

L'eau molécule de la Vie

Alberte PULLMAN

Lorsque le président du M.U.R.S. M. le Professeur Dausset me demanda de faire cette conférence, il me proposa comme titre : "L'eau, molécule de la Vie", titre qui me séduisit dès l'abord, sans doute par tout ce qu'il évoque de ruissellement créateur. Je fus un peu déçue quand, recevant les premières annonces, je vis que le titre imprimé était : "L'eau, molécule du Vivant". Je ne fus pas la seule à préférer le premier titre, puisque c'est lui qui finalement vous est proposé. Nuance infime, me direz-vous. Nuance, certes : infime, je ne le crois pas, car si les deux expressions indiquent que l'eau est partie intégrante de tout ce qui vit, la première met mieux en évidence l'idée, aussi vieille que la réflexion de l'homme, de l'eau source de vie.

Conférence donnée sous la présidence effective de Monsieur le Ministre délégué chargé de la Recherche, dans le cadre du programme du MURS "L'EAU des HOMMES en l'an 2000". Accompagnée du film "L'eau et les hommes" projeté à la Glode avec le concours bienveillant de Monsieur Maurice LEVY, président de la Cité des Sciences et de l'Industrie, cette conférence a été rendue possible grâce à l'aide exceptionnelle de MM. Robert Parienti et Claude Salis ainsi que d'A.C.S. Conseil pour son organisation.

Il est presque banal de rappeler que les Babyloniens, déjà, considéraient que l'eau était à l'origine de toute vie, et que, pour THALES DE MILET, le premier des philosophes grecs, l'eau était l'élément premier qui donna naissance à tous les autres.

Moins citée, et pourtant enfouie dans nos mémoires d'enfance, est la première phrase de la Genèse :

I

"Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre. La terre était informe et vide et l'esprit de Dieu se mouvait au-dessus des eaux".

Là aussi, l'eau préexiste : curieusement, dans cette description minutieuse de la Création, il n'est dit nulle part que l'eau fut créée. En revanche, au matin du cinquième jour, *"Dieu dit : que les eaux produisent en abondance des animaux vivants"*. Et naquirent les poissons et tout ce qui vit dans l'eau. Il est vrai que l'homme, lui, fut fait plus tard *"de la poussière"* - ou *"de la glaise"* disent certaines traductions. Quoi qu'il en soit, la première mention biblique de la vie animale concerne celle qui sortit de l'eau.

L'eau - source de la Vie

Que nous dit la science d'aujourd'hui sur les origines de la Vie et sur le rôle qu'a pu y jouer l'eau ? Tout d'abord, nous savons par les études des astronomes sur l'Univers et celles des géologues sur notre planète que celle-ci, avec le reste du système solaire, s'est condensée, il y a quelque 4 milliards 600 millions d'années, d'un nuage de gaz et de poussières, en une masse extrêmement chaude, originellement liquide, dont la surface, en se refroidissant, forma une croûte percée de volcans d'où la vapeur d'eau s'échappait à grandes bouffées. L'eau liquide, qui ne pouvait subsister à l'origine à cause de la chaleur, n'apparut que lorsque le refroidissement permit la condensation de cette vapeur. Elle retomba alors en déluge et couvrit la planète d'océans où se déposèrent les sédiments arrachés par les flots. Naturellement ce raccourci couvre quelques centaines de millions d'années.

Autour de cette terre inondée subsistait sensiblement l'atmosphère primitive qui contenait essentiellement, en plus de vapeur d'eau, des gaz dits "réducteurs", ammoniac, méthane, azote, hydrogène, gaz carbonique, oxyde de carbone, mais pas d'oxygène libre ni d'ozone. Cette atmosphère était traversée d'explosions constantes, de décharges électriques, de chocs des météorites, de radioactivité naturelle et d'ultra-violetts provenant du soleil et non filtrés puisqu'il n'y avait point encore d'ozone.

Dans ce décor, assurément plus apocalyptique qu'édénique, tout est prêt pour la synthèse des molécules de la vie.

Ce fut le mérite du savant russe OPARINE, dans les années 1925-30, d'en faire la remarque et de proposer le scénario possible : les gaz élémentaires présents contenaient tous les atomes nécessaires à la synthèse des molécules organiques fondamentales dont la combinaison forme les molécules du vivant tel que nous le connaissons : carbone, azote, oxygène, hydrogène, étaient disponibles dans les gaz composant l'atmosphère primitive. L'énergie nécessaire pour les amener à se combiner traversait sans cesse cette atmosphère en abondance. L'océan bienveillant était prêt à recueillir les produits, les amalgamant en une "soupe prébiotique", laquelle se concentrant peu à peu favoriserait des synthèses plus complexes, puis des agrégations capables de s'accroître aux dépens du milieu et de se diviser.

Imagination géniale d'abord, la première partie au moins de ce schéma est considérée comme acquise aujourd'hui. Non pas par une preuve directe, certes - car qui peut prouver ces choses ? - mais par une série d'expériences due à l'ingéniosité des chimistes qui, conquis par la vision d'Oparine, s'essayèrent à en démontrer le bien fondé : dans les années 1950, ayant mis dans une enceinte fermée (un ballon) des gaz de l'atmosphère primitive (ammoniac, méthane, vapeur d'eau) et fait passer une décharge électrique, MILLER recueillit des substances qui se révélèrent être des acides aminés, autrement dit les briques qui servent à fabriquer des protéines. D'autres expériences suivirent, modifiant les gaz initiaux, les sources d'énergies, les molécules formées, qui se révélèrent toutes des molécules élémentaires du vivant,

de telle sorte que les sourires sceptiques qui accueillirent les premières expériences ont maintenant fait place à un consensus admiratif : c'est bien ainsi - du moins peut-on dire qu'il est hautement probable que c'est ainsi - que naquirent les premiers constituants du vivant, avant la vie proprement dite.

A cette étape de synthèse que l'on appelle "prébiotique", l'eau, en vapeur, joue son premier rôle, un rôle fondamental, certes, pour apporter ses éléments à la construction de l'édifice, mais au même rang que les autres gaz primitifs et en disparaissant en tant qu'eau puisqu'elle est détruite dans les réactions.

Dans l'étape suivante, la science rejoint le mythe, donnant à l'océan le soin de recueillir et de brasser les précieux produits en une immense soupière. Rôle capital ici de l'eau liquide, réceptacle et gardienne des ingrédients du futur vivant.

Ces ingrédients, pour l'instant, sont encore à l'état de petites unités moléculaires. Pour passer au vivant il va falloir d'abord en faire des *polymères*, c'est-à-dire les lier entre elles en de longues chaînes répétitives, les protéines et les acides nucléiques en particulier, les deux constituants essentiels des cellules. Ici, le milieu océanique pose un problème : en effet, les réactions de polymérisation des acides aminés pour faire des protéines, tout comme celles conduisant aux acides nucléiques, sont défavorisées par un milieu aqueux. Il apparaît probable que ces réactions purent se faire grâce à l'évaporation locale des océans qui laissa aux endroits asséchés nos molécules primitives en agrégats appropriés au contact des argiles des fonds qui purent servir de support et de catalyseurs. Miracle encore de l'eau qui, en disparaissant à propos en vapeur, va permettre des polymérisations tranquilles dans les petites criques chaudes.

Ce fut le mérite de Sidney FOX de montrer que ces conditions quasi anhydres et de chaleur douce, reproduites au laboratoire, donnent en effet naissance à de longs polymères d'acides aminés qu'il appela "protéinoïdes". On peut imaginer, bien que les démonstrations soient moins avancées, que des processus analogues ont formé des acides nucléiques ou plutôt leurs précurseurs.

Mais les polymères du vivant ne sont pas *la vie*. Il leur fallut se multiplier, s'assembler en microsystemes, former enfin le premier prototype lointain d'une cellule vivante. C'est ici que l'eau, à coup sûr, revient dans une nécessité incontournable : en effet, nos polymères gisant sur la grève asséchée n'ont aucune chance de se grouper en une assemblée productive d'un système plus tard auto-entretenu. En revanche, si une ondée bienfaisante survient, l'eau va les dissoudre, les entraîner, les rassembler en des gouttelettes peu à peu concentrées : là encore Sidney Fox et son groupe ont montré que les protéinoïdes formés au laboratoire s'agrègent en solution concentrée pour former des microsphères dont le diamètre peut aller jusqu'à la taille d'une bactérie, et surtout que ces sphères bourgeonnent et se dédoublent.

Beaucoup d'expériences restent à faire sur ces microsphères que Fox appelle des "protocellules" avant de comprendre comment elles ont pu conduire à l'établissement de la machinerie complexe mais précise de la cellule telle que nous la connaissons aujourd'hui, capable de nutrition, d'excrétion, et surtout de reproduction avec une mémoire prodigieusement fidèle. Entrer dans le détail des hypothèses et des évidences partielles de cette énigme pas encore résolue n'est pas mon propos. Je n'ai abordé ce bref raccourci de l'étape prébiotique que pour vous y montrer le rôle de l'eau ou plutôt les rôles successifs de l'eau :

Au commencement : eau - vapeur

Refroidissement : eau - déluge entraînant les alluvions

Synthèses : eau - océan recueillant les molécules élémentaires

Polymérisations : eau - vapeur s'absorbant à point nommé

Protocellules : eau - pluie

C'est ainsi que la science voit l'eau-source de la vie. Certes les détails sont loin du raccourci dramatique des êtres vivants sortant de l'onde ou de l'homme issu de la glaise. On n'en reste pas moins confondu devant certaines intuitions des Anciens.

L'eau - élément du Vivant

Voici notre cellule formée puis différenciée et assemblée étroitement avec ses soeurs dans les tissus des organes, telle, ou à peu près, qu'elle est aujourd'hui. C'est maintenant le Vivant qu'il nous faut considérer. Qu'en est-il de notre titre : "L'eau, molécule du Vivant" ? S'il s'agit de l'aspect "eau-constituant du Vivant", la réponse est d'abord en chiffres et en pourcentages.

Un chiffre impressionnant pour commencer : nous sommes faits d'eau pour environ 65 % de notre poids. C'est dire qu'un adulte de 60 kgs contient *grosso modo* 39 kgs d'eau - 39 litres d'eau -, cette proportion variant naturellement selon les tissus. Ainsi le tissu osseux ne contient qu'environ 25 % de son poids d'eau mais le sang va jusqu'à 80 % et la peau 66 %. Curieusement, le tissu du cerveau est un des plus riches en eau, environ 78 %, ce qui, soit dit en passant, va à l'encontre de la sagesse populaire quand elle dit d'un doux imbécile "qu'il n'a que de l'eau dans le crâne".

Cette eau se trouve dans les cellules pour environ les 2/3, hors des cellules pour 1/3, dont les 3/4 sont l'eau intersticielle des tissus, le reste étant le sang.

Notre adulte perd, bon an mal an, un litre et demi par jour de son eau (environ 600 millilitres par la peau, 400 dans l'air expiré, 500 par l'urine) qu'il faut réabsorber quotidiennement sous peine de rompre l'équilibre fragile du Vivant : nous avons tous vu à la télévision les squelettes décharnés causés par le manque d'eau dans les populations africaines. Plus près de nous, qui n'a pas connu la terreur des diarrhées infantiles déshydratantes? Pourquoi toute cette eau ? A quoi sert-elle ? Que fait-elle dont on ne puisse se passer ?

D'abord elle sert de milieu, de véhicule, de solvant.

Le vivant n'est vivant que parce qu'il est le siège constant d'un grand nombre de réactions chimiques. Prenons la plus simple des cellules d'aujourd'hui : une bactérie ; elle se présente comme une gout-

telette, parfois un bâtonnet, entourée d'une membrane enfermant des acides nucléiques, des protéines et de petites molécules, le tout dans l'eau. Pour vivre, cette bactérie se nourrit, absorbant des molécules du milieu extérieur, elles aussi dans l'eau, puis elle les transforme par une succession de réactions chimiques en substances nécessaires à son entretien, à sa croissance, puis à sa division. Les cellules des organismes supérieurs obéissent à un schéma global semblable bien qu'infiniment plus complexe et plus compartimenté : la taille d'une cellule animale est à peu près 2000 fois celle d'une bactérie.

Ces réactions successives entre molécules parfois très grandes par rapport à l'espace restreint où elles cohabitent ne vont pas au hasard mais obéissent à un ballet bien réglé où une réaction commande la suivante, où les polymères s'enroulent ou se déroulent selon le besoin, où des molécules messagères vont quérir et apporter constamment à l'endroit voulu les briques nécessaires à la construction. L'eau est le milieu où baignent tous ces réactifs, leur véhicule parfois, parfois encore elle-même un partenaire réactionnel. Elle maintient les structures nécessaires, elle protège les réactifs des contacts indésirables, elle peut faciliter les contacts désirables, elle assure par sa fluidité la mobilité des partenaires.

H₂O, une molécule très spéciale

Et nous voici arrivés à l'évidente question qui nous contraint à nous pencher plus avant sur cette eau elle-même si familière et cependant si spéciale. Quelle est donc sa nature ? Qu'a-t-elle entre toutes les petites molécules élémentaires qui la rende si apte à jouer ce rôle à la fois de *molécule de la Vie* - avant la vie - que nous avons brièvement décrit, puis de *molécule du Vivant*, omniprésente et indispensable?

En vérité, c'est une molécule très particulière. Abstraction faite de son rôle dans le Vivant, ses propriétés dites "physiques" ont, de tout temps, intrigué les savants. On peut en lister au moins neuf. Ainsi :

1) Le fait que le passage de l'état solide à l'état liquide diminue le volume occupé (vous avez tous sans doute vu ou entendu décrire les bouteilles de lait craquant par trop grand froid).

2) Le fait que la densité maximum corresponde à l'état liquide vers 4° centigrades (température du fond des océans).

3) Une constante diélectrique particulièrement grande.

4) Des températures de fusion et d'ébullition étrangement élevées par rapport à celles de molécules chimiques comparables telles que l'ammoniac, le méthane, l'hydrogène sulfuré.

5) La pression augmente la fluidité du liquide.

6) La capacité calorifique de l'eau liquide est très élevée.

7) La conductivité thermique également.

8) Les ions H^+ et OH^- sont très mobiles dans l'eau.

9) L'état solide (autrement dit la glace) existe sous au moins huit formes cristallines différentes.

Chacune de ces propriétés peut se trouver individuellement chez d'autres molécules. Mais, comme le dit STILLINGER dans une revue récente : *"Il est rare que tant d'excentricités existent en même temps en une seule et même substance"*.

Ces propriétés sont la manifestation de la nature profonde, chimique, de la molécule d'eau. Voyons un peu cette nature: tout d'abord la molécule d'eau est la combinaison de deux éléments très simples, l'oxygène et l'hydrogène, un atome du premier avec deux atomes du second, dans une disposition géométrique particulière (Fig. 1) où les "liaisons" OH forment un angle droit un peu ouvert. C'est une toute petite molécule dont les dimensions sont indiquées sur la figure, ce qui fait que si l'on circonscrit une sphère autour de ces trois atomes, l'espace occupé n'a qu'un rayon de $1,4 \overset{\circ}{\text{Å}}$ (*).

(*) $\overset{\circ}{\text{Å}}$ = Angström, mesure égale à 10^{-10} mètre, soit un dix milliardième de mètre.

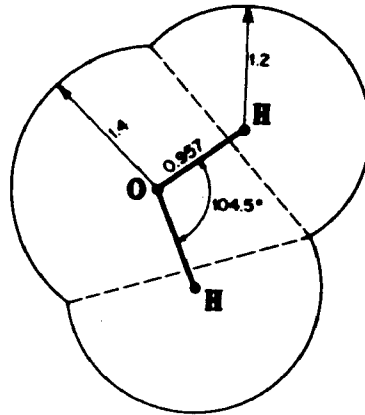


Figure 1
Géométrie de la molécule d'eau

C'est à dessein que j'ai fait suivre cette figure de celle représentant deux molécules-type parmi les constituants fondamentaux de la cellule vivante : une petite protéine, l'insuline (Fig. 2), et un (tout petit) fragment de la fameuse double hélice de l'acide déoxyribonucléique, l'ADN (Fig. 3). Je dis tout petit puisque le moindre chromosome d'une cellule somatique animale est fait d'un fragment d'ADN long d'environ 4 centimètres. Il faut ajouter que le long filament que ferait bout à bout l'ensemble des 46 chromosomes est torsadé et empaqueté avec les histones dans le tout petit espace du noyau.

Notez que, sur ces deux figures, chaque petite boule représente un atome, généralement carbone, azote, oxygène ou phosphore, les atomes d'hydrogène, nombreux et petits, ayant été omis pour la clarté.

Comme vous le constatez, par rapport à ces géants, notre molécule d'eau est lilliputienne. Je suis sûre que vous pressentez combien cette disproportion pourra lui être avantage vis-à-vis de ces monstres pour se glisser, si besoin est, dans les anfractuosités ménagées par Dame Nature au sein de leurs structures contournées et labiles.

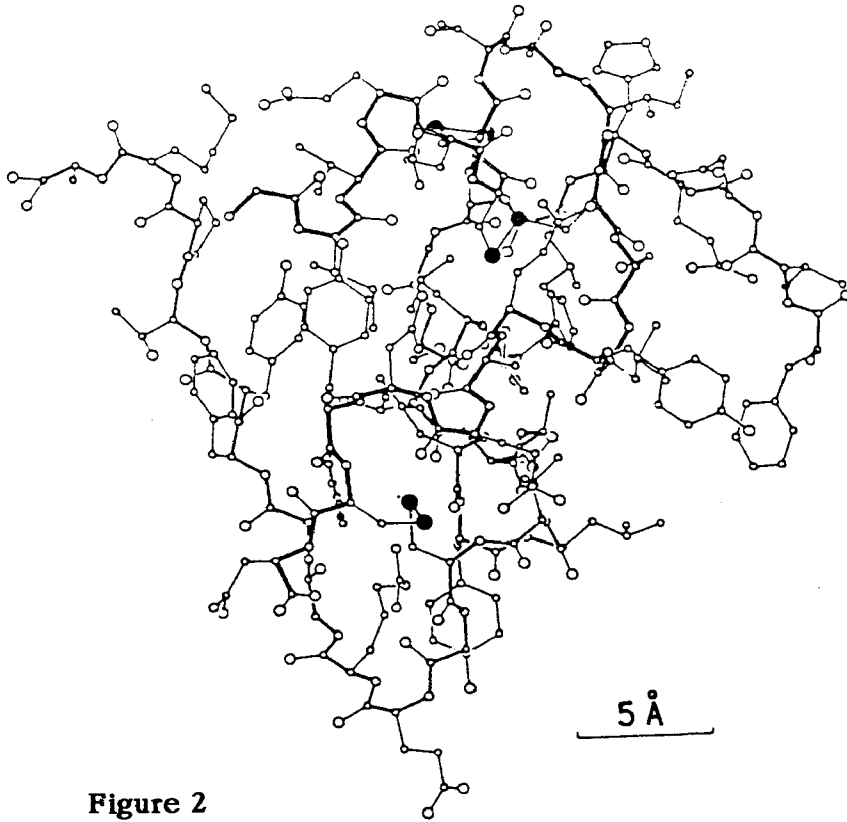


Figure 2

Une protéine : l'insuline

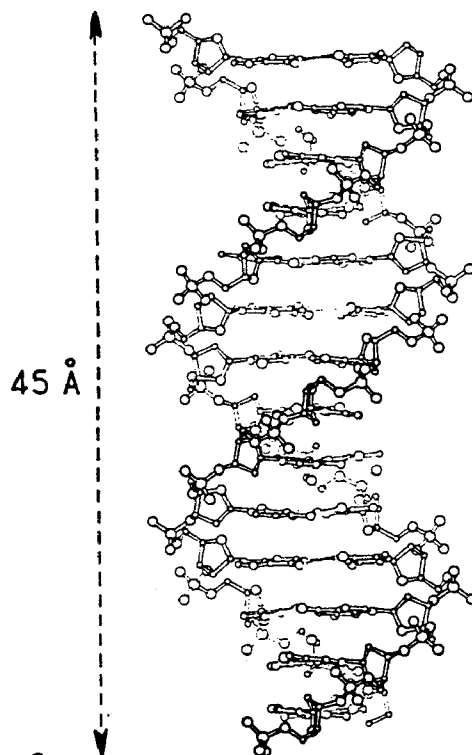


Figure 3

Un tout petit fragment d'ADN

La nature chimique de l'eau lui confère plusieurs propriétés capitales pour son comportement :

La première provient de la nature de ses atomes constituants, l'oxygène et l'hydrogène : l'oxygène est, comme disent les chimistes, électronégatif, c'est-à-dire qu'il attire les électrons le long des liaisons qu'il forme, ceci aux dépens des atomes auxquels il est lié. Il en résulte que, dans la molécule d'eau, l'oxygène porte une charge globalement négative et les hydrogènes une charge positive correspondante (égale, évidemment, sur chacun, à la moitié de la charge de l'oxygène).

Bien des propriétés de l'eau résultent de cette situation: l'une d'elles, qui joue un grand rôle dans le vivant, est l'attraction de son oxygène négatif pour les charges positives approchant de l'extérieur : d'où l'aptitude des molécules d'eau à se placer autour des ions positifs, les *cations*, en les entourant d'une cage dite d'hydratation. La même chose, mais inversée, se produit pour les ions négatifs, les *anions* qui, eux, sont attirés par les hydrogènes positifs de l'eau. Ici, l'eau, tournant un de ses hydrogènes vers l'ion négatif formera également des couches d'hydratation.

Grâce à cette propriété, l'eau est un solvant incomparable pour les ions positifs et négatifs. Bien d'autres molécules ont une grande affinité pour les ions et peuvent les encager. Aucune n'a le caractère, optimal pour le vivant, de l'eau chez laquelle l'optimalité vient, pour l'essentiel, de la situation appropriée de l'oxygène dans l'échelle des électronégativités, moins électronégatif que le fluor, et plus électronégatif que l'azote, l'un trop attractif, l'autre pas assez. Dans l'eau, tout ion apparaissant, permanent ou transitoire, s'entoure d'une cage protectrice, mais cette cage est juste assez labile pour libérer l'ion s'il devient nécessaire.

La seconde propriété fondamentale de l'eau-molécule est son aptitude à former des liaisons dites *liaisons hydrogène* et, ceci, d'une manière tout à fait unique.

Qu'est-ce qu'une liaison hydrogène ? Ce n'est pas une vraie liaison chimique comme les liaisons OH de la figure 1, mais une liaison beaucoup moins solide, qui se forme entre un atome électronégatif et un hydrogène d'une autre molécule, lié lui-même, dans cette molécule, à un atome électronégatif : vous concevez tout de suite que l'oxygène d'une molécule d'eau peut former une liaison hydrogène avec un des hydrogènes d'une autre molécule d'eau. Souvenons-nous que ces liaisons hydrogène sont beaucoup plus faciles à casser que les vraies liaisons chimiques OH, l'énergie nécessaire pour les détruire n'étant que d'environ 5 kilocalories par mole, à peu près un vingtième de l'énergie nécessaire pour casser la liaison OH. De plus les liaisons hydrogène sont très faciles à déformer : la directionnalité dessinée par la figure du dimère de l'eau assure la meilleure stabilité possible mais un apport de très peu d'énergie suffit pour s'écarter de cette disposition optimale sans briser la liaison. Cette possibilité sera fondamentale pour assurer la fluidité de l'eau, et celle du vivant.

Avant d'en venir là, épuisons d'abord l'aptitude de notre molécule d'eau isolée à former des liaisons hydrogène : en fait, grâce à sa structure angulaire et à la distribution des électrons autour de son oxygène, ce dernier est apte à former deux liaisons hydrogène équivalentes. L'ensemble des liaisons faibles et fortes autour de l'oxygène peut alors être représenté par la figure 4. Dans ce schéma, l'oxygène est placé au centre d'un tétraèdre régulier, ou plus familièrement, d'une pyramide régulière. Dans une pyramide de cette sorte, on sait que le centre est relié aux quatre sommets par des directions faisant un angle de $109^{\circ}28'$. Cet angle n'est pas très différent de l'angle de la molécule d'eau isolée, de sorte que la représentation de la figure est approximativement correcte, avec les deux liaisons OH dirigées vers deux des sommets. Les deux liaisons hydrogène que peut encore former l'oxygène pointent alors vers les deux sommets restants de la pyramide. Leurs directions sont indiquées par des flèches.

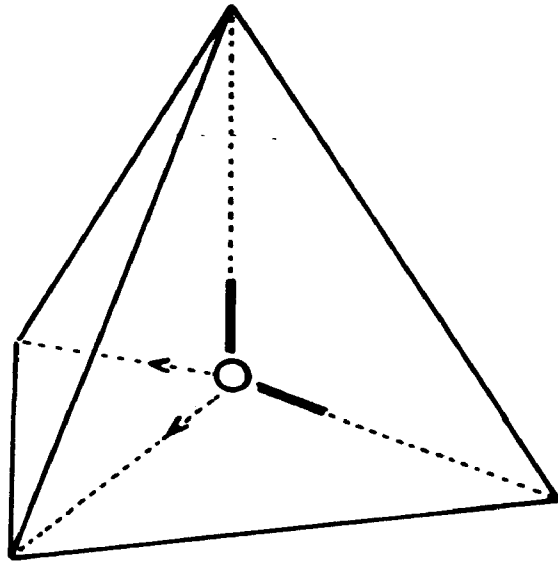


Figure 4

**L'eau au centre d'une pyramide régulière :
deux liaisons OH, deux "liaisons
hydrogène" possibles.**

Lorsqu'une telle molécule d'eau est totalement entourée d'autres molécules semblables et que sa capacité de liaisons hydrogène est saturée, un oxygène d'une autre molécule se trouve à chaque sommet de la pyramide, lui-même étant le centre d'une pyramide semblable : c'est la structure que l'eau adopte dans la forme cristalline la plus stable de la glace. Dans la vapeur d'eau, les molécules ont peu de chance de venir en contact et seuls des dimères ont été observés. Dans la glace, le tétraèdre est rigidifié.

Qu'advient-il dans l'eau liquide ? C'est à partir de la glace que l'on peut le mieux le comprendre : lorsque la glace fond, sous l'effet d'un apport de chaleur, c'est-à-dire d'énergie, des liaisons hydrogène se déforment, certaines se cassent, un certain désordre apparaît. L'ensemble des connaissances existantes sur l'eau liquide permet actuellement de considérer sa structure comme un réseau tridimensionnel de liaisons hydrogène, localement tétraédrique, et contenant une assez grande quantité de liaisons hydrogène distendues et déformées, certaines carrément brisées. La présence des liaisons distendues et la relative

facilité des distorsions permet au réseau une grande labilité, modifiant les proximités et rendant possibles les échanges au sein du réseau.

Indiquons au passage que la propriété de diminuer le volume occupé lors du passage de la glace à l'eau provient des modifications du réseau que nous venons de voir : en déformant d'abord les liaisons hydrogène du réseau rigide initial, des réseaux plus compacts peuvent se réaliser où l'ensemble occupe moins d'espace. Quand la température monte, les cassures augmentent, le phénomène s'inverse : c'est la source du maximum de densité observé vers 4 degrés centigrades. Ces propriétés ne sont pas indifférentes à la vie puisque, grâce à sa légèreté, la glace reste à la surface des lacs et des mares laissant la vie animale continuer sous la couche gelée.

L'eau et les constituants du Vivant

Revenons maintenant à l'eau liquide qui entoure les constituants de la matière vivante. En réalité, elle ne fait pas que les entourer, elle interagit avec eux de multiples façons et ceci grâce aux propriétés que nous venons de voir et à une autre que nous allons voir en son temps.

Penchons-nous d'un peu plus près sur les constituants du vivant : on a vite fait de dire que ce sont des composés organiques. Qui dit composés organiques pense souvent composés du carbone et de l'hydrogène. Certes, et il y a dans certaines molécules du vivant de larges fragments purement hydrocarbonés, ainsi dans les lipides et dans certains acides animés, mais la plupart des molécules du vivant contiennent en plus, en abondance, des atomes électronégatifs, en particulier de l'azote et de l'oxygène, qui se trouvent, soit liés chimiquement à des hydrogènes comme l'oxygène dans l'eau, soit liés à des carbones et situés à la périphérie moléculaire.

Vous avez, dans les figures 5 à 7, trois exemples typiques de ces situations pour deux constituants nucléiques et un fragment fondamental des protéines, la liaison peptidique.

Il est évident que ces atomes électronégatifs N et O sont dans une situation comparable à celle de l'oxygène électronégatif de l'eau et que les hydrogènes qui leur sont liés dans les liaisons NH ou OH sont dans une situation comparable à celle des hydrogènes de l'eau. Autrement dit, ils sont aptes à former eux-mêmes des liaisons hydrogène avec une autre molécule. De telles liaisons existent en effet entre les composés biologiques eux-mêmes : le cas le plus célèbre se trouvant dans les paires de bases complémentaires adénine-thymine et guanine-cytosine, éléments fondamentaux de la structure des acides nucléiques, mais leur étude n'est pas notre propos aujourd'hui : ce qui nous importe ici, ce sont toutes les possibilités de liaisons hydrogène entre l'eau omniprésente et de telles molécules, lorsqu'un atome approprié viendra en contact avec un atome disponible d'une molécule d'eau du réseau imparfait de l'eau liquide.

De telles liaisons se forment-elles ? Et quel est leur rôle ? Nous touchons là un des problèmes les plus fondamentaux de la biophysique moléculaire d'aujourd'hui, qui concerne l'existence ou non d'une eau dite "liée", associée préférentiellement aux substrats biologiques essentiels, protéines, acides nucléiques, dont elle ferait ainsi en quelque sorte partie intégrante.

Dans notre laboratoire, nous nous sommes consacrés pendant plusieurs années à l'étude de ce problème et, en utilisant des méthodes théoriques, quantiques, perfectionnées, nous avons pu mettre en évidence l'existence, la position et le nombre de tels "sites" d'hydratation ainsi que leurs caractéristiques énergétiques sur les biomolécules et biopolymères essentiels. Les figures 5 et 7 illustrent schématiquement ces résultats pour un sucre, pour les paires de bases complémentaires des acides nucléiques AT et GC, et pour la liaison peptidique.

Il n'est peut-être pas indifférent de souligner que ces prédictions théoriques ont été faites à une époque (les années 1970) où la résolution des structures aux rayons X ne permettaient pas la localisation des molécules d'eau autour ou dans les structures des protéines ou des acides nucléiques, et que ce n'est qu'avec le raffinement des résolutions, ces toutes dernières années, que les cristallographes,

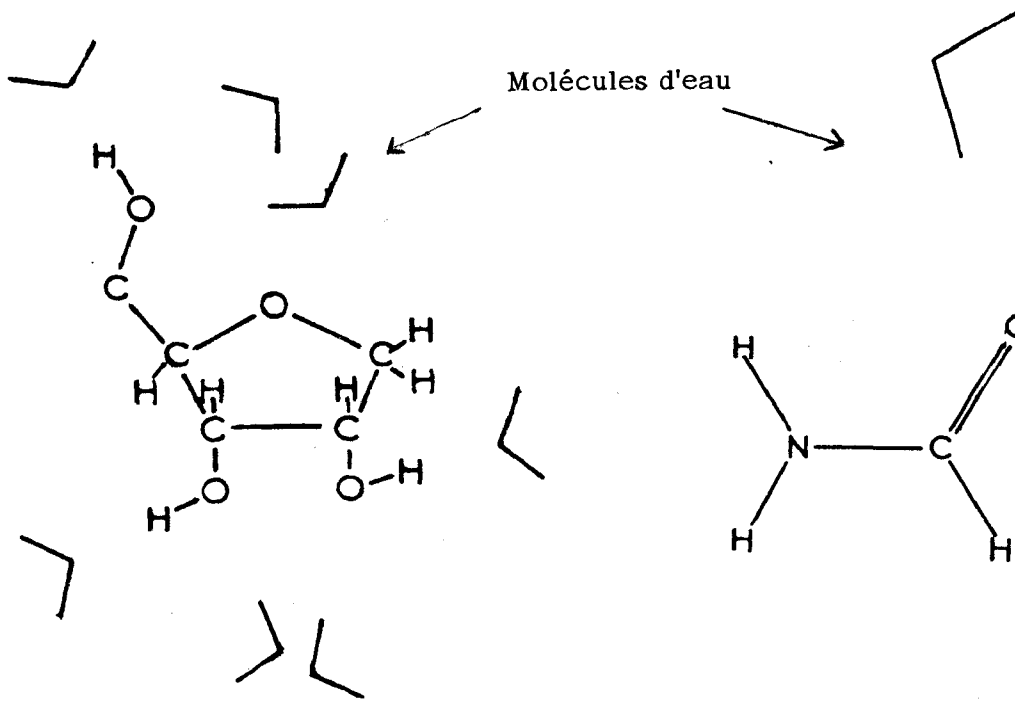


Figure 5

Liaisons hydrogène possibles
eau-ribose (sucre).

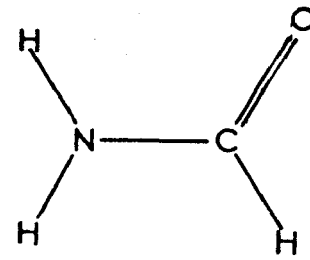


Figure 6

"Sites" d'hydratation d'une
amide (liaison peptidique).

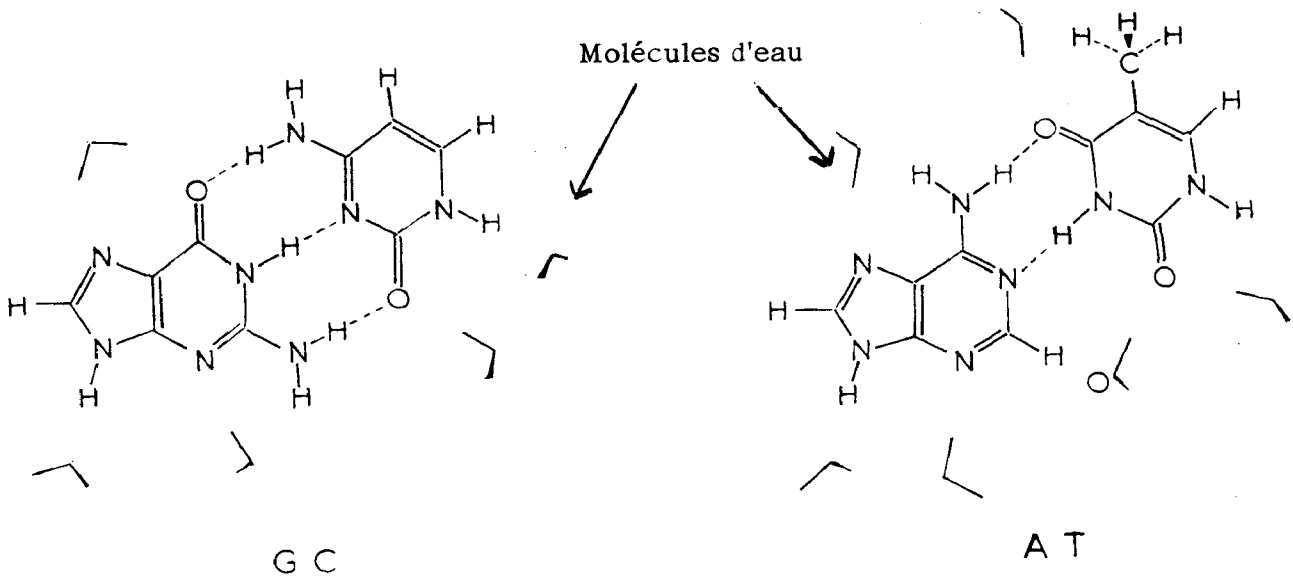


Figure 7

"Sites" d'hydratation des paires de
bases des acides nucléiques.

puis les biochimistes ont peu à peu reconnu la réalité et l'exactitude de ces prédictions, c'est-à-dire la réalité de l'eau liée. On localisait 40 molécules d'eau dans la structure aux rayons X de la myoglobine en 1977. On en localisait plus de 300 en 1980.

Cette eau liée joue-t-elle un rôle dans la structure et plus généralement dans les propriétés des molécules biologiques ? La réponse est oui. Mais faut-il conclure pour autant que tous les constituants de la matière vivante ont une affinité prononcée pour une association avec l'eau, que tous la cherchent ? La réponse est non.

Hydrophilie et hydrophobie du Vivant

En fait, deux qualificatifs sont souvent utilisés à propos de l'attitude des molécules par rapport à l'eau : il y a les substances *hydrophiles* et les substances *hydrophobes*. Jusqu'ici nous avons parlé des premières. Or, il existe parmi les molécules du vivant des substances dont l'attitude vis-à-vis de l'eau peut être qualifiée de franchement "hydrophobe", ce qui traduit à la fois une tendance de ces molécules à éviter l'eau et une tendance à s'associer entre elles : ces substances sont essentiellement les composés très hydrocarbonés. L'exemple le plus connu dans la matière vivante est celui des longues chaînes d'acide gras des phospholipides qui, grâce à cette tendance à s'associer entre elles en évitant l'eau, forment la structure interne bien connue en bicouche des membranes qui délimitent les cellules et toutes les organelles qu'elles contiennent. La structure complète de ces membranes comporte les terminaux phosphatés hydrophiles des chaînes, terminaux qui, eux, plongent dans l'eau.

De même, dans la structure des protéines globulaires on observe (tout au moins globalement) une tendance des acides aminés hydrocarbonés hydrophobes à s'agglomérer vers l'intérieur et une tendance des acides aminés polaires hydrophiles à se tourner vers l'extérieur en contact avec l'eau.

Ainsi, le comportement de ces systèmes sera dicté par un équilibre de la sympathie et de l'antipathie de leurs composantes vis-à-vis de l'eau qui peut ainsi intervenir de ces deux manières complémentaires. Il est évident que ces deux tendances, jointes à la fluidité intrinsèque du réseau de l'eau, rendent possibles tous les contacts nécessaires au cours des étapes successives des réactions intracellulaires. La grande constante diélectrique de l'eau garantit, de plus, la modération des interactions qui s'établissent, modération indispensable à l'équilibre du Vivant.

Dans ce bref survol je n'ai pu vous donner que quelques éléments de l'importance de l'eau et de sa participation dans les phénomènes de la Vie. Il faudrait y ajouter le décompte des réactions chimiques de la machinerie cellulaire auxquelles l'eau-molécule participe elle-même en tant que partenaire, ainsi toutes les réactions d'hydrolyse, certaines réactions au site actif des enzymes. Il faudrait aussi s'attarder sur le rôle de l'eau dans le transport des ions H^+ et expliquer comment le réseau de liaisons hydrogène de sa structure permet le transfert rapide de ces ions qui sont constamment requis par de nombreuses réactions. Il faudrait mentionner son rôle complexe de donneur d'électrons dans la photosynthèse. Il faudrait ajouter à tout cela son rôle de régulateur thermique, et bien d'autres encore...

H₂O : pourquoi pas H₂S, NH₃ ou CH₄ ?

Laissez-moi, pour terminer, poser une dernière question : l'eau, dont nous avons découvert l'importance dans le Vivant et dans sa genèse, est-elle unique et irremplaçable ? Une autre molécule n'aurait-elle pas pu faire l'affaire ?

On pense immédiatement à un autre des hydrures élémentaires, chimiquement proches de l'eau comme H₂S, son homologue fait de soufre et d'hydrogène, ou à l'ammoniac NH₃, ou au méthane CH₄.

Ce dernier peut être éliminé tout de suite : le carbone est peu électronégatif, ses quatre valences sont saturées. Il ne peut pas faire de réseau approprié de liaisons labiles avec lui-même. Il est d'ailleurs gazeux à la température ordinaire et ne se liquéfie qu'en dessous de -150° .

H_2S , lui, a bien une structure géométrique comparable à celle de l'eau et, en fait, sa structure cristalline est analogue à celle de la glace, mais le soufre est trop gros et trop peu électronégatif pour que son réseau de liaisons hydrogène soit suffisamment ferme. Il s'ensuit que le solide fond à -85° , c'est-à-dire beaucoup plus facilement que la glace, et le liquide devient gaz au-dessus d'environ -60° . Recalé donc, lui aussi, et c'est fort heureux, étant donné son odeur !

NH_3 , l'ammoniac, pourrait peut-être faire un bon candidat, l'azote est assez électronégatif (bien que moins que l'oxygène) pour rendre ses hydrogènes positifs : des liaisons hydrogène peuvent se former, on peut concevoir une structure tétraédrique. On voit cependant déjà qu'il n'y a pas cette symétrie remarquable qui existe autour de l'oxygène de l'eau : 2 liaisons vraies, deux liaisons hydrogène. Et, en effet, NH_3 , quand il se lie à d'autres NH_3 , préfère des structures en chaînes ou en cycles. Son cristal fond à -78° et le liquide devient gaz au-dessus de -33° . Une vie née dans l'ammoniac liquide serait en tout cas bien différente. Sur Jupiter, peut-être ?...

Et l'alcool, me direz-vous ? Ne peut-il être le solvant du Vivant ?

Je vous laisse, pour vous-même, répondre à cette question.

ALBERTE PULLMAN
DIRECTEUR DU LABORATOIRE DE BIOCHIMIE
A L'INSTITUT DE BIOLOGIE PHYSICO-CHEMIE