 John Wiley & Sons, Inc. <https://pdfs.semanticscholar.org/0459/c440bd80d371cb177da8c78086b3f5b32522.pdf>

l'eau passe de 40 °C (*température déduite du point d'ébullition des plus petits alcools*) à 100 °C (figure 1).

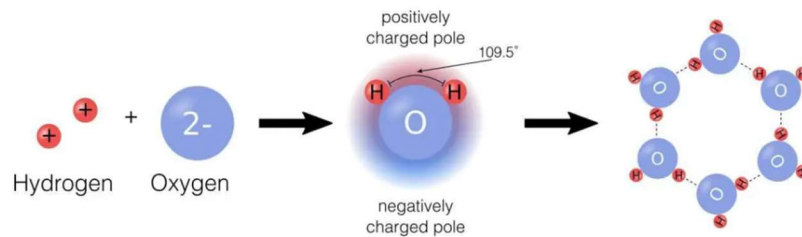


Figure 1: Water Chemistry. Water molecules are made of two hydrogens and one oxygen. These atoms are of different sizes and charges, which creates the asymmetry in the molecular structure and leads to strong bonds between water and other polar molecules, including water itself.

<https://sitn.hms.harvard.edu/uncategorized/2019/biological-roles-of-water-why-is-water-necessary-for-life/> .

L'eau ne se définit donc pas seulement par les différentes formes, liquide, solide ou gazeuse, sous lesquelles elle existe mais aussi par plus de 70 propriétés (*densité, capacité calorifique, point de fusion...*) qui, prises ensemble, diffèrent de celles de la plupart des liquides. C'est sans doute grâce à cet ensemble de particularités qu'elle a pu former le bouillon primordial de l'océan primitif qui a accueilli les premières briques élémentaires de la vie sur terre : acides aminés (la base des protéines), acides nucléiques (la base des ARN et ADN ...) marquant un risque de pénurie est de 1.700 m³/an/habitant.

6

On sait comment décrire un liquide ordinaire : il est constitué de molécules assez grosses qui n'interagissent que par des liaisons de faible énergie. A température suffisamment basse, ces interactions figent les molécules les unes par rapport aux autres et transforment le corps en solide. A l'inverse, si on élève la température, les molécules deviennent plus mobiles, tournent les unes autour des autres et limitent leurs interactions, ce qui leur permet de glisser. Rien de tel avec les molécules d'eau, Les scientifiques expliquent la fluidité extrême de ce liquide par les liaisons hydrogène découvertes en 1908 par le chimiste et prix Nobel Linus Pauling.. Grâce à cette liaison chimique, la molécule établit des ponts avec ses voisines, mais cette relation ne dure pas : en une picoseconde, soit 1 millième de milliardième de seconde, la liaison se rompt et une autre se reforme. Tout en étant très mobiles, les molécules d'eau restent ainsi reliées ensemble.

En fait, l'eau serait constituée de non pas un seul , mais de deux liquides ! Pour parvenir à cette conclusion¹¹, plusieurs équipes de chercheurs ont étudié le comportement et la structure de cette petite structure constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène en portant de l'eau ultra-pure à -44 °C , ce qui a confirmé l'existence de deux liquides différents correspondant à deux états moléculaires distincts : un de haute densité, où les molécules s'entassent les unes sur les autres, et un autre plus ordonné. Sans impuretés ni minéraux, et à condition qu'elle ne bouge pas, elle reste liquide. « Avec leur densité différente, ces deux liquides ne se mélangent pas. Ils cohabitent pour former l'eau, comme l'huile et le vinaigre dans

¹¹ Maxima in the thermodynamic response and correlation functions of deeply supercooled water.
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aap8269>

une vinaigrette », explique Anders Nilsson, professeur de physico-chimie à l'université de Stockholm et coauteur des travaux.

4. Les interactions entre molécules d'eau et molécules organiques.

En tant que molécule polaire, l'eau interagit mieux avec d'autres molécules polaires, dû au phénomène selon lequel les charges opposées s'attirent : comme chaque molécule d'eau possède à la fois une partie négative et une partie positive, chaque côté est attiré par des molécules de charge opposée. Cette attraction permet à l'eau de former des connexions relativement fortes, appelées liaisons, avec d'autres molécules polaires qui l'entourent, y compris d'autres molécules d'eau dans une propriété appelée cohésion. La cohésion des molécules d'eau aidera les plantes à absorber l'eau au niveau de leurs racines et le point d'ébullition élevé de l'eau aidera les animaux à réguler leur température corporelle.

Ce que l'on nomme l'eau d'hydratation est alors toute l'eau qui n'est pas liée au réseau fluctuant de l'eau en vrac (*eau liquide pure*) mais liée à d'autres espèces moléculaires dans la phase aqueuse¹². Souvent, l'eau d'hydratation est liée de manière plus forte et plus ordonnée que l'eau en vrac et présente donc une énergie libre de Gibbs sensiblement différente¹³. Cette eau d'hydratation peut être liée à la première ou à la deuxième enveloppe de solvation du cation ou de l'anion d'un sel résolu, ordonnée à des molécules hydrophobes. Toutes ces interactions peuvent être classées en fonction de leur énergie libre de liaison de Gibbs, qui peut être très importante.

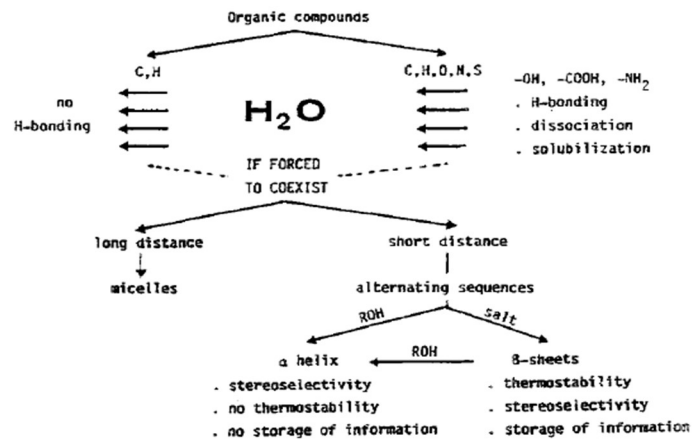
L'eau liquide est également un puissant agent hydrolytique qui permet des voies qui auraient peu de chances de se produire dans un solvant organique. Les hydrocarbures ne peuvent pas former de liaisons hydrogène avec l'eau. Ces molécules ne sont pas solubles dans l'eau et s'en échappent le plus possible. En présence d'eau liquide, ces molécules organiques doivent gérer le conflit entre les groupes hydrophobes et les groupes hydrophiles grâce aux propriétés physiques de l'eau liquide illustrées dans le schéma I. Alors que les hydrocarbures tentent d'échapper aux molécules d'eau, les molécules organiques intégrant des groupements -OH, -NH, -SH (« CHONS ») ont une certaine affinité pour l'eau, en particulier ceux qui portent des groupes ionisables.

Lorsque ces deux espèces sont forcées de coexister au sein des mêmes molécules, des liaisons hydrogène se forment alors entre molécules d'eau et molécules organiques. Cette dualité génère des topologies intéressantes et peuvent alors être associées à la formation, peut être par l'intermédiaire de la stéréotypie, de bicouches alternant des composants hydrophobes et hydrophiles ionisables et doté d'une réactivité chimique. Cela peut générer des situations prébiotiques intéressantes telles que l'agrégation stéréosélective de courtes séquences

¹² <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1873-3468.13815>

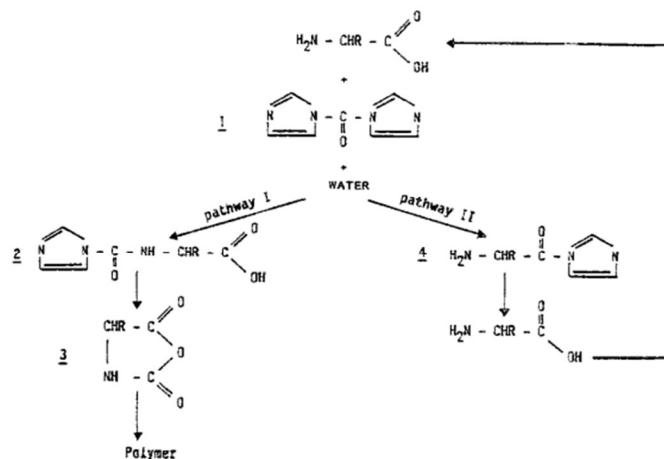
¹³ The ambivalent role of water at the origins of life <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1873-3468.13815#feb213815-bib-0043>

peptidiques de résidus hydrophobes et hydrophiles alternés en feuilles thermostables et dotées d'une activité chimique.



Scheme 1. Liquid water drives the conformation of organic molecules.

Lorsqu'elles sont séparées par de longues distances, comme dans les acides gras ou les phospholipides, des micelles, des vésicules ou « liposomes » se forment en raison du regroupement des groupes hydrophobes. Sur de courtes distances, les groupes hydrophobes et ionisables génèrent des conformations de chaînes qui dépendent fortement de leur séquence. En raison de la séquence alternée, tous les résidus hydrophobes sont confinés d'un côté de chaque brin. Les chaînes s'agrègent en bicouches asymétriques avec un intérieur hydrophobe et un extérieur hydrophile en raison du regroupement des chaînes latérales hydrophobes. En raison de la formation de la bicouche, les séquences hydrophobes et hydrophiles strictement alternées sont thermostables. Les séquences non alternées forment des hélices et qui sont thermolabiles.



Scheme 2. Liquid water allows the polymerization of amino acids via N-carboxyanhydrides.

En 1952, Miller et Urey ont injecté de l'ammoniac, du méthane et de la vapeur d'eau dans un récipient en verre fermé afin de simuler ce que l'on croyait alors être les conditions de l'atmosphère primitive de la Terre. Ils ont ensuite fait passer des étincelles électriques à

travers le récipient pour simuler la foudre. Des acides aminés, les éléments constitutifs des protéines, se sont rapidement formés. Miller et Urey ont compris que ce processus aurait pu ouvrir la voie aux molécules nécessaires à l'apparition de la vie^{14,15}.

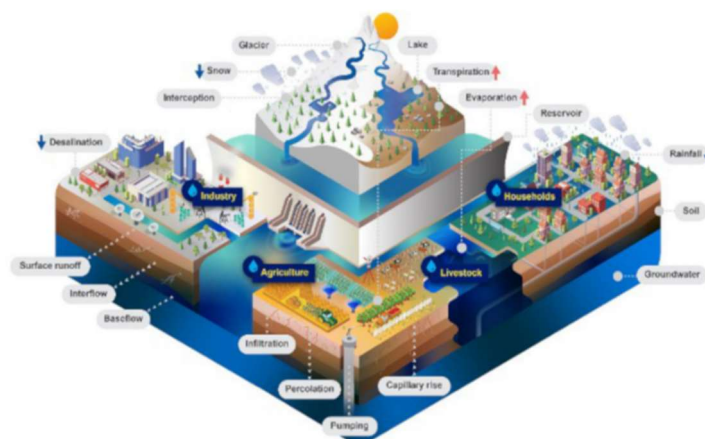
Les scientifiques pensent cependant aujourd'hui que l'atmosphère primitive de la Terre avait une composition chimique différente de la recette de Miller et Urey. Malgré cela, l'expérience a donné naissance à un nouveau domaine scientifique appelé *chimie prébiotique* ou *abiotique*, c'est-à-dire la chimie qui a précédé l'origine de la vie.

5. L'eau comme constituante essentielle du climat planétaire.

Le **cycle global de l'eau sur la planète** correspond à l'ensemble des échanges d'eau entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère¹⁶. L'eau est extrêmement mobile, ce qui lui permet de naviguer entre l'atmosphère et les réservoirs terrestres (*océans, nappes souterraines, rivières, lacs ou encore glaciers*). Sa mobilité est assurée par son changement d'état : gazeux, solide ou liquide, lui-même permis grâce au **soleil** et son rayonnement qui dégage de **l'énergie thermique** et via notamment des structures capables de capter l'énergie solaire et de la transformer en énergie chimique du fait de deux propriétés physiques qui ont des implications profondes à grande échelle :

- la densité maximale de l'eau liquide à 4 °C, avec la conséquence bien connue que la glace qui se forme à 0°C flotte sur l'eau. La glace peut donc isoler les eaux de surface qui peuvent alors rester non gelées en profondeur, ce qui permettra notamment l'hivernage des poissons et d'autres organismes aquatiques ;

- la forte chaleur de vaporisation de l'eau, qui entraîne un transport de chaleur latente associé à l'évaporation de l'eau aux basses latitudes et à sa condensation aux latitudes plus élevées. Le transfert de chaleur latente représente environ 23 % du rayonnement solaire entrant et relie les cycles hydrologiques et énergétiques de la planète.



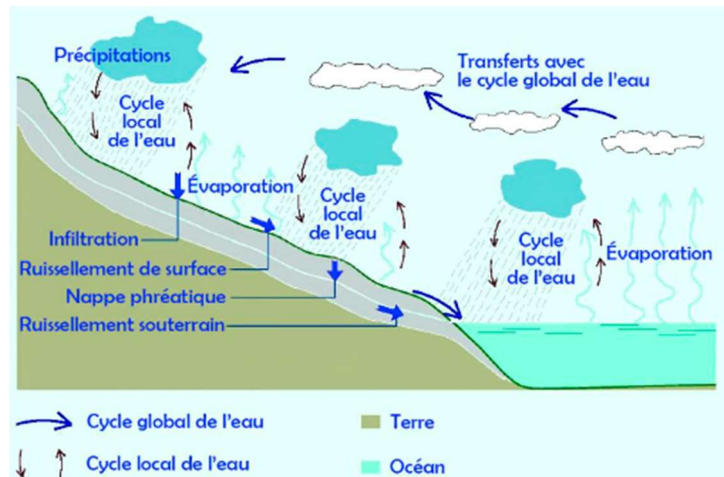
<https://www.iybssd2022.org/fr/la-modelisation-globale-des-ressources-en-eau-devient-plus-accessible/>

¹⁴ <https://news.uchicago.edu/explainer/origin-life-earth-explained#ingredients>

¹⁵ <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1432-1327.1999.00184.x>

¹⁶ <https://m.uneseuleplanete.org/Cycle-de-l-039-eau-et-Climat-les-interrelations>

A l'intérieur du cycle planétaire de l'eau, à l'échelle d'une région ou d'un bassin versant, existent aussi des **cycles locaux de l'eau**. Les processus sont identiques mais concernent des zones géographiques limitées : de l'eau évaporée retombe **localement** sous forme de pluie, elle s'infiltré ensuite, alimente les végétaux et les nappes avant de s'évaporer à nouveau. Ce qui joue donc aussi un rôle clef dans des thermorégulations locales.



<https://m.uneseuleplanete.org/Cycle-de-l-039-eau-et-Climat-les-interrelations>

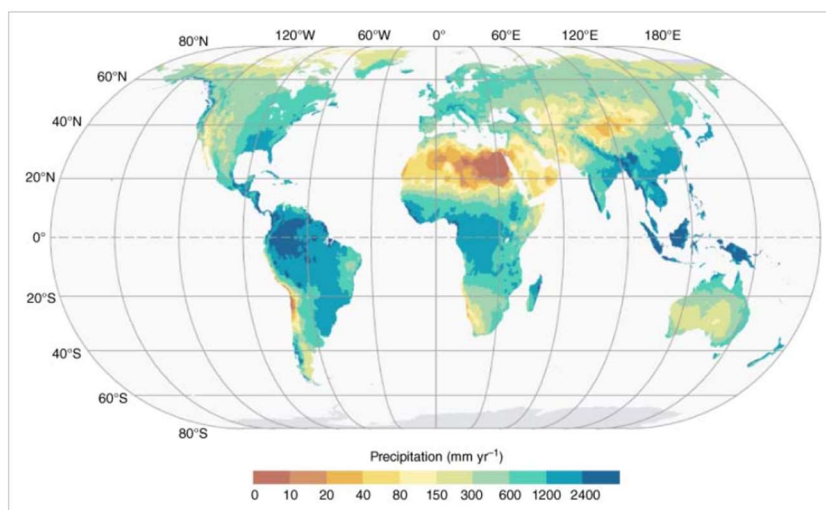
On trouve ici l'inter-relation entre eau et atmosphère : des changements dans son *effet de serre* modifient le cycle de l'eau, de la même manière que les fonctionnements du cycle de l'eau impactent cet effet : la vapeur d'eau est en effet le principal « *gaz à effet de serre* » de la planète (>60%). Cela mène à des changements dans la fréquence, l'intensité, l'étendue spatiale, la durée et le timing d'événements extrêmes dans ce que l'on nomme alors *le climat*.

10

Lorsqu'on parle de « *poumon de la Terre* », l'océan est bien plus important que l'Amazonie pour l'oxygénation de notre atmosphère : les océans à eux seuls apportent 50% de l'oxygène que nous respirons, le phytoplancton y produisant de l'oxygène grâce à la photosynthèse et à la consommation du carbone organique présent dans l'eau et sans le phytoplancton, la planète Terre serait invivable, tout simplement. *De facto*, 90% de l'habitat naturel de la terre est situé dans les océans sans compter toutes les espèces qui dépendent de l'océans (de multiples espèces d'oiseaux par exemple). Si l'on exclut les insectes, l'océan abrite la majorité des espèces vivante.

Un réchauffement atmosphérique lié à des modifications du niveau d'effet de serre se traduit par la fonte progressive des glaciers, la dilatation thermique de l'eau et par conséquent l'augmentation des niveaux des mers. Cela a un impact climatique sur la régularité des débits existants des rivières, comme ceux qui sont alimentés par la fonte de neiges. Ce qui entraîne des changements dans les volumes et la répartition des précipitations annuelles.

Des événements extrêmes vont alors impacter le ruissellement et le taux de recharge des nappes d'eau souterraine. L'écoulement des eaux peut également être affecté par l'augmentation de l'évapotranspiration.



Précipitations annuelles moyennes (1981-2010) présentées dans une projection (Eckert IV) qui reflète avec précision la superficie des terres émergées.

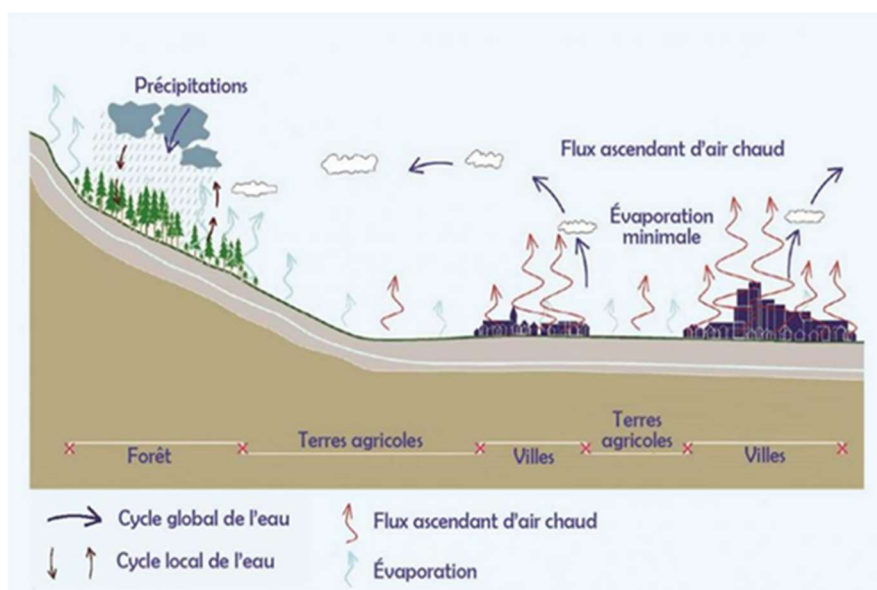
Source : Réanalyse complète des données du GPCP version 6.0 à 0,5°, précipitations mensuelles à la surface du sol provenant de pluviomètres construits sur des données historiques et basées sur le GTS.

Carte préparée par M. Epprecht, P. Vollmar et A. Weber (*Centre for Development and Environment, CDE, University of Bern, Switzerland*).

This graphic licensed to the public under a Creative Commons Attributions 4.0 license

Dans le grand cycle de l'eau, l'évapotranspiration représente de l'ordre des deux tiers du volume des échanges et avec ces évolutions climatiques, les écosystèmes d'eau douce sont particulièrement menacés du fait de la diminution des ruissellements et l'humidité des sols et la disparition d'un nombre important d'espèces aquatiques.

Et aujourd'hui l'équilibre du grand cycle planétaire de l'eau qui prévalait ces derniers millénaires est rompu, ce qui impacte directement la thermorégulation de notre planète.



<https://m.uneseuleplanete.org/Cycle-de-l-039-eau-et-Climat-les-interrelations>

6. L'eau comme milieu générateur des états vivants de la matière.

En tant que solvant, l'eau aide les cellules à transporter et à utiliser des substances essentielles comme les nutriments et les solutions à base d'eau comme le sang aideront à transporter des molécules physiologiques ou encore les médicaments, comme l'oxygène de la respiration, vers leurs cibles au sein des organismes. Dans ce contexte, la chiralité des molécules est à l'origine de tous les processus de la vie car, sans la chiralité, les grandes molécules biologiques telles que les protéines ne pourraient pas former de structures reproductibles¹⁷. Les acides aminés, les briques élémentaires des protéines, et les sucres, les glucoses et les riboses, ne se retrouvent dans les molécules organiques que sous une seule forme : gauche pour les acides aminés, droite pour les sucres. Cette configuration est indispensable au repliement des protéines et au bon fonctionnement des enzymes, catalyseurs de réactions chimiques – et donc à l'autoréplication du vivant.

C'est que les deux formes de chiralité des molécules ne sont pas interchangeable et n'ont pas les mêmes propriétés. Et cette très forte différence pourrait bien avoir des origines extraterrestres. Des grains de poussières et de glace – *produits en laboratoire et similaires aux glaces interstellaires* - soumis à un rayonnement ultra-violet dans des conditions reproduisant celles de l'espace interstellaire – ont produit un résidu organique qui contenait un excès énantiomérique significatif d'un acide aminé chiral, l'alanine. Supérieur à 1,3%, cet excès est comparable à celui mesuré dans les météorites primitives¹⁸.

6.1. . Le rôle *ago-antagoniste* de l'eau dans l'origine de la vie¹⁹.

Les molécules d'eau ne servent pas seulement de *solvant* et de réactif, elles peuvent aussi favoriser l'*hydrolyse*, un élément important du contrôle au sein des cellules du métabolisme énergétique de tous les organismes vivants. Si l'élimination d'eau par *condensation* et *polymérisation* est l'une des réactions les plus courantes dans le métabolisme qui va favoriser la synthèse au sein des cellules, la réaction inverse, l'addition d'eau, produit l'*hydrolyse* qui peut alors être chimiquement destructrice pour de nombreuses biomolécules essentielles. Par sa propriété hydrolytique, l'eau va littéralement à l'encontre de la synthèse et de l'accumulation des polymères à l'origine de la vie :

- dans un environnement où l'activité de l'eau est constamment faible, l'hydrolyse est entravée, ce qui la transforme d'un problème omniprésent en une réaction

¹⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/Asym%C3%A9trie_des_mol%C3%A9cules_biologiques

¹⁸ <https://sagascience.com/origines/emergences-de-la-vie/>

¹⁹ The ambivalent role of water at the origins of life <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1873-3468.13815#feb213815-bib-0022>

essentielle qui peut être médiée par des ions divalents comme on en trouve dans les hydrolases modernes^{20,21} ;

- dans des conditions d'activité de l'eau moyenne (et non élevée), l'hydrolyse peut être une force motrice sélective pour les molécules complexes.

Cette propriété *ago-antagoniste* de l'eau constitue l'une des questions centrales de l'origine de la vie. En effet, il y a environ 4 milliards d'années, avant que la polymérisation des nucléotides, des acides aminés ou des sucres puisse être couplée à un métabolisme énergétique élaboré, il devait déjà y avoir des moyens d'éviter la tendance naturelle à l'hydrolyse. Des activités hydriques plus faibles peuvent apporter une réponse à cette question et les parallèles entre moyens biotiques et abiotiques de contrôler l'hydrolyse afin de réduire l'écart entre les réactions biochimiques et géochimiques expliquent comment l'hydrolyse pourrait paradoxalement avoir joué un rôle constructif à l'origine de l'auto-organisation moléculaire.

Les sites géochimiques contenant moins d'eau libre et plus d'eau liée peuvent avoir fourni les conditions nécessaires aux réactions proto-métaboliques. De telles conditions se rencontrent dans les systèmes de serpentinisation, des sites hydrothermaux qui synthétisent de l'hydrogène gazeux par le biais d'interactions entre la roche et l'eau. Ainsi, via des métaux et de catalyseurs minéraux que l'on trouve également dans les systèmes de serpentinisation²², les acides organiques *formate*, *acétate* et *pyruvate* se forment facilement à partir de H₂ et de CO₂ en présence de H₂O.

Dans les pores inorganiques des roches ultramafiques, la combinaison d'une catalyse de surface minérale, d'une faible activité de l'eau et d'un apport continu d'énergie et de carbone (*en plus de l'azote et d'autres nutriments*) pourrait, en principe, conduire à des biomolécules complexes. Une telle source soutenue de "nourriture" spécifique et d'énergie est nécessaire pour l'émergence de réseaux autocatalytiques, des systèmes de réaction chimique semblables au métabolisme qui sont plus simples que le métabolisme des cellules modernes car ils se suffisent à eux-mêmes sans enzymes²³. On pense que ces systèmes de réaction sont des intermédiaires dans la transition des systèmes non vivants aux systèmes vivants^{24,25}.

Dans ce contexte, les sels minéraux exercent une influence considérable sur les caractéristiques de l'eau en tant que solvant. En créant des micro-environnements *in situ* où certains ions comme le sodium, le potassium, le magnésium, le phosphate ou le chlorure seront plus abondants que dans la masse, ils ont des effets sur la structure tridimensionnelle

²⁰ <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1014353724442>

²¹ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja0013374>

²² <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1016/j.febslet.2011.09.031>

²³ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32156207/>

²⁴ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022519386800479?via%3Dihub>

²⁵ <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsif.2018.0808?src=getftr>

des protéines et dans des conditions abiotiques, ils réguleront la réactivité de l'eau par interactions électrostatiques.

Bien que la synthèse directe d'acides aminés ou de nucléobases à partir de N_2 et de CO_2 couplés à la serpentinisation n'ait pas encore été démontrée dans les conditions de haute pression et de haute température fournies par les systèmes de serpentinisation, l'activation simultanée de N_2 , de CO_2 et de H_2 sur des surfaces minérales pourrait, en principe, conduire à des biomolécules complexes et à des monomères comprenant des acides aminés, des cofacteurs et des nucléobases, qui pourraient favoriser la formation de réseaux proto-métaboliques autocatalytiques. Ainsi, si la synthèse de substances organiques biologiques simples à partir de H_2 et de CO_2 à l'aide de catalyseurs hydrothermaux serait facile, la synthèse de biomolécules plus complexes n'a pas encore été démontrée.

De fait, des surfaces hydrophiles seront associées à une plus forte concentration d'eau, tandis que des surfaces hydrophobes feront migrer l'eau vers d'autres sites, ces interactions complexes (*hydrogénations, condensations, hydrolyse*) contribuant à accroître la stabilité thermique des macromolécules dans leur environnement aqueux. C'est cette dynamique de l'eau intracellulaire qui en résulte – parfois nommée *activité biologique de l'eau* – qui permettra la polymérisation et la conservation de l'énergie, et l'émergence d'enzymes qui contrôleront plus spécifiquement les interactions médiées par l'eau. Ce qui contribuera notamment au repliement, à la structure et à la spécificité des protéines et des enzymes.

6.2. L'eau comme soutien de la structure cellulaire¹⁶

**« Le vivant est UN,
de même que la santé de l'océan n'est pas séparable de celle des fleuves. »**

Eric Orsenna

L'eau joue donc un rôle structurel fondamental en biologie. En maintenant le volume et la structure des cellules, elle permet à tous leurs éléments d'avoir une bonne configuration au niveau moléculaire, essentielle pour les processus biochimiques. Dans de nombreuses cellules, elle crée aussi une pression qui s'oppose aux forces extérieures (figure 2).

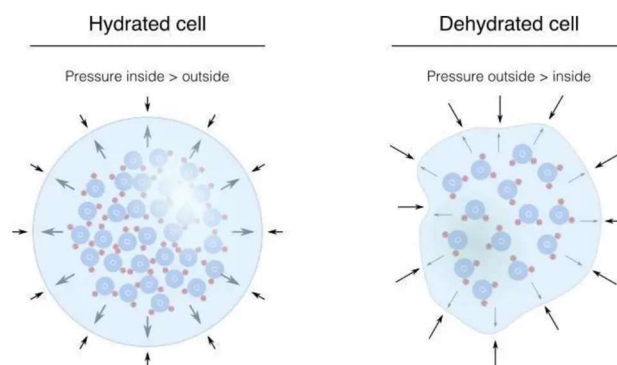


Figure 2: Water impacts cell shape. Water creates pressure inside the cell that helps it maintain shape. In the hydrated cell (left), the water pushes outward and the cell maintains a round shape. In the dehydrated cell, there is less water pushing outward so the cell becomes wrinkled.

Pour résoudre la question de la propriété d'hydrolyse, cette composante ago-antagoniste à l'origine de la vie, divers mécanismes ont été proposés. Le plus couramment rencontré évoque l'existence de cycles humide-sec^{26,27,28,29,30} qui font alterner des périodes d'hydrolyse (*forte activité de l'eau*) et de condensation (absence d'activité de l'eau) afin d'obtenir une polymérisation. L'hydrolyse devient alors une force potentiellement puissante qui pourrait avoir favorisé *l'auto-organisation* dans la chimie prébiotique.

Ainsi, une faible activité de l'eau pourrait favoriser la synthèse de peptides aléatoires, tandis que l'élimination hydrolytique des plus labiles d'entre eux enrichirait les structures non aléatoires dans le domaine des variantes synthétisées au hasard, éventuellement sans instruction génétique. Ces peptides abriterait nécessairement des surfaces structurales spécifiques, l'équivalent de sites actifs multiples et pourraient à leur tour favoriser certaines réactions cinétiquement contrôlées par rapport à d'autres, accélérant ainsi l'auto-organisation moléculaire.

Dans des conditions abiotiques, les sels minéraux peuvent avoir des effets intéressants sur la structure tridimensionnelle des protéines. Il a été démontré, par exemple, que les polypeptides homo-chiraux de leucine-lysine (Leu-Lys) se replient comme des bobines aléatoires dans l'eau pure. Mais dans le sel marin, ils forment des bicouches stables à l'hydrolyse avec les chaînes latérales hydrophiles de Lys (*groupe amino chargé positivement*) qui pointent vers l'extérieur dans la solution saline et les chaînes latérales hydrophobes de Leu (*groupe isobutyle*) qui pointent vers l'intérieur³¹. La structure des protéines plus grandes (140 acides aminés) est également influencée par des concentrations élevées de sel (jusqu'à 2 mols). Les chaînes d'acides aminés sont stabilisées par les cations du sel et les feuilles bêta se replient vers l'extérieur. Avec des acides aminés hydrophobes simples comme la leucine, l'isoleucine et la valine pointant vers l'intérieur, un noyau/poche hydrophobe peut être formé, où d'éventuelles réactions de polymérisation seraient protégées de l'environnement^{32,33}.

Ces études montrent comment les environnements à haute teneur en sel - *et donc à faible activité de l'eau* - peuvent offrir des conditions physicochimiques dynamiques de simples forces ioniques qui modulent naturellement les structures chimiques prébiotiques tout en maintenant le risque d'hydrolyse à un niveau inférieur à celui des environnements purement aqueux.

²⁶ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201503792>

²⁷ <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02248-y>

²⁸ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201808438>

²⁹ <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02639-1>

³⁰ <https://link.springer.com/article/10.1007/s10800-013-0553-2>

³¹ <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja00035a053>

³² <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1219530110>

³³ <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2013.00418/full>

6.3. Une forme de *confinement cellulaire* : une état nécessaire à la synthèse de macromolécules et à leur reproduction³⁴

Il est considéré que les premières molécules "biologiques" sur Terre auraient pu être formées par catalyse sur les surfaces cristallines de minéraux. Un système élaboré de synthèse et de décomposition moléculaires (métabolisme) aurait déjà existé sur ces surfaces bien avant l'apparition des premières cellules. Mais la vie requiert des molécules qui possèdent une propriété cruciale : la capacité de catalyser des réactions qui conduisent, directement ou indirectement, à la reproduction, donc à une forme de stockage et d'expression héréditaire de l'information. Ceci par la production d'autres types de molécules, ce qui nécessite une machinerie extraordinairement complexe qui combine ensemble des molécules protéiques et des acides nucléiques : l'ADN, et leurs intermédiaire que constitue l'ARN.

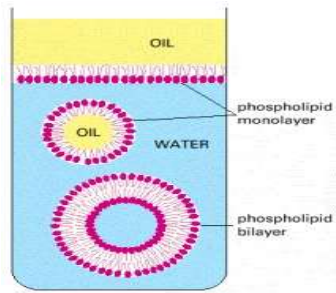
Comment, via de simples changements des paramètres physiques tels que la température, le pH et la concentration, les fluctuations des paramètres physiques naturels établis, par exemple les conditions des cycles humide-sec déjà évoqués, pourraient avoir permis la formation de telles combinaisons ? Selon une hypothèse, c'est une forme d'ARN primitif (auto-) répliquant qui aurait constitué un « biopolymère » fondamental au cours de l'évolution chimique capable de constituer une mémoire génétique d'« information » et devenant le principal catalyseur et composant structurel les réactions chimiques des protéines dans des cellules primitives.

16

Mais le mystère de l'émergence d'une forme de « code informationnel » d'une telle complexité précédant la plupart des processus biochimiques qui en assureront la pérennité et l'évolution reste une énigme scientifique absolue ...

Pour que la sélection d'un tel ensemble de molécules d'ARN en fonction de la qualité des systèmes autorépliatifs qu'elles génèrent puisse se faire efficacement, une simple adsorption sur des surfaces ou sur des particules a pu favoriser l'émergence d'une forme primitive et nécessaire de compartimentation cellulaire pour les contenir et les rendre uniquement accessibles à l'ARN qui les a générées. Ce type de confinement pouvant avoir été facilement satisfait par une classe de petites molécules, les phospholipides, qui ont la simple propriété physicochimique d'être amphipathiques, c'est-à-dire constituées d'une partie *hydrophobe* (insoluble dans l'eau) et d'une autre partie *hydrophile* (soluble dans l'eau). Les têtes hydrophiles et les queues lipophiles de ces molécules s'alignant alors à l'interface huile/eau avec leurs têtes dans l'eau et leurs queues dans l'huile. Dans l'eau, elles peuvent alors s'associer pour former des vésicules bicouches fermées dans lesquelles les queues lipophiles sont en contact les unes avec les autres et les têtes hydrophiles exposées à l'eau.

³⁴ The RNA World and the Origins of Life. Molecular Biology of the Cell. 4th edition. Alberts B, Johnson A, Lewis J, et al. New York: Garland Science; 2002. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK26876/>



Formation d'une membrane de confinement par les phospholipides

7. L'état des ressources planétaires en eau : quelques indices.

*“Comment espérer bien nous porter, nous humains,
si le reste du monde animal va mal, si les végétaux dépérissent,
si l'environnement se dégrade ?
Le vivant est UN, de même que la santé de l'Océan
n'est pas séparable de celle des fleuves.
Voilà pourquoi tout fleuve, même le plus modeste,
même la Seine, peut prétendre à l'appellation "géopolitique".*

Eric Orsenna

L'eau douce (3% du total de l'eau) est concentrée à près de 70% sous forme de glace dans la banquise, dans les calottes glaciaires des pôles, dans les glaciers des montagnes ou encore le permafrost. Les 30 autres % de l'eau douce sont stockés dans la lithosphère, c'est-à-dire dans les sols profonds non accessibles³⁵. L'eau douce restante, c'est-à-dire 1 % de l'eau douce mondiale (ou 0,025 % de l'eau totale) se répartit entre différents stocks constitutifs du cycle de l'eau :

- l'eau contenue dans la partie superficielle des sols (*nappes phréatiques*).
- les eaux de surfaces (*lacs, marais et rivières*).
- l'eau présente dans l'atmosphère (*vapeur d'eau, nuages*).
- l'eau présente dans la biosphère (*organismes vivants de toutes sortes : végétaux, animaux, bactéries, champignons*).

L'eau réellement accessible pour les activités humaines se concentre dans les eaux de surface et les nappes phréatiques superficielles : elle représente 0,015 % de l'eau mondiale³⁶.

Heureusement, bien que l'eau douce disponible ne constitue qu'une infime partie de l'eau totale de la planète, il y aurait encore beaucoup plus d'eau douce renouvelable (*c'est-à-dire les précipitations tombant sur la terre en moyenne annuelle mondiale*) qu'il n'en faudrait pour répondre aux besoins humains.

³⁵ <https://www.millenaire3.com/ressources/2019/limites-planetaires>

³⁶ How Much Water is There on Earth? https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/how-much-water-there-earth?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

La consommation d'eau s'est multipliée par six au cours du siècle dernier, soit deux fois plus vite que le taux de croissance démographique. Cette croissance dépend du développement de chaque pays, de leur population et de la ressource elle-même ;

- USA : 300 litres par jour et par habitant ;
- Europe : 100 à 200 litres par jour et par habitant ;
- Pays du tiers-Monde : quelques litres à une dizaine de litres par jour et par habitant ;

Globalement, les plus consommateurs d'eau l'utilisent davantage pour l'irrigation et l'industrie, les principales activités consommatrices d'eau étant :

- L'agriculture (*environ 45 % du total*) ;
- le refroidissement des centrales électriques (*30 %*) ;
- l'eau potable (*20 %*) ;
- les usages industriels (*5 %*).

Parmi les principaux problèmes diagnostiqués dans le système hydrique mondial, citons : la perte de biodiversité, le réchauffement climatique, l'érosion, l'eutrophisation, la contamination des nappes phréatiques, l'extraction excessive des aquifères, le blocage des sédiments sur les barrages, l'introduction d'espèces exotiques, la réduction des relations entre les écosystèmes côtiers et continentaux en raison de la diminution du débit des rivières, les micropolluants, la pollution par l'azote et la salinisation (GWSP, 2005).

18

Et parmi les principales interventions humaines qui ont un impact considérable sur le métabolisme de l'eau de la planète, on peut citer l'exploitation des aquifères, l'épuisement des réservoirs d'eau de surface (*lacs, mers intérieures, etc.*), la désertification due à la production agricole, le drainage des marais, l'érosion des sols, le déboisement et la construction de barrages.

Les principales interventions humaines et leurs effets sur le métabolisme de l'eau de la planète

Les principales interventions :

- l'exploitation des aquifères ;
- l'épuisement des réservoirs d'eau de surface (lacs, mers intérieures, etc.) ;
- la désertification due à la production agricole ;
- le drainage des marais ;
- l'érosion des sols ;
- le déboisement ;
- la construction de barrages.

Les effets de ces interventions :

- la distorsion du ruissellement de surface ;
- entraînant une réduction de la superficie des plaines inondables ;
- ce qui affecte ses schémas migratoires, et l'augmentation du temps nécessaire pour s'écouler de l'endroit où il pleut jusqu'à la côte ;
- ce qui entraîne une évaporation plus importante et réduit la vitesse de transport des sédiments ;
- ce qui perturbe la chaîne alimentaire dans les écosystèmes côtiers.

Les effets de ces interventions sont nombreux, comme la distorsion du ruissellement de surface entraînant une réduction de la superficie des plaines inondables, ce qui affecte les schémas migratoires, et l'augmentation du temps nécessaire à l'eau pour s'écouler de l'endroit

où il pleut jusqu'à la côte, ce qui entraîne une évaporation plus importante et réduit la vitesse de transport des sédiments, ce qui perturbe la chaîne alimentaire dans les écosystèmes côtiers³⁷. Les perturbations de l'écosystème entraînent une réduction de l'offre de services écosystémiques car elles réduisent le métabolisme de l'écosystème aquatique.

D'une part, il y a l'effet local généré par les capacités accrues d'extraction et de transport de l'eau, qui a permis une plus grande densité démographique dans des zones qui, à l'origine, n'auraient pas pu supporter une telle population. Mais si l'effet local peut être facilement dissipé par des zones relativement vides où l'eau est abondante, d'un autre côté, l'augmentation du métabolisme social peut être suffisamment importante pour que cette échelle ne puisse être maintenue qu'en utilisant l'eau stockée dans les aquifères et autres réservoirs souterrains, ce qui est un effet global.

Douze des principaux problèmes "systémiques" diagnostiqués dans le système hydrique mondial

- | | |
|---|---|
| 1. <u>la perte de biodiversité ;</u> | 7. <u>le blocage des sédiments sur les barrages ;</u> |
| 2. <u>le réchauffement climatique ;</u> | 8. <u>l'introduction d'espèces exotiques ;</u> |
| 3. <u>l'érosion ;</u> | 9. <u>la réduction des relations entre les écosystèmes côtiers et continentaux (liée à la diminution du débit des rivières) ;</u> |
| 4. <u>l'eutrophisation ;</u> | 10. <u>les micropolluants ;</u> |
| 5. <u>la contamination des nappes phréatiques ;</u> | 11. <u>la pollution par l'azote ;</u> |
| 6. <u>l'extraction excessive des aquifères ;</u> | 12. <u>la salinisation</u> |

(GWSP, 2005).

À partir de ce moment, il n'y a plus de capacité de l'écosystème à dissiper les impacts de ce métabolisme social, ce qui peut conduire l'approvisionnement en eau à un point de rupture. Ce processus peut être considéré comme une relation parasitaire.

Selon l'Unicef,³⁸ d'ici 2025, la moitié de la population mondiale pourrait vivre dans des régions en stress hydrique. Constat confirmé par le GIEC³⁹, qui pointe qu'« environ la moitié de la population mondiale souffre actuellement d'une grave pénurie d'eau pendant au moins une partie de l'année, en raison de facteurs climatiques et non climatiques ».

Actuellement, si 3,6 milliards de personnes se retrouvent déjà confrontées au moins un mois par an à un accès insuffisant à l'eau, d'ici à 2050, leur nombre devrait dépasser les 5 milliards. L'ONU prévoit que, d'ici à 2025, près de 1,8 milliard de personnes vivront dans des zones touchées par des pénuries d'eau. Selon AQUASTAT, le taux de dépendance en eau vis-à-vis de l'extérieur dépasse les 95 % en Égypte contre 8 % aux États-Unis. ces chiffres s'aggraveront dans le futur pour des pays comme l'Égypte, Malte, la Libye, la Jordanie, Chypre ou encore le

³⁷ Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle
<https://academic.oup.com/bioscience/article/50/9/753/269247>

³⁸ UNICEF <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>

³⁹ GIEC, « AR6 WGII : Summary for policy makers », 2022, p.9

Yémen et les Émirats du Golfe qui disposent de ressources en eau extrêmement faibles, voire quasi nulles. Le *World Resources Institute*⁴⁰ a modélisé le stress hydrique à l'horizon 2040 dans un atlas en ligne : on y voit que, selon le scénario le plus optimiste, le stress hydrique dès 2040 pourrait être très élevé dans de nombreuses régions européennes et dans le reste du monde⁴¹.

8. Une approche intégrative de la gestion des ressources en eau.

***"Tout ce dont nous avons besoin pour vivre une vie décente est directement lié à l'eau :
notre santé, la nourriture, les habitats, l'économie, les infrastructures et le climat."***

***"Il est temps aujourd'hui de surmonter les intérêts sectoriels partiels,
de regarder la situation dans son ensemble et d'avancer"***

Willem-Alexander, roi des Pays-Bas,

***« L'humanité "vampirique" a "brisé le cycle de l'eau",
mettant en danger des milliards de personnes à travers la planète. »***

Antonio Guterres, secrétaire général des Nations Unies

Première conférence de l'ONU sur l'eau^{42,43}

8.1. La nature fondamentale de la question.

Tout au long de l'histoire, la gestion de l'approvisionnement en eau et des ressources en eau a été des responsabilités centrales des sociétés civiles⁴⁴. Ces responsabilités allant de l'approvisionnement en eau pour la consommation, leur assainissement, la lutte contre les incendies, l'irrigation jusqu'à l'accaparement de terres pour la colonisation et l'agriculture. Ceci en passant aujourd'hui par la protection de la pêche et de la navigation, l'atténuation des effets des sécheresses et des inondations et la construction d'infrastructures pour le stockage, l'acheminement et la production d'énergie hydroélectrique.

Comme en témoignent les appels de plus en plus nombreux à l'intégration systémique des différentes dimensions liées aux enjeux irréductiblement complexes, la théorie de la complexité et de la résilience révèle une insatisfaction croissante, y compris à l'égard des approches de la gestion des ressources naturelles, toujours fondées sur la prise en compte d'un système unique ou « en silo ». D'un point de vue global, l'eau est un des flux dans lequel le métabolisme propre à chaque système impliqué est de remplir les fonctions nécessaires à sa résilience et à sa reproduction. Pour en comprendre et en intégrer les contraintes, la

⁴⁰ World Resources Institute, Projet Aqueduct, <https://www.wri.org/aqueduct>

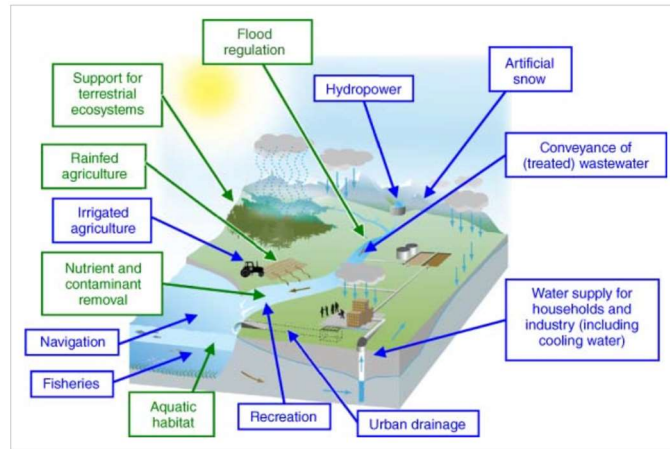
⁴¹ <https://www.cncd.be/Crise-de-l-eau-douce-le-siecle-de>

⁴² https://www.bfmtv.com/environnement/climat/rechauffement-climatique-ce-que-le-giec-preconise-pour-eviter-le-pire_AN-202303200580.html

⁴³ https://www.bfmtv.com/societe/penurie-d-eau-exode-malnutrition-l-onu-dresse-un-portrait-alarmant-de-la-terre-en-2050_AD-202106230118.html

⁴⁴ Water: The Environmental, Technological, and Societal Complexity of a Simple Substance Janet G. Hering 1,2,3 1Eawag, Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland <https://pdfs.semanticscholar.org/0459/c440bd80d371cb177da8c78086b3f5b32522.pdf>

diversité de ces fonctions nécessite l'utilisation parallèle de différents domaines descriptifs dans leurs différentes dimensions.



Direct human uses (blue) and indirect ecosystem services (green) provided by the water environment.

Graphic licensed to the public under a Creative Commons Attributions 4.0 license.

Ces dimensions sont irréductibles les unes aux autres, car ces fonctions présentent des bifurcations de forme qui rendent différents sous-systèmes, remplissant différentes fonctions dans ces domaines non équivalents car ils remplissent ces fonctions en relation avec des qualités et des réalités différentes, ce qui rend impossible l'intégration de toutes ces fonctions dans la même représentation.

Il est constaté par exemple que la gestion des écosystèmes en tant que capables de fournir un rendement constant et maximal (*comme les quotas de pêche*) ne tient pas compte du fait qu'ils sont en évolution constante, climatique, notamment, ce qui suscite de plus en plus d'inquiétudes dans la pratique. Le fait est que la variabilité est une caractéristique inhérente qui confère de la force et de la résilience à tout système et qu'elle devrait être mieux considérée par une approche conceptuelle intégrant cette complexité.

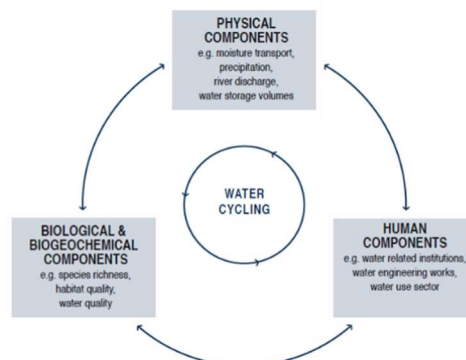


Figure 3 – Water Global System Components (GWSP, 2005, p. 18).

Du fait de la présence humaine qui a pour composantes les utilisations du sol et qui affecte l'ensemble des écosystèmes, il y a donc au minimum deux niveaux à prendre en compte dans

la gestion sociétale de l'eau : la *gestion individuelle* et la *gestion institutionnelle*. Celle-ci dépendant actuellement d'institutions – *nationales ou internationales* - actuellement encore inadaptées pour réellement pouvoir agir sur des systèmes physiques qui sont trop vastes que pour être gérés par le comportement de quelques-unes de ces institutions qui, même agrégées, n'ont pas seules le pouvoir d'affecter la situation d'ensemble des ressources en eau et leur évolutions.

La dépendance intensive et croissante des sociétés humaines à l'égard de l'eau douce entraîne des modifications majeures des masses d'eau douce utilisée, des cours d'eau et des terres adjacentes. Par exemple, on estime que plus de 400.000 km² de zones humides ont disparu aux États-Unis continentaux entre le début de la colonisation européenne au début des années 1600 et le milieu des années 1980. . Par ailleurs, l'équilibre du grand cycle planétaire de l'eau qui prévalait est rompu, ce qui impacte aussi directement la thermorégulation de notre planète.

Plus globalement, les impacts et les conséquences de ce changement sur le cycle de l'eau concernent essentiellement :

- la recrudescence des périodes de sécheresse et de fortes précipitations
- la modification de la moyenne et de la répartition géographique des précipitations .
- la modification de l'évapotranspiration .

"Nous avons brisé le cycle de l'eau, détruit les écosystèmes et contaminé les eaux souterraines".

"Nous pouvons construire des sociétés et des économies résilientes si les gouvernements et les entreprises mettent rapidement en place des politiques, pratiques et investissements qui reconnaissent, et restaurent, la pleine valeur de rivières, lacs et zones humides en bonne santé".

Stuart Orr, WWF⁴⁵

Pour évaluer la stabilité des systèmes aquatiques , il est nécessaire ici encore de mesurer ces impacts sur l'ensemble des leurs dimensions pertinentes. Ce que certains réalisent via une *holarchie*⁴⁶ dans laquelle les qualités du système sont réparties sur les trois dimensions du développement durable : environnementale, sociale et économique. Dans le domaine de la gestion de l'eau, il est possible d'y parvenir en intégrant dans une analyse intégrée les positions des différentes parties prenantes et les schémas biophysiques propres à chaque écosystème. Dans une analyse intégrée utilisant une telle *holarchie* pour structurer la situation, les rétroactions et les compromis entre les facteurs biophysiques et socio-économiques peuvent être évalués quantitativement à différentes échelles de temps, ce qui permet de traiter analytiquement toute cette complexité. Mais si seuls les facteurs biophysiques sont pris en compte et étant donné que les politiques de commandement et de contrôle et les instruments

⁴⁵ https://www.bfmtv.com/environnement/pour-le-chef-de-l-onu-l-humanite-a-brise-le-cycle-de-l-eau-sa-substance-vitale_AD-202303220539.html

⁴⁶ <https://cdurable.info/qui-n-a-pas-reve-un-jour-de-mettre-fin-a-la/>

de marché présentent des limites, le comportement des parties prenantes peut alors empêcher les politiques d'atteindre leurs objectifs,

Une évolution particulière, celle des changements voire bouleversements climatiques, qui sont aujourd'hui une réalité incontestable, se répercute fortement sur les ressources en eau. Les impacts et les conséquences de ces changements sur les cycles de l'eau concernent essentiellement la modification de la moyenne et de la répartition géographique des précipitations, la modification de l'évapotranspiration, la recrudescence des périodes de sécheresse et de fortes précipitations⁴⁷.

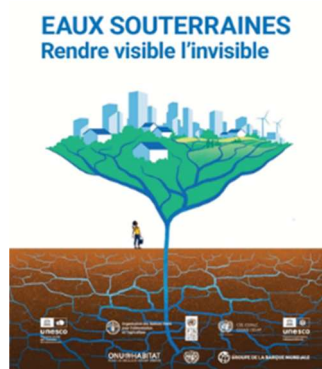
Le cycle hydrologique s'emballe en effet sous l'effet combiné des changements climatiques et des activités humaines :

- Débit des cours d'eau et débit des réservoirs : Plus de 50 % des bassins versants et des réservoirs du monde ont présenté des écarts par rapport aux conditions normales, dont une majorité étaient plus secs que d'habitude, ce qui correspond étroitement aux données de 2021, qui ont également montré des conditions majoritairement sèches ou normales. Les apports d'eau dans une sélection de grands réservoirs étudiés en 2022 ont suivi la tendance du débit général - plus de 60 % des réservoirs ont connu des apports d'eau inférieurs ou supérieurs à la normale.
- Graves Sécheresses qui touchent des régions telles que les États-Unis, la Corne de l'Afrique, l'Europe, le Moyen-Orient et le bassin de La Plata. Une sécheresse en Europe a posé des problèmes dans des fleuves comme le Danube et le Rhin et a perturbé la production d'électricité nucléaire en France en raison du manque d'eau de refroidissement. Ces régions ont également connu une diminution des apports dans les réservoirs et une baisse de l'humidité du sol et des niveaux d'évapotranspiration.
- Réduction de la Cryosphère : dans les Alpes, en 2022, la couverture neigeuse est restée nettement inférieure à la moyenne sur 30 ans, ce qui a affecté le débit des principaux cours d'eau européens ; Dans les Andes, l'enneigement hivernal a diminué, atteignant son niveau le plus bas en 2021 et se rétablissant quelque peu en 2022, ce qui a des répercussions sur l'approvisionnement en eau du Chili et de l'Argentine ; Les observations ont révélé en Géorgie, en particulier le Shkhara, un doublement des taux de fonte au cours des dernières années des glaciers et dans le *Chateau d'eau asiatique*, une modification des écoulements fluviaux dans les bassins de l'Indus, de l'Amu Darya, du Yangtze et du fleuve Jaune,
- Humidité des sols et évapo-transpiration : Tout au long de l'année 2022, des anomalies dans l'humidité du sol et l'évapo-transpiration ont fait écho aux écarts dans les conditions de débit des cours d'eau ; par exemple, sous l'effet de sécheresses pendant l'été, l'Europe connaît une augmentation de l'évapotranspiration et une diminution de l'humidité du sol.

⁴⁷ EAU ET CLIMAT - Livre bleu COP22, 2016

- Réduction de la Cryosphère : dans les Alpes, en 2022, la couverture neigeuse est restée nettement inférieure à la moyenne sur 30 ans, ce qui a affecté le débit des principaux cours d'eau européens. Les observations ont révélé dans les Andes un enneigement hivernal diminué, atteignant son niveau le plus bas en 2021 et se rétablissant quelque peu en 2022, ce qui a des répercussions sur l'approvisionnement en eau du Chili et de l'Argentine. En Géorgie, en particulier le Shkhara, on a observé un doublement des taux de fonte des glaciers au cours des dernières années ainsi que dans le *Chateau d'eau asiatique*, avec une modification des écoulements fluviaux dans les bassins de l'Indus, de l'Amu Darya, du Yangtze et du fleuve Jaune,

Il y a aussi l'importance primordiale des eaux souterraines. Présentes partout sur la Terre même si leur répartition y est inégale, elles constituent près de 99 % de toutes les réserves en eau douce liquide de la planète. Les eaux souterraines fournissent déjà la moitié de la quantité d'eau prélevée pour un usage domestique par la population mondiale et environ 25 % de toute l'eau prélevée à des fins d'irrigation, alimentant ainsi 38 % des terres irriguées dans le monde. Dans la plupart des pays du monde, seules les eaux souterraines peuvent permettre, de façon concrète et abordable, de fournir un accès de base à l'eau aux populations rurales non desservies. Ce qui procure aux sociétés d'énormes avantages tant sociaux, qu'économiques et environnementaux, notamment en matière d'adaptation aux changements climatiques.



<https://www.unesco.org/reports/wwdr/2022/fr>

Pourtant, malgré son importance capitale, cette ressource naturelle reste mal comprise et par conséquent sous-évaluée, mal gérée, voire gaspillée. C'est donc au fur et à mesure de la mise en place de réseaux d'analyses, d'interactions et de collaborations que les convictions des parties prenantes convergeront vers une conviction collective qui permettra alors la formation d'une institution plus ou moins formelle pour une gouvernance dans une *gestion en temps réel* des ressources en eau. Ainsi, l'utilisation durable de l'eau ne sera plus imposée par des agents externes, mais par ce réseau-même, ce qui en réduira les coûts et améliorera l'efficacité.

En attendant, la distribution géographique de l'eau sur la planète est des plus inégales avec un tiers de l'humanité vit dans une situation de stress hydrique c'est-à-dire avec moins de 1 700 m³ d'eau douce disponible par habitant et par an, quand la moyenne mondiale est plutôt

autour de 5 000 à 6 000 m³ ; Ceci avec 9 pays qui se partagent 60 % des ressources naturelles renouvelables d'eau douce : Brésil, Russie, Indonésie, Chine, Canada, Etats-Unis, Colombie, Pérou et Inde.

Il s'agit toujours de mieux comprendre quels sont les mécanismes qui pilotent les interactions entre océan et eau douce, les observer et les modéliser pour les surveiller et comprendre leur évolution ; de prendre en compte leurs modes de gestion (existants et envisagés) à différentes échelles spatio-temporelles, participe à une meilleure connaissance des problématiques liées aux ressources en eau et à leur qualité . Ceci à travers un dialogue entre les scientifiques et les différents acteurs de la sphère politique et de la société civile. Ce travail, fondé sur une approche interdisciplinaire et trans-sectorielle, est indispensable pour développer des solutions durables de gestion, de mitigation et d'adaptation.



<https://www.ird.fr/retrouvez-lird-au-9e-forum-mondial-de-leau-dakar>

8.2. Une approche « holarchique » pour maîtriser l'évolution des systèmes aquatiques et l'exploitation humaine de l'eau planétaire .

Dans un article sur les avantages de l'utilisation d'une structure polycentrique, comme un réseau ou une *holarchie*, pour la gouvernance de l'eau⁴⁸, il y a une analyse comparative qualitative basée sur la logique floue de 27 systèmes de gouvernance de bassins . Ceci en utilisant un ensemble d'identités basées sur deux oppositions :

- entre la *coopération coordonnée* et le *manque de coordination* ;
- entre la *centralisation du pouvoir* et la *distribution du pouvoir*.

⁴⁸ The Capacity of Water Governance to Deal with the Climate Change Adaptation Challenge. https://www.researchgate.net/publication/266563118_The_Capacity_of_Water_Governance_to_Deal_with_the_Climate_Change_Adaptation_Challenge_Using_Fuzzy_Set_Qualitative_Comparative_Analysis_to_Distinguish_Between_Polycentric_Fragmented_and_Centralized_Reg

À partir de ces oppositions, le système est représenté en termes de coopération horizontale (*entre les agents*) et verticale (*entre les agents et le système de gouvernance*) et quatre types de systèmes de gouvernance sont définis :

- coordonné et centralisé ;
- non coordonné et centralisé à la recherche de rentes ;
- fragmenté (décentralisé et non coordonné) ;
- polycentrique (décentralisé et coordonné).

En faisant abstraction des qualités des systèmes naturels non prises en compte dans ces types (identités), les auteurs classent les systèmes de gouvernance observés et concluent que la trajectoire la plus adaptative est celle dans laquelle il y a à la fois coordination et distribution du pouvoir, c'est-à-dire *les systèmes polycentriques*.

Dans les sociétés préindustrielles, l'eau était fournie à un rythme presque constant et c'est à la suite de la révolution industrielle que la capacité d'extraire et de transporter l'eau qui n'existait pas jusqu'alors a permis d'étendre considérablement son métabolisme social. Pour extraire l'eau du sous-sol et la transporter, ces sociétés pré-industrielles ne disposaient que de moyens limités et intrinsèquement liés aux services fournis par le capital naturel. Elles ne disposaient pas des flux d'énergie et des moteurs qui permettent aujourd'hui de forer de plus en plus profondément.

Quand il s'agit de la gestion présente et future du système aquatique dans son ensemble, c'est le cycle de l'eau dans son ensemble qui doit donc être traité. La principale différence entre une organisation en simples réseaux et en holarchie est la question de leur agencement. Dans un *cadre holocratique*⁴⁹, elles agissent à différentes échelles d'espace et de temps, à différents niveaux de représentations non équivalents, au travers du rôle de chaque holon représentant une part dans son métabolisme. Tant les institutions que les sociétés civiles ont alors un réel pouvoir d'agir, et pas seulement quelques individus impliqués.

Le métabolisme social de l'eau, lorsqu'il atteint des niveaux insoutenables en raison des limites biophysiques de la croissance économique, a conduit la gestion de l'eau à changer de nature. Si, dans les années 1960 et 1970, la gestion de l'eau était caractérisée par la centralisation et les politiques de commandement et de contrôle, dans les années 1980 et 1990, l'accent a été mis sur les mécanismes du marché et, par la suite, en reconnaissant les limites de ces

⁴⁹Holocratie est une contraction de deux autres mots : holarchie, qui, en grec, représente une forme de structure organique, et -cratie, qui renvoie au pouvoir et peut rappeler la démocratie (pouvoir par le peuple pour le peuple). Il s'agit donc du pouvoir de l'holarchie. <https://cdurable.info/qui-n-a-pas-reve-un-jour-de-mettre-fin-a-la/>

mécanismes, la participation des utilisateurs a commencé à être prise au sérieux⁵⁰. Allan (2003)⁵¹ distingue cinq paradigmes de gestion de l'eau :

1. *le paradigme pré-moderne*, avec les limitations susmentionnées ;
2. *la modernité industrielle*, à partir de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, dans laquelle d'énormes projets hydrauliques ont été réalisés ;
3. *la conscience environnementale*, dans laquelle la perception des impacts dommageables de ces projets a incité les chercheurs à prêter attention à l'allocation de l'eau aux écosystèmes, et pas seulement à l'utilisation humaine ;
4. *le paradigme de la valeur de l'eau*, lorsqu'il a été reconnu que l'eau est une ressource rare ayant, par conséquent, une valeur économique ;
5. *le paradigme de la gestion intégrée de l'eau*, qui traite l'allocation de l'eau comme un processus politique qui doit prendre en compte les facteurs sociaux et environnementaux, ainsi que les facteurs économiques..

Si les grandes infrastructures de transport d'eau engendrent des problèmes locaux facilement compréhensibles, il faut donc encore en traiter l'effet global. Il est possible d'utiliser notamment le système global de l'eau GWSP⁵². Ce système comprend des composantes humaines, physiques et biologiques dont les relations et les rétroactions doivent alors être comprises et intégrées pour pouvoir être bien gérées.

Trop souvent confrontée au pragmatisme des réalités de terrain à l'échelle de grands bassins fluviaux, une *Gestion Intégrée des Ressources en Eau* (GIRE)⁵³ en devient l'élément le plus pertinent. Celle-ci étant alors réalisée opérationnellement en référence à l'intégration de ses composantes environnementales, sociales, économiques et spatiales indissociable d'une bonne gouvernance et notamment :

- *l'intégration de toutes les ressources* (l'eau sous toutes ses formes, les milieux aquatiques et les services écosystémiques rendus) ;
- *l'intégration spatiale* (le bassin versant concerné).
- *l'intégration des savoirs et des expertises* ;
- *l'intégration sociale* (intégration des besoins, des fonctions et l'harmonisation des usages) ;
- *l'intégration des acteurs* (la participation, l'intégration des politiques) ;
- *l'intégration économique* .

⁵⁰ Water Governance in the Face of Global Change -, From Understanding to Transformation.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-21855-7>

⁵¹ Virtual Water—The Water, Food, and Trade Nexus. Useful Concept or Misleading Metaphor?
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3482087>

⁵² The Global Water System Project (GWSP) : Science Framework and Implementation Activities.
<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc11879/>

⁵³ <https://www.oieau.org/thematiques/gestion-integree-des-ressources-en-eau-gire>

8.3. Quels(s) statut(s) juridique(s) pour les ressources en eau ?

**« Il y a contradiction indépassable entre la souveraineté absolue des Etats
et la nécessité d'une gouvernance mondiale
pour les problèmes planétaires vitaux. »**

Edgar Morin

Même si l'accessibilité, la distribution et l'assainissement des ressources en eau apparaissent d'abord comme des problèmes locaux, la reconnaissance de l'eau comme bien public mondial offre une perspective internationale que les Etats et les grandes organisations internationales doivent prendre en compte. Les *Nations Unies* paraissent être l'institution la mieux adaptée pour poursuivre les réflexions engagées lors des divers grands rendez-vous internationaux consacrés à ces problèmes. C'est pourquoi, suivant en cela l'exemple de la biodiversité, des changements climatiques et de la désertification, qui font l'objet de conventions internationales, il semble que le moment est venu de mettre en place un processus analogue. Il permettrait d'offrir le cadre juridique international nécessaire à une gouvernance responsable de l'eau, guidée par un souci éthique, en particulier au regard des populations les plus pauvres et les plus démunies par rapport à cette ressource essentielle.

il existe de nombreux systèmes de gestion des ressources en eau mis en place par les usagers depuis plusieurs décennies, voire plusieurs siècles, reposant sur une gestion communautaire des ressources : ces systèmes sont particulièrement vivants dans la péninsule indienne, tout comme dans de nombreux pays d'Amérique latine. Toutefois, il faut rester vigilant sur le caractère fortement idéalisé des modes de gestion communautaire tels qu'ils sont présentés dans les travaux du courant de la propriété commune (Ostrom, 1990). Le caractère démocratique et légitime des décisions, l'idée d'un équilibre du pouvoir ou d'une équité dans la distribution, sont autant de leurres qui invitent à adopter une démarche plus prudente et pragmatique.

La définition de l'eau comme bien public mondial fait l'objet de nombreux débats. L'eau fait partie de l'environnement mondial, même si aucune convention internationale unifiée sur l'eau n'existe à ce jour ? Si on s'en tient à la définition minimale, pour qualifier un bien de bien public global, les coûts et bénéfices doivent en être universels. Plusieurs arguments sont avancés pour défendre l'idée d'externalités planétaires et de risques associés de même échelle, que sous-tend la notion de bien publics mondial ;;

Un tel droit des océans est progressivement devenu une problématique fondamentale. De nombreux accords internationaux définissent déjà des règles à respecter sur l'océan : navigation, pêche, exploitation des ressources qui donne lieu à un mille-feuille réglementaire incroyable et, malgré toutes ces règles internationales, aujourd'hui seuls 12% des océans sont protégés juridiquement avec 1% classés comme réserve naturelles. Mais ces conventions sont dépourvues de moyens juridiques pour contraindre les pays membres à respecter les décisions adoptées. Il n'existe en effet pas de consensus juridique international pour savoir qui a autorité

pour prendre des décisions et édicter des règles sur l'usage des écosystèmes et des ressources naturelles non marchandes.

Pour mesurer la quantité d'eau virtuelle contenue dans un bien ou un service, nous pouvons utiliser la méthodologie de l'empreinte hydrique. L'empreinte hydrique est un indicateur multidimensionnel de l'eau douce qui mesure non seulement l'utilisation directe de l'eau dans la production et la consommation, mais aussi l'utilisation indirecte en examinant la chaîne d'approvisionnement. Il divise l'eau en trois types :

- *l'eau bleue*, l'eau des masses d'eau de surface et des réservoirs souterrains ;
- *l'eau verte*, l'eau appropriée par les écosystèmes (humidité du sol, eau des plantes, etc.) ;
- *l'eau grise*, l'eau nécessaire pour diluer les polluants jusqu'à ce qu'ils deviennent inoffensifs.

L'eau bleue représente *l'utilisation directe* de l'eau et les eaux verte et grise *l'utilisation indirecte*. L'eau bleue et l'eau verte correspondent à *l'eau consommée* et l'eau grise à *l'eau non consommée* qui peut être utilisée à d'autres fins⁵⁴ (Hoekstra et al., 2011).

L'instauration d'outils de gestion des eaux souterraines nécessite donc la mise en place de ces structures juridiques et institutionnelles qui encadrent leur utilisation et leur application. La gestion de la recharge des aquifères (MAR) constitue une de ces approches intégrées qui permet l'alimentation des aquifères en complément des barrages de surface et offre une alternative rentable, réduisant l'évaporation et les impacts environnementaux. La façon la plus durable et la plus rentable de gérer la qualité des eaux souterraines consistera à assurer leur protection adéquate afin d'éviter leur contamination. Cela peut passer par une cartographie de la vulnérabilité, l'établissement de zones de protection et la planification de l'utilisation des terres.

Pour mettre en œuvre une coopération internationale efficace, les Etats doivent être en mesure d'aider à identifier les projets d'infrastructures hydrauliques acceptables : à la fois techniquement et socialement adaptés, ce qui passe par des études de la demande, mais aussi écologiquement viables.

Ces projets doivent donc s'inscrire dans le temps et comprendre des investissements en formation et transferts de connaissances destinés à rendre autonomes les cadres des pays concernés dans la gestion de l'eau au quotidien. Les Etats doivent aussi faciliter le choix de prix adaptés aux réalités socio-économiques de leur pays, par exemple en établissant des fonds de subventions vers les usagers défavorisés.

Dans ce contexte, L'arrivée de la **notion de gouvernance** dans le vocabulaire socio-politique et économique contemporain aura au moins eu le mérite de susciter de nombreux débats, visant

⁵⁴ The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781849775526/water-footprint-assessment-manual-ashok-chapagain-mesfin-mekonnen-maite-aldaya-arjen-hoekstra>

à dépasser les modes d'administration trop hiérarchiques et centralisés ou à faire confiance aveuglément aux mécanismes de régulation marchande pour des ressources qui se prêtent difficilement à toute catégorisation⁵⁵.

La gouvernance des ressources en eau dans les pays en développement (PED) constitue sans nul doute un enjeu politique, économique et social majeur que les gouvernements et les institutions internationales identifient comme prioritaire sur l'agenda politique du 21ème siècle. Dans la mesure où les ressources en eau peuvent être considérées comme un bien public mondial, interroger les modalités de la gouvernance des politiques de l'eau dans les PED appelle donc une perspective plus globale.

Le passage d'une échelle de gestion à une autre et la philosophie sous-jacente à la notion de bien public suggèrent un ensemble de questions posées à la gouvernance envisagée globalement⁵⁶ :

- Quels seront les types d'accords entre les différents acteurs (fournisseurs / usagers / financements) aux différentes échelles ?
- Quelle sera la participation des populations locales, notamment les plus démunies à l'adoption et au maintien de pratiques définies à l'échelon mondial qui les concernent pourtant prioritairement ?
- Devront-elles participer au financement de tels biens ?

30

Dans le cas d'une gouvernance globale, la séparation sera plus tranchée entre ceux qui formulent et édictent les règles internationales et ceux qui les appliquent aux échelons inférieurs, avec le risque d'une déconnexion plus importante entre le monde décisionnel, et celui de leurs conséquences. On ignore à cette échelle quelle sera la part du passager clandestin, de quels moyens de contrôle, voire de sanction, pourrait disposer une souveraineté internationale.

9. Un enjeu particulier : la gestion opérationnelle en temps réel d'une gouvernance de la gestion mondiale des ressources en eau.

L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM)⁵⁷ a un plan d'action et une stratégie en matière d'hydrologie qui s'appuient sur huit ambitions à long terme :

1. les crues ne prennent personne au dépourvu ;
2. les populations sont préparées à faire face à la sécheresse ;
3. les données hydrologiques, climatologiques et météorologiques contribuent aux objectifs de sécurité alimentaire ;
4. des données de qualité viennent appuyer les recherches scientifiques ;
5. la science constitue une base solide pour l'hydrologie opérationnelle ;

⁵⁵ Mondes en développement 2006/3 (no 135), pages 39 à 62

⁵⁶) Requier-Desjardins et Caron, 2005 Le développement des biens publics dans les pays occidentaux

⁵⁷ <https://wmo.int/fr/site/journee-meteorologique-mondiale-2024/priorites/adaptation-aux-changements-climatiques/gestion-des-ressources-en-eau>

6. une connaissance approfondie des ressources en eau du monde dans lequel nous évoluons ;
7. les informations hydrologiques contribuent au développement durable ;
8. la qualité de l'eau est connue.

Les eaux souterraines sont souvent considérées comme une ressource privée, c'est-à-dire une ressource étroitement liée à la propriété foncière et qui, dans certaines juridictions, constitue une propriété privée. Il est alors difficile de légiférer à leur égard comme de mettre en place une gouvernance et une gestion descendantes. Néanmoins, au vu du rôle des eaux souterraines en tant que bien commun, les gouvernements doivent assumer pleinement la responsabilité qui leur incombe comme gardiens de cette ressource.

Les travaux sur la gouvernance de l'eau revendiquent la recherche d'une plus grande égalité dans l'accès à la ressource conjointement à la définition d'usages durables. Ils soulignent la prise de conscience nécessaire des réalités singulières de terrain permettant le maintien d'une paix sociale, ceci en explicitant les déterminants contextuels, politiques et culturels, souvent inégalitaires, parfois même religieux de l'accès à l'eau.

Plusieurs auteurs défendent en effet l'idée d'un risque de guerre civile mondiale de l'eau, basée sur des scénarios prospectifs incertains par définition, mais fondés sur des hypothèses réalistes : l'eau et l'accès à l'eau seraient, à cet égard, les symboles des inégalités économiques croissantes, vecteur de déstabilisation dans les pays industrialisés et dans les PED. Elle alimenterait une fracture sociale entre les plus pauvres et les autres au niveau mondial, qui conduirait à cette forme de guerre civile internationale. La fonction de l'Etat reste donc importante, de ce fait, dans le statut de l'eau entre un bien public et un bien privé. S'impose alors une gouvernance globale transnationale ou internationale caractérisée par des contrats différenciés entre acteurs : plus qu'une simple gouvernance supranationale d'un méta-pouvoir qui définirait les conditions des usages de l'eau et de sa fourniture aux pays.

Un élément pratique qui pourrait (re)modeler profondément la gouvernance de l'irrigation dans les pays en développement, c'est la diffusion à très grande échelle de la pompe à eau individuelle. La mutation conduit à remodeler les systèmes anciens, et de nouvelles solidarités sont à inventer pour faire prendre conscience à chacun du caractère interdépendant des actions de prélèvement dans le milieu. Cette mutation technique pourrait avoir des conséquences sociales importantes, puisqu'elle modifie la solidarité territoriale qu'imposaient assez naturellement les réseaux de surface (canaux) ou enterrés (tuyaux). Et ces solidarités, pourraient trouver un écho à une échelle beaucoup plus vaste à une échelle globale.

L'enjeu réellement et irréductiblement fondamental auquel notre monde est confronté dans la gestion de ses ressources aquatiques est bien de faire face à cette complexité irréductible de ses différentes composantes, de ses parties prenantes et de ses multiples contraintes présentes et à venir ...

Annexe : la question d'une possible propriété de « mémoire » de l'eau

La question d'un effet physiologique de très hautes dilutions de molécules chimiques sur les organismes vivants est séculaire. Elle est liée notamment à la pratique de l'homéopathie.

Une hypothèse serait que les propriétés physico-chimiques des molécules d'eau décrites précédemment⁵⁸ (*polarité, constante diélectrique, liaisons hydrogène, ..*) contribuent à établir via la présence de certaines molécules au sein d'une « solution » ce que l'on pourrait nommer des « états moléculaires » plus ou moins permanents. Certes il a été démontré que « l'eau polymérique » en tant que telle n'existe pas. Des analyses chimiques montraient que les échantillons d'eau dite « polymérisée » étaient contaminés par d'autres substances, expliquant ainsi les modifications des points de fusion et d'ébullition. Des examens au microscope électronique mirent en évidence la présence de petites particules solides de différentes natures, allant du silicium aux phospholipides, expliquant la plus grande viscosité⁵⁹. La question de tels états « cristallins » particuliers reste ouverte mais étrangère à la communauté scientifique.

Très longtemps peu testée expérimentalement, l'existence possible de tels états pouvant exercer un effet biologique ont fait l'objet d'expériences biologiques avancées depuis les années 1970-80. Parmi ces travaux, deux types d'expériences menées dans le cadre objectif et rigoureux de l'expérimentation scientifique conventionnelle ont été menés, ceci en dehors de toute perspective thérapeutique.

1. Le test de dégranulation des basophiles

Ces expériences furent menées sur des leucocytes basophiles humains exposés à un sérum contenant des anticorps contre l'IgE. Ceux-ci provoquent leur dégranulation et la libération d'histamine mesurée par une coloration par le bleu alcian. Cet effet est utilisé en médecine traditionnelle comme test de laboratoire classique de détection d'une allergie.

Un effet de très hautes dilutions de solutions aquatiques d'histamine a été d'observer une inhibition de cette dégranulation de leucocytes provoquée par un antisérum contre l'IgE. Cette étude parue dans le journal *Nature* en 1988⁶⁰, très médiatisée, a fait alors l'objet de multiples remises en cause.

Une nouvelle série de tests a alors été menée dans le cadre d'une expérimentation menée en « double aveugle » par quatre laboratoires européens indépendants⁶¹. Au travers de 29 expériences, l'effet de très hautes dilutions d'histamine sur la dégranulation des basophiles a été mesuré en utilisant la cytométrie de flux et, dans un laboratoire, la mesure directe de la libération de l'histamine. Le but était de vérifier les résultats de l'étude publiée par Benveniste et ses collaborateurs. Trois laboratoires sur quatre ont confirmé cet effet de très hautes dilutions d'histamine (*de 10⁻³⁰ à 10⁻³⁸ M*) sur l'activation de la dégranulation des basophiles humains⁶² les effets inhibiteurs les plus importants étant observés à des niveaux de stimulation plus faibles

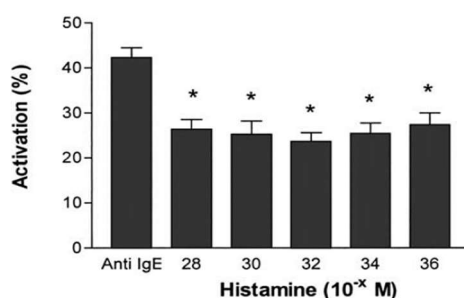
⁵⁸ 3. **L'eau, élément catalyseur fondamental de la complexité moléculaire**

⁵⁹, « **L'eau polymérisée a fait transpirer les chimistes** », Marie-Christine de La Souchère La Recherche, no 454, juillet-août 2011, p. 108-110

⁶⁰ **Human basophil degranulation triggered by very dilute antiserum against IgE** E. Davenas, F. Beauvais, J. Amara, M. Oberbaum, B. Robinzon, A. Miadonnai, A. Tedeschi, B. Pomeranz, P. Fortner, P. Belon, J. Sainte-Laudy, B. Poitevin & J. Benveniste *Nature volume 333, pages 816–818 (1988)* <https://www.nature.com/articles/333816a0> et <https://www.nature.com/articles/334285c0.pdf>

⁶¹ Laboratoire d'Immunologie et d'Allergologie, 5 boulevard Montparnasse, 75006 Paris, France ; Department of Clinical Biochemistry, Institute of Clinical Science, The Queen's University of Belfast, UK ; Département de Pharmacologie, Pieraccini 6, 50139 Florence, Italie; Université d'Utrecht, Département of Molecular Cell Biology, Utrecht, Pays-Bas.

⁶² **Histamine dilutions modulate basophil activation.** P. Belon, J. Cumps, M. Ennis, P.F. Mannaioni, M. Roberfroid, J. Sainte-Laudy, F.A.C. Wiegant. *Inflamm. Res.* 53 (2004) 181–188 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15105967/>

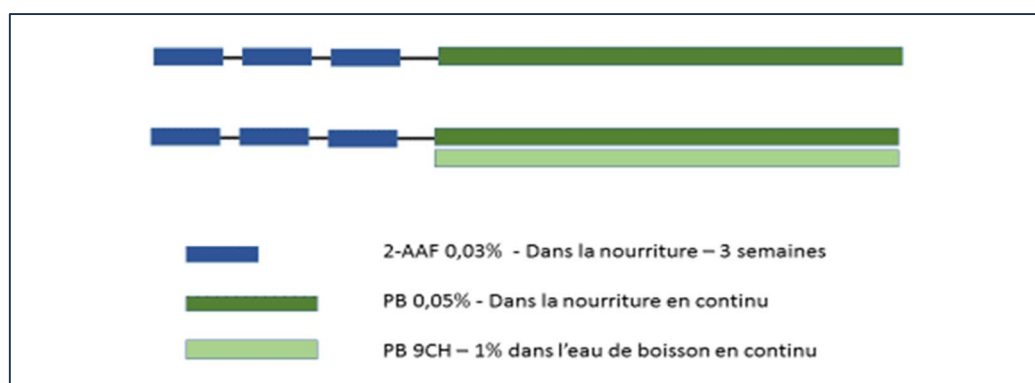


La figure montre que les très hautes dilutions d'histamine inhibent très significativement l'activation de la dégranulation des basophiles mais sans relation dose-effet. L'analyse avec le test de comparaison multiple de Dunn et le test de Kruskal-Wallis ont établi que les résultats des tests sur les échantillons contenant des dilutions d'histamine étaient significativement différents du niveau de dégranulation observé contrôle induit par l'anti-IgE dans le groupe contrôle ($p < 0,001$).

2. L'expérimentation sur des modèles d'hépatocarcinogénèse

Une autre expérimentation d'un effet potentiel de très hautes dilutions fut de tester un tel effet sur un processus de cancérogénèse expérimentale provoqué chez le rat. Cela s'est fait aussi dans les années 1980 dans le cadre d'une vaste série d'expériences traditionnelles qui étudiait le processus de cancérogénèse chimique hépatique induit chez le rat de laboratoire. Le processus était étudié en particulier dans sa phase dite de « promotion » de lésions initiales induites par divers agents chimiques et facteurs biologiques. L'un des protocoles expérimentaux utilisé était celui qui analysait l'effet « promoteur » du cancer du phénobarbital sur des lésions initiées dans le foie de rat par une dose sub-carcinogène d'un agent chimique⁶³. Les résultats de ces recherches ont été publiés dans diverses revues internationales, notamment plusieurs dans la revue internationale *Carcinogenesis*⁶⁴.

L'objectif spécifique des expériences rapportées ici était, avec ce modèle, de tester et d'analyser le potentiel et l'influence possible de solutions aqueuses de phénobarbital très diluées sur cette phase de promotion de la cancérogénèse. Ceci de manière totalement indépendante de toute relation possible avec une dimension thérapeutique, quelle qu'elle soit.



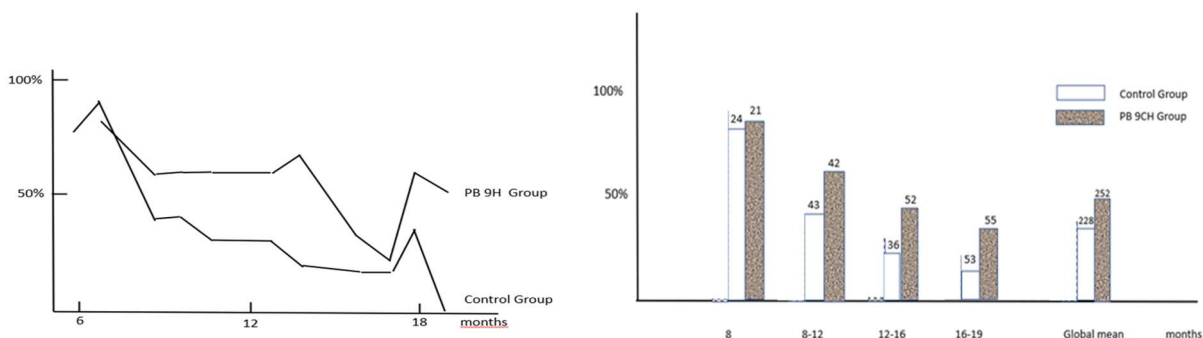
Les rats étaient nourris pendant 21 jours avec un régime alimentaire contenant du 2-acétyl-aminofluorène (2AAF) à la concentration de 0,03%. Ils recevaient ensuite une alimentation normale pendant 10 jours puis étaient soumis ensuite au traitement promoteur consistant en l'administration de phénobarbital (PB) à la concentration

⁶³ **Comparison of Different Models of Rat Liver Carcinogenesis: Conclusions from a Systemic Analysis** Jacques de Gerlache, Marc Lans, [...], and Marcel Roberfroid *Toxicologic Pathology*, 1984 Volume 12, Issue 4. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/019262338401200412>

⁶⁴ **Phenobarbital as a promoter in the initiation/selection process of experimental rat hepatocarcinogenesis** M Lans, J de Gerlache, H S Taper, V Préat, M B Roberfroid *Carcinogenesis* . 1983;4(2):141-4. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6825204/>

de 0,05% dans leur alimentation. Un second groupe recevait alors en plus des hautes dilutions (9^{ème} dilution centésimale) de phénobarbital via leur eau de boisson.

Des différences statistiques très significatives ont été observées entre les deux groupes expérimentaux qui comprenaient chacun pas moins de l'250 animaux. A l'exception du prélèvement du 17ème mois, tout au long de l'expérimentation une différence significative a été observée entre le groupe témoin et le groupe PB 9CH pour les lésions hépatiques macroscopiques. La figure 2 précise la différence entre les groupes traités et non traités en nombre d'animaux indemnes de toute lésion hépatique macroscopique. La différence statistique pour ce paramètre est particulièrement importante car il s'agit d'un critère global relativement plus facilement objectivable à établir que le caractère histologique ou la malignité de chaque tumeur observée dans un seul foie.



Evolution du pourcentage d'animaux sans lésions hépatiques (avec nombre d'animaux par période)

Pour les lésions malignes caractérisées histologiquement, la probabilité d'équivalence entre le groupe témoin et le groupe PB 9CH était de 0,03 %. Le grand nombre d'animaux analysés dans chaque groupe explique le haut degré de signification observé.

GROUPE	Contrôle	PB 9 CH
Nombre de rats par groupe	228	252
Nombre de rats survivants	10	11
% animaux avec des lésions hépatiques macroscopiques	35	51 *
% d'altérations au niveau hépatocellulaire	48	30 **
% de lésions bénignes	27	20
% de lésions malignes	21	10 ***

Degré de signification statistique des valeurs : * : $P \leq 0,05$; ** : $P \leq 0,01$; *** : $P \leq 0,001$.

Malgré l'expérience du laboratoire et de nombreuses publications de résultats expérimentaux plus classiques obtenus à partir de protocoles de cancérogenèse similaires, il a été impossible à cette époque des années 80 de soumettre les résultats pour publication. Il a en effet été constaté lors de communications informelles avec d'autres groupes de recherche actifs dans ce domaine que la seule évocation de ce type d'expérimentation sur de très hautes dilutions mettait immédiatement en question, non seulement les résultats observés, mais les protocoles expérimentaux eux-mêmes, et même l'objectivité et l'indépendance des chercheurs qui avaient exécuté ces expériences. De ce fait la (proposition de) publication de ces résultats aurait jeté le discrédit sur l'ensemble des travaux plus traditionnels réalisés par le laboratoire.

Peut-être qu'aujourd'hui une attention plus objective et plus ouverte pourrait être accordée à ces résultats

oooooooooooooooooooooooooooooooooooo