

## Document Principal :

### Un formidable capteur d'énergie : l'eau !

#### 5 I. L'eau une substance indispensable.

Pour les Anciens, le monde résultait de la combinaison des quatre éléments : le Feu, la Terre, l'Air et l'Eau. Mais combien de siècles et de polémiques a-t-il fallu avant que l'on puisse écrire « *eau* =  $H_2O$  » ?

10 Lors d'une expérience de combustion conduite en 1772, Lavoisier, en France, soupçonnait le rôle de "l'air vital", le futur oxygène, pendant que Cavendish, en Angleterre, étudiait "l'air inflammable", le futur hydrogène. Cavendish passa d'ailleurs bien près de la gloire puisqu'il écrivit en 1784 : "quatre cent vingt-sept mesures d'air inflammable sont presque suffisant pour phlogistiquer\* complètement mille mesures d'air commun" ; il venait, sans le savoir de déterminer  
15 avec précision la composition volumétrique de l'eau. C'est Lavoisier qui, après avoir mis au point la méthode de préparation de l'hydrogène en faisant passer de l'eau sur du fer chauffé à blanc (l'engouement pour les montgolfières impliquait la production d'hydrogène), conduisit, du 27 février au 1<sup>er</sup> mars 1785, la grande expérience de décomposition et recombinaison de l'eau (Figure 1).

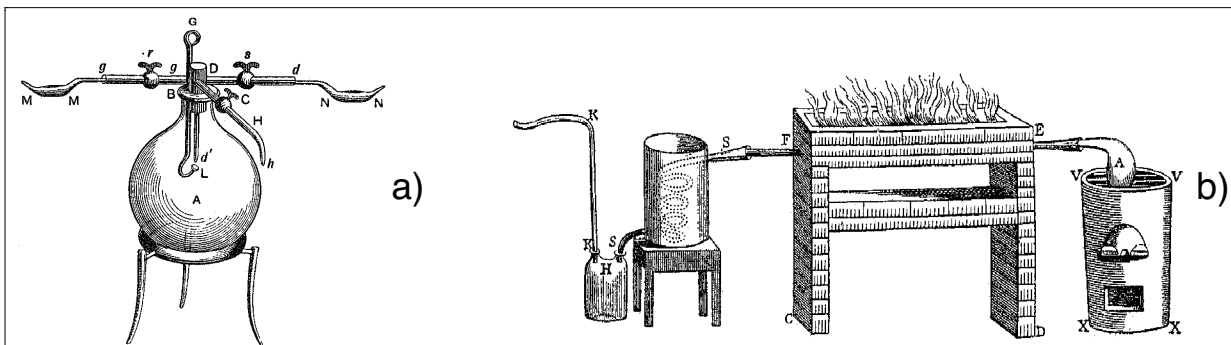


Figure 1 : Appareils utilisés par Lavoisier pour a) synthétiser et b) décomposer l'eau.

a) les voies g et d permettent l'introduction des gaz oxygène et hydrogène purifiés et séchés en M et N. Une étincelle est produite entre d' et L.

b) l'eau est portée à ébullition en A. La vapeur d'eau passe dans le four F qui contient du fer métallique. L'hydrogène est recueilli en H.

Cette expérience capitale dans l'histoire de la chimie fut d'autant plus spectaculaire que nombre d'académiciens y assistèrent (Chaptal, Berthollet ...) et se convertirent alors aux idées défendues jusqu'alors par le seul Lavoisier sur la nature des corps chimiques.

30 Pourtant, après deux cents ans de recherches, la molécule d'eau défie encore les physiciens et les chimistes, tant certaines de ses propriétés sont "anormales". A tel point que, curieusement, on en sait probablement plus aujourd'hui sur le noyau de l'atome que sur le mécanisme de formation et d'étalement d'une goutte d'eau sur une surface solide (le mouillage\*) ou sur la formation des cyclones, qui se créent sous la surface des Océans pour s'élever dans la proche atmosphère.

35 Le rôle fondamental de l'eau dans les processus liés à la vie sous ses différents aspects est

certainement l'un des facteurs qui a et continue de motiver ces recherches. L'eau est évidemment considérée comme le "milieu de vie", tous les êtres vivants (règnes végétal et animal) étant essentiellement constitués d'eau : de 97 % pour les melons, la proportion s'abaisse à 95% chez les méduses, 71% pour les pommes de terre, 74% pour les poules et 65% chez l'Homme (le cerveau en contenant d'ailleurs de 80 à 85%). Un autre aspect tout aussi vital a lieu à l'échelle planétaire, c'est celui qui est lié au cycle hydrologique. Cet aspect avait d'ailleurs déjà été décrit par Fourcroy, un collaborateur de Lavoisier, dans son ouvrage *Système des connaissances chimiques et leurs applications aux phénomènes de la nature et de l'art*, imprimé à Paris en Brumaire de l'An IX, dans lequel on peut lire "Le naturaliste doit observer l'eau dans tous ses états pour en décrire tous les effets ... Il doit reconnaître que, par sa masse, son mouvement et ses propriétés de solvant, l'eau est un des principaux constituants de la Nature". Il s'agit là évidemment de la reconnaissance qualitative de l'importance de l'eau dans les phénomènes liés à la vie et aux climats, c'est-à-dire de l'eau comme un solvant vital, mais également de la reconnaissance implicite des phénomènes thermodynamiques liés au cycle de l'eau. C'est plus particulièrement ce second aspect qui retiendra notre attention. Nous essayerons de comprendre d'où proviennent les propriétés uniques de l'eau, en partant de l'échelle moléculaire, pour en examiner ensuite les conséquences sur le cycle hydrologique de l'eau, qui s'apparente à une machine de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique et mécanique.

## 55 II. Les propriétés de l'eau.

La quantité d'eau disponible sur Terre est évidemment énorme puisqu'elle peut être estimée à près de  $1391.10^{15} \text{ m}^3$ , ce qui représenterait une couche d'eau uniforme d'une épaisseur de 3000 m sur toute la surface de la Terre. Ce sont évidemment les océans qui contiennent la plus importante quantité d'eau terrestre comme cela est indiqué dans le tableau ci-dessous.

réservoirs	océans	glaciers	eaux souterraines.	lacs	eau dans le sol	atmosphère	rivières	matière vivante
volume ( $10^{15} \text{ m}^3$ )	1350	33	8	0,1	0,070	0,013	0,0017	0,0011
% eau	97,0 %	2,4 %	0,6 %	< 0,01 %	< 0,01 %	< 0,001 %	0,0001 %	0,0001 %

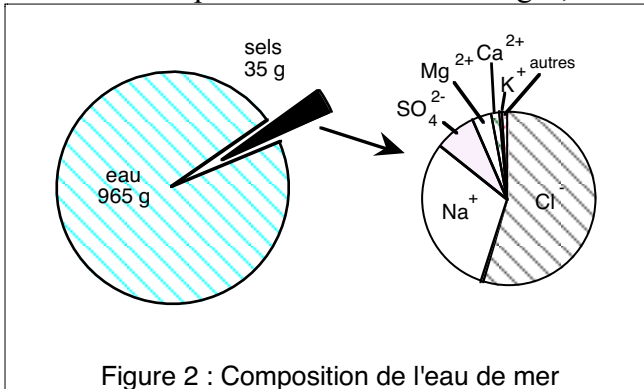
Toutefois, on ne peut comprendre le cycle de l'eau sans avoir à l'esprit son caractère et ses propriétés uniques que ne laissaient pas supposer les "leçons de choses" de notre jeunesse qui la définissaient comme un liquide incolore, inodore et sans saveur, qui gèle à  $0^\circ\text{C}$  et bout à  $100^\circ\text{C}$ .

- **L'eau est un liquide très mobile.**

L'eau est un corps continu, sans rigidité et qui coule. La mécanique des fluides, outil pour les ingénieurs, s'est d'ailleurs développée avant que le concept de molécule n'existe.

• **L'eau est un très bon solvant.**

L'eau dissout plus de substances ou de gaz, et en plus grande quantité, que tous les autres liquides.



C'est d'ailleurs une des causes de la salinité de l'eau de mer (Figure 2) ; les rivières lessivent les continents et conduisent dans l'Océan de grandes quantités de sels dissous, alors que c'est l'eau douce qui s'évapore de l'Océan. L'eau constitue donc un milieu favorable à la production primaire de la Vie grâce à la présence de nutriments et d'éléments traces.

75 • **L'eau possède une chaleur spécifique élevée.** ( $4,18 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

La chaleur spécifique est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'une masse unité de  $1^\circ\text{C}$ . L'eau possède la chaleur spécifique la plus élevée de tous les solides et liquides, à l'exception de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) :

- l'eau régule la répartition des températures et joue un rôle clé dans le transport de chaleur ;
- 80 - l'eau est un mauvais conducteur de la chaleur, ce qui explique que, chauffé à partir de la surface, l'océan, d'une profondeur moyenne de 3000 mètres, soit surtout une hydrosphère froide.

• **L'eau présente des chaleurs latentes de fusion** ( $3,33 \cdot 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$ ) **et d'évaporation** ( $2,25 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ ) **élevées.**

85 La chaleur latente est la quantité de chaleur nécessaire pour fondre (ou évaporer) une masse unité au point de fusion (ou point d'ébullition). Ces constantes sont les plus élevées de tous les solides et liquides, à l'exception de la chaleur latente de fusion de  $\text{NH}_3$ . Il en résulte un fort effet de thermostat autour du point de fusion de l'eau, et un rôle essentiel dans le transfert de chaleur et d'eau au sein de l'atmosphère.

90 Les valeurs extrêmement élevées des chaleurs spécifique et latente impliquent qu'une grande quantité de chaleur est nécessaire pour élever la température de l'eau puis l'évaporer. Le volume considérable des océans leur confère un rôle majeur de tampon thermique, ce qui explique que la surface de la Terre ne s'écarte pas d'une gamme de quelques dizaines de degrés.

95 • **La densité du liquide (eau) est plus grande que celle du solide (glace).**

La densité de l'eau passe par un maximum à  $4^\circ\text{C}$  et l'eau gèle à  $0^\circ\text{C}$ . Immédiatement au-dessus du point de fusion, le solide est donc moins dense que le liquide, et donc la glace flotte. Cette propriété explique que rivières, lacs et océans (point de congélation et maximum de densité autour de  $-1,9^\circ\text{C}$ ) gèlent depuis la surface. La distribution verticale des masses d'eau océaniques, donc la circulation  
100 profonde, aurait été bouleversée si la densité maximale de l'eau de mer s'était située à une autre température.

• **L'eau absorbe fortement le rayonnement infrarouge, largement l'ultraviolet, mais elle est transparente et "neutre" dans le spectre visible (incolore).**

105 La vapeur d'eau, composante importante de l'atmosphère, limite la pénétration de l'infrarouge, à l'exception d'une fenêtre entre 8 et 11 $\mu\text{m}$ . Elle absorbe également dans l'ultraviolet lointain à 0,165 $\mu\text{m}$  (0,147 $\mu\text{m}$  pour l'eau liquide). Le grand écart entre les bandes d'absorption dans l'infrarouge et dans l'ultraviolet lointain explique la transparence de l'eau à la lumière visible. Le réchauffement est donc limité à la couche superficielle, avec une photosynthèse possible sur  
110 plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

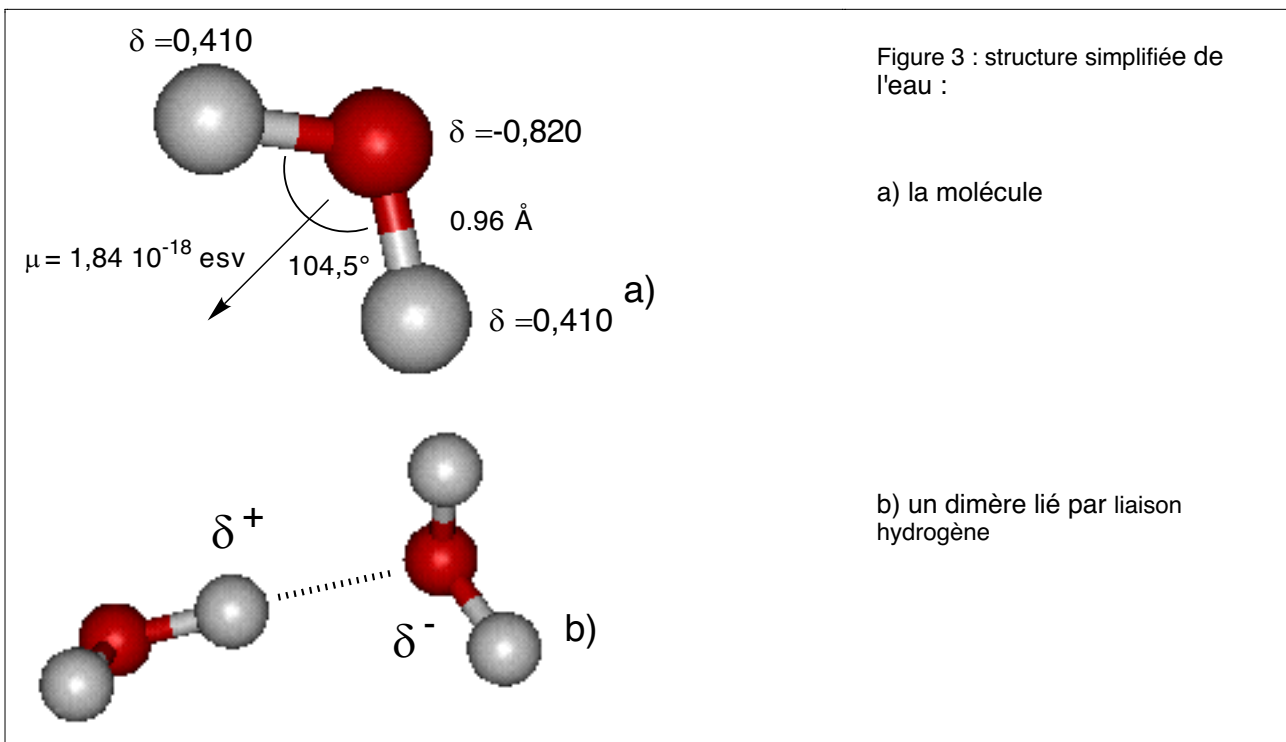
• **L'eau présente une constante diélectrique élevée.** (87 à 0°C, 80 à 20°C)

Seule l'eau oxygénée, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, et l'acide cyanhydrique, HCN, présentent, parmi les liquides, des constantes supérieures. Ceci explique que l'eau facilite l'ionisation des substances dissoutes.

115

### III. La structure de l'eau

Les propriétés physico-chimiques des corps s'expliquent généralement à partir des caractéristiques structurales des molécules constituantes. Comparée à d'autres composés hydrogénés  
120 de masse moléculaire approchant tel que le méthane, l'eau devrait atteindre l'état solide vers -100°C et passer à l'état gazeux vers -80°C. La molécule d'eau a une composition moléculaire des plus simples car elle est obtenue en liant deux atomes d'hydrogène à un atome d'oxygène par une liaison covalente (Fig. 3a). Parce que l'oxygène est plus électronégatif que l'hydrogène, la distribution de charge est asymétrique, et la molécule d'eau est fortement polaire, d'où son aptitude à  
125 séparer les entités polaires ou chargées. C'est pourquoi l'eau est un bon solvant.

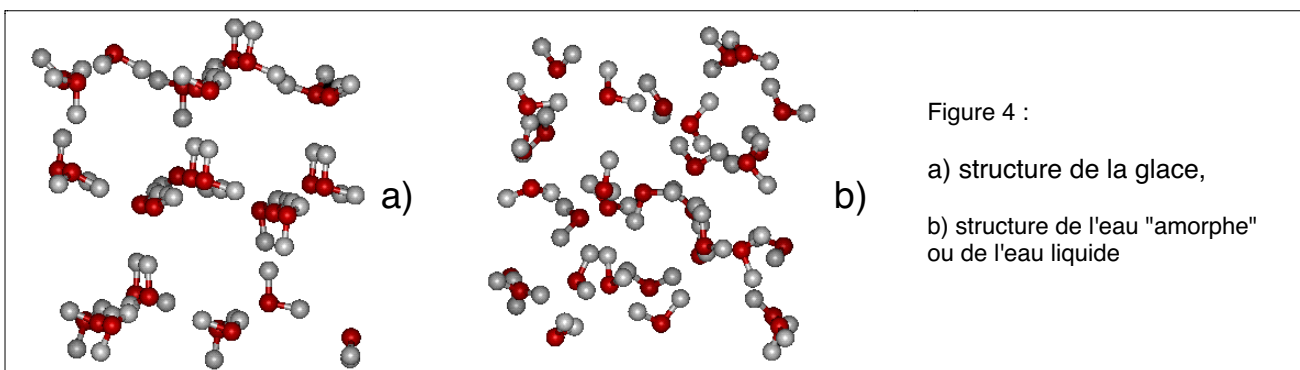


Evidemment, dans un liquide, les molécules ne peuvent pas être considérées comme des entités isolées et les interactions électrostatiques sont prédominantes pour décrire les

130 comportements inter-moléculaires : les régions les plus électropositives d'une molécule attirent les  
 régions les plus électronégatives des molécules voisines. Dans le cas de l'eau, cet effet est encore  
 amplifié par le fait que, sur l'atome d'oxygène, les électrons qui ne sont pas engagés dans les  
 liaisons covalentes forment deux doublets électroniques qui peuvent former une liaison  
 électrostatique en attirant un atome d'hydrogène d'une molécule voisine (Fig. 3b) : cette liaison  
 135 électrostatique directionnelle est appelée "**liaison hydrogène**", stable à température ambiante mais  
 cependant fragile comparée à la liaison covalente. Actuellement, il semble que ce soit la nature  
 même de la liaison hydrogène qui soit à la base des réflexions et des recherches des physiciens. Ils  
 ont donc commencé par le plus simple : une analyse des conséquences de la géométrie de la  
 molécule d'eau sur cette liaison. Dès les débuts de la mécanique quantique, les calculs d'orbitales  
 140 moléculaires ont permis de montrer que l'angle intramoléculaire  $\angle\text{HOH}$  est très proche de  $109^\circ$ , soit  
 l'angle entre les deux diagonales d'un cube. Ce simple fait implique qu'il n'y a que quatre  
 possibilités de créer des liaisons hydrogène. Un raisonnement qui explique facilement le fait que,  
 dans la glace cristalline, chaque molécule d'eau n'est entourée que de quatre molécules voisines.  
 L'ensemble des cinq molécules forme une maille tétraédrique qui se répète dans tout le cristal de  
 145 glace (Figure 4a). Et dans l'eau liquide ?

### III.a. L'eau : modèle statique

*A priori*, cet amas tétraédrique ou même des amas plus gros peuvent y exister aussi (Figure 4b).  
 Cela dépend bien sûr de la liaison hydrogène et de la façon dont elle se crée ou se défait. Depuis les  
 150 débuts de la mécanique quantique, les théoriciens modélisent la liaison hydrogène en supposant  
 qu'elle est de nature électrostatique. Ceci revient à dire qu'elle résulte d'un équilibre (établi pour une  
 distance bien définie) entre les forces électrostatiques répulsives et attractives qui s'exercent entre  
 les deux molécules, ou plus précisément entre les deux atomes en vis-à-vis. Pour modéliser ces  
 forces, ils ont reproduit la polarisation qui caractérise le nuage électronique en forme de V de la  
 155 molécule d'eau grâce à une répartition judicieuse de charges électriques des deux signes.



Une approche qui conduit à un modèle statique simple mais efficace puisqu'il reproduit un grand  
 nombre de propriétés de détail de la liaison hydrogène, à commencer par la distance de 0,28  
 160 nanomètres à laquelle elle s'établit. L'un des succès de ce modèle est qu'il explique assez bien  
 pourquoi l'eau liquide est plus dense que la glace. Il décrit en effet la particularité essentielle de la

liaison hydrogène : sa nature directionnelle, c'est-à-dire, le fait que dans cette liaison, l'équilibre des forces ne s'établit que lorsque les trois atomes O~H~O sont alignés. Or l'atome d'hydrogène, qui assure la liaison, est très mobile à cause de sa petite masse. Il s'écarte donc très souvent de l'axe O~O. Dans ce cas, les calculs comme l'expérience montrent que ce sont les forces attractives qui l'emportent, cassant les liaisons hydrogène et provoquant un léger rapprochement des molécules. Déduction immédiate : plus l'eau est organisée par des liaisons hydrogène, moins elle est dense. Quand elle l'est totalement, comme c'est le cas dans la glace cristallisée, elle est environ 10% moins dense qu'à l'état liquide.

170 De ce modèle statique résulte une image relativement simple de ce qu'est l'eau. Des amas de molécules d'eau, structurés par la maille tétraédrique, y coexistent avec des molécules isolées. Ces dernières sont agitées de mouvements de translation et de rotation exactement comme si elles se trouvaient dans un liquide aux interactions moléculaires de faible intensité.

### 175 III.b. L'eau : composante dynamique

L'estimation de la proportion de liaisons hydrogène dans le liquide ne peut être traitée par un simple modèle électrostatique. Par contre, la spectroscopie d'absorption infrarouge permet d'établir expérimentalement que le nombre de liaisons hydrogène intactes décroît linéairement avec la température. D'environ 1,26 par molécule à température ambiante, il est encore de 0,6 par molécule à 100°C, ce qui représente respectivement 63% et 30% du nombre total de liaisons possibles. Des proportions énormes qui expliquent pourquoi la capacité calorifique de l'eau est si grande. Quant à la durée de vie de la liaison hydrogène, elle est beaucoup plus difficile à déterminer. Plusieurs mécanismes peuvent en effet la casser, notamment la rotation l'une par rapport à l'autre des deux molécules d'eau qu'elle lie, ou l'élongation qui résulte de leur éloignement. Les déplacements angulaires de l'atome d'hydrogène apparaissent comme les plus efficaces pour casser une liaison intacte, comme cela a été démontré récemment par le calcul et par l'expérience. En effet, le développement de lasers qui émettent des impulsions de très courtes durées permettent maintenant de suivre l'évolution de la liaison hydrogène et d'estimer son temps de vie caractéristique de l'ordre de la picoseconde ( $10^{-12}$  s).

Afin de mieux cerner l'influence de la liaison hydrogène, les chercheurs ont naturellement cherché à se débarrasser de l'influence de l'agitation thermique. Ils ont donc étudié le comportement de l'eau à basse température, quand les mouvements moléculaires sont si réduits que la dynamique de la liaison hydrogène devient l'influence déterminante. Et là encore, nous constatons que l'eau a des propriétés étonnantes. En général, l'état liquide d'un corps absolument pur, peut être observé bien en-dessous de sa température de cristallisation.

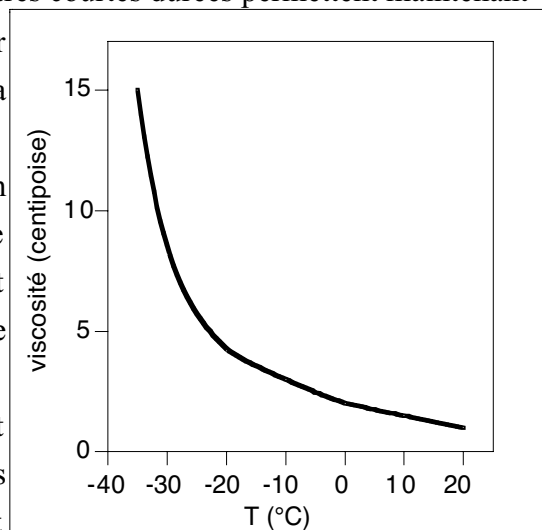


Figure 5 : Evolution de la viscosité de l'eau métastable avec la température

C'est alors un liquide métastable qui cristallise immédiatement à la moindre perturbation (choc, poussière ...). Toutefois, dans de bonnes conditions, il est possible d'amener ce liquide métastable jusqu'à une température minimale : celle de la **transition vitreuse**. Au delà, les derniers mouvements moléculaires se figent et le corps prend une structure amorphe : il est devenu vitreux. C'est pourquoi un verre, en fait, n'est rien d'autre qu'un liquide métastable figé par un refroidissement rapide. Il est donc logique que tout juste avant la transition vitreuse, quand les derniers mouvements moléculaires disparaissent, la résistance à l'écoulement, c'est-à-dire la viscosité, augmente énormément. En fait, ce n'est pas le cas dans l'eau où la viscosité diverge près de 100 K avant la transition vitreuse (qui se situe à 228 K) (Figure 5).

Ces comportements ont toutefois été rapprochés de ceux observés dans le cas de la relaxation des polymères. En physique, le terme relaxation signifie retour à l'équilibre et il est employé, entre autres, pour désigner la disparition progressive des mouvements moléculaires quand la température chute. La mesure expérimentale de ces temps caractéristiques a permis de montrer que, dans les polymères, coexistent plusieurs types de mouvements moléculaires dont les constantes de temps sont très différentes et que l'influence de la température n'est pas la même pour ces différents modes. En particulier, ils ont observé à haute température le blocage de l'agitation du squelette de la chaîne polymérique (relaxation  $\alpha$ ). A plus basse température, ce sont les mouvements plus rapides et plus locaux correspondant à des segments de polymère qui se figent (relaxation  $\beta$ ).

Un scénario analogue pourrait s'appliquer au comportement de l'eau à basse température. D'ailleurs, des expériences récentes ont permis de mettre en évidence sans ambiguïté l'existence de deux durées caractérisant les mouvements moléculaires de l'eau (Figure 6). Le phénomène le plus lent dépend fortement de la température et représente la durée moyenne pendant laquelle une molécule d'eau reste piégée par ses proches voisines. Cette durée augmente lorsque l'agitation thermique baisse et s'avère fortement corrélée à la variation de viscosité macroscopique. Ceci suggère qu'il existe bien une première relaxation correspondant

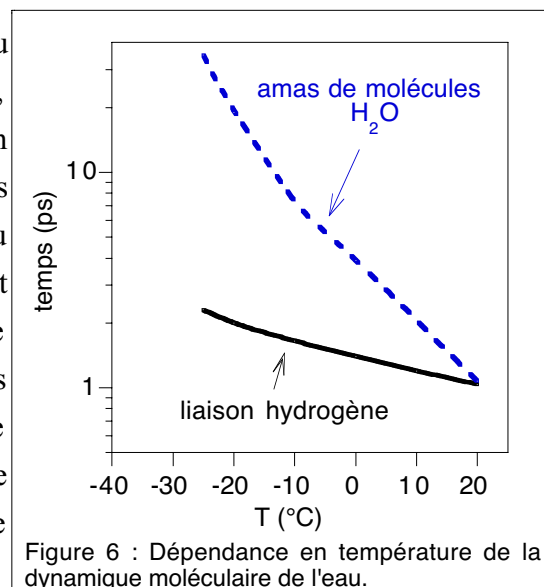


Figure 6 : Dépendance en température de la dynamique moléculaire de l'eau.

à la disparition progressive des mouvements de groupes de molécules (amas). Plus courte, la seconde durée caractéristique est d'environ 1ps dans tout le domaine de température. Elle est donc du même ordre de grandeur que le temps de vie des liaisons hydrogène et correspond pour sa part au phénomène de formation et de rupture incessante de ces liaisons.

La connaissance de la structure et de la dynamique de l'eau semble donc avoir fait de grands pas avec l'appel à de nouvelles techniques expérimentales et l'apport conjoint des puissants ordinateurs

qui permettent d'affiner les modèles théoriques. La connaissance de ces propriétés moléculaires  
 215 (voire supramoléculaires) devrait permettre de décrire dans un avenir proche les propriétés  
 macroscopiques de l'eau.

#### **IV. Le cycle hydrologique.**

220 L'eau présente des propriétés physiques, spectroscopiques, hydrodynamiques, thermodynamiques et  
 chimiques exceptionnelles. L'énorme quantité d'eau présente sur le globe terrestre va pouvoir être  
 mise à profit dans le cycle hydrologique. En fait, l'eau va pouvoir capter l'énergie solaire pour  
 alimenter un gigantesque cycle qui régule les climats ainsi que l'eau disponible. La circulation  
 continue de l'eau entre l'atmosphère et la Terre et son retour dans l'atmosphère grâce à la  
 225 condensation, à la précipitation, à l'évaporation et à la transpiration constituent le cycle de l'eau (cf.  
 Annexe 1).

##### **IV.a. Les mécanismes du cycle de l'eau**

En prenant l'atmosphère comme point de départ du cycle de l'eau, l'ensemble des mécanismes qui  
 230 assurent les transferts incessants de vastes quantités d'eau d'un compartiment à l'autre au sein du  
 système climatique peuvent être mis en lumière : évaporation, précipitations et écoulement. L'eau  
 s'accumule d'abord dans l'atmosphère sous l'effet des processus d'évaporation à la surface des  
 océans et des continents, mais la transpiration des plantes l'y introduit également. Au cours de son  
 ascendance, l'air humide se refroidit, puis se condense partiellement sous forme de nuages ;  
 235 l'atmosphère renferme finalement de l'eau sous forme de vapeur, de liquide et de cristaux de glace.  
 Sous l'effet de la gravité, cette eau retombe dans l'Océan ou sur les continents sous forme de pluie,  
 de neige, de grêle ou de toute autre forme de précipitations. Une partie de cette eau subit à nouveau  
 les phénomènes d'évaporation et de transpiration des plantes, et le reste ruisselle ou s'infiltré dans le  
 sol pour former les cours d'eau. Ces derniers ramènent enfin l'eau à la mer, point de départ d'un  
 240 nouveau cycle.

Le cycle de l'eau correspond à une circulation continue, mue par des phénomènes de pompage, de  
 distillation et de transport d'eau sous toutes ses formes, et dont le moteur est l'énergie solaire. Aussi  
 montrerons-nous d'abord le lien intime entre les cycles de l'énergie et de l'eau avant de détailler les  
 mécanismes qui assurent le passage de l'eau d'un état à l'autre, celui-ci accompagnant souvent le  
 245 transfert entre réservoirs.

##### **IV.b. Le cycle de l'eau et le cycle de l'énergie.**

###### **• Une « usine » à distiller l'eau de mer**

Le cycle de l'eau est intimement lié à celui de l'énergie, car la chaleur latente de condensation de  
 250 l'eau constitue, quand elle se dégage, une des principales sources de chaleur. Améliorer la  
 simulation de phases du cycle de l'eau (interaction sol-végétation-atmosphère, formation des nuages  
 et des pluies) permet de rendre plus fiables les modèles climatiques, qui pèchent parfois par une



mauvaise représentation du cycle de l'eau (Figure 7).

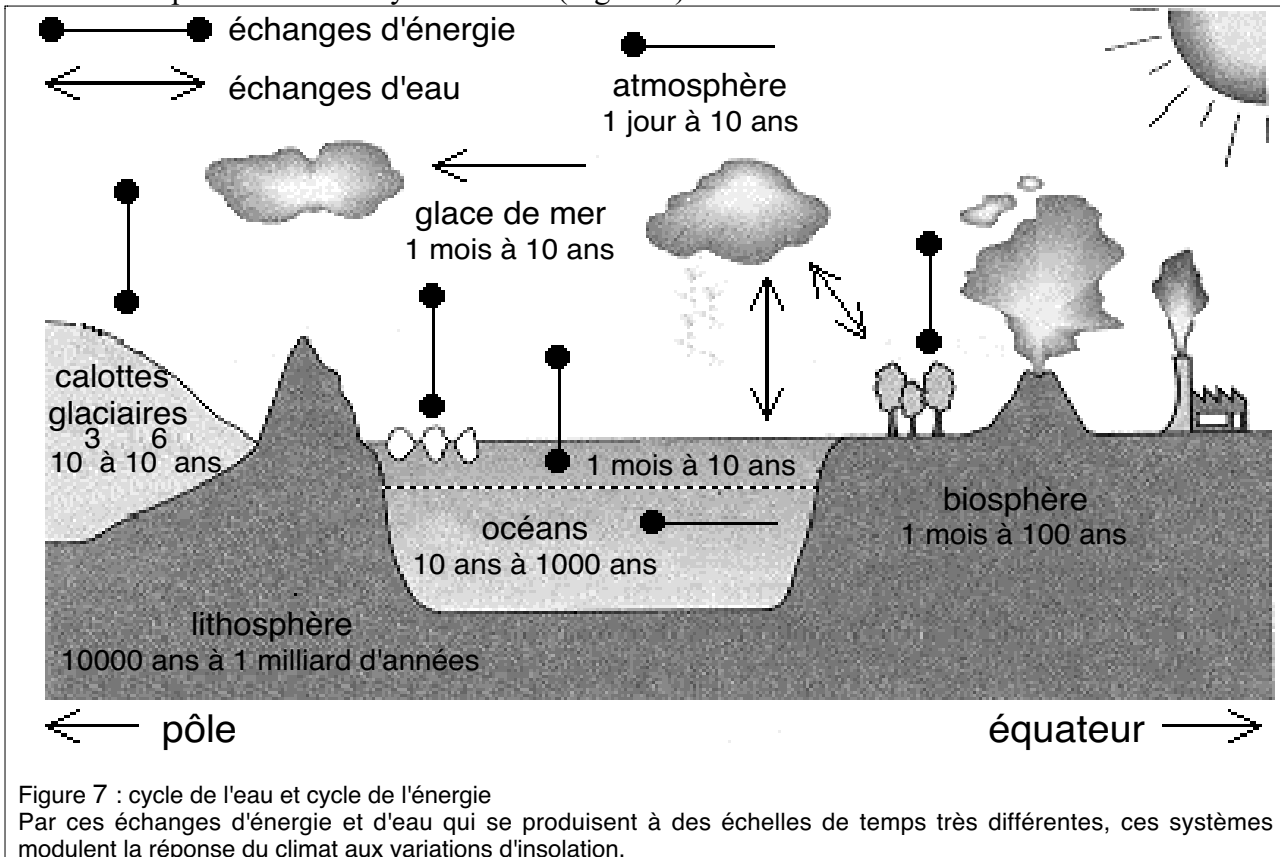


Figure 7 : cycle de l'eau et cycle de l'énergie

Par ces échanges d'énergie et d'eau qui se produisent à des échelles de temps très différentes, ces systèmes modulent la réponse du climat aux variations d'insolation.

Le cycle de l'eau est avant tout une gigantesque installation de distillation de l'eau de mer, surtout localisée dans la zone tropicale. Chaque jour, l'évaporation soustrait à l'Océan environ  $1160 \text{ G.m}^3$ , ce qui correspond à une perte calorifique d'environ  $70 \text{ W.m}^{-2}$  ou pour l'ensemble de la planète une énergie qui approche le quart de celle en provenance du Soleil, soit  $9.10^{21} \text{ J}$ . A ce niveau, la liaison entre les deux cycles est claire. L'Océan stocke autant de chaleur que toute l'atmosphère dans une pellicule superficielle de 2,5 mètres seulement, pellicule qui va restituer à l'atmosphère, par le biais de l'évaporation, la moitié de cette énergie. Cette énergie « latente » est cédée à l'atmosphère seulement lors de la condensation de l'eau dans les nuages ; elle effectue le premier « chauffage » de l'atmosphère et déclenche ainsi la circulation atmosphérique dans les régions intertropicales. Les mouvements atmosphériques turbulents de la couche limite, c'est-à-dire de la couche épaisse de 2000 m environ où la turbulence de surface est active, forment les nuages bas de type stratus ou strato-cumulus, omniprésents au-dessus des océans tropicaux. Les grands cumulo-nimbus des tropiques, en revanche, résultent des mouvements convectifs pénétrant très haut dans l'atmosphère.

#### • L'énergie solaire, « moteur » du cycle hydrique

Le rayonnement solaire constitue le moteur unique de l'évaporation. En raison de son inclinaison par rapport à l'axe Terre-Soleil et de l'alternance des jours et des nuits, l'énergie solaire moyenne reçue par la surface terrestre est de  $342 \text{ W.m}^{-2}$ , soit quatre fois moins que la constante solaire ( $1368 \text{ W.m}^{-2}$ ). Ce rayonnement varie au cours des saisons en tout point de la planète. Comme la Terre est, à l'époque actuelle, au plus près du Soleil au moment du solstice d'hiver et au plus loin lors du

solstice d'été, les variations saisonnières de l'hémisphère Nord sont atténuées.

275 Les variations orbitales expliquent les périodes humides que connaît parfois, à l'époque actuelle, la région saharienne et les oscillations entre période glaciaire et période interglaciaire qui caractérisaient le climat quaternaire.

L'énergie solaire n'est pas totalement absorbée par la Terre (Figure 8) ; environ 30 % est réfléchi  
280 vers l'espace, ce qui correspond au cumul de plusieurs effets dans lesquels l'eau intervient :

- l'effet moléculaire, ou diffusion Rayleigh (6 %), correspond à la mise en vibration des nuages électroniques des molécules d'air, en majorité des molécules de diazote et de dioxygène.

- la réflexion par la surface terrestre (4 %), « miroir » aux qualités inégales. L'Océan réfléchit environ 5 % du rayonnement, soit moins qu'une surface continentale couverte de forêts (de  
285 l'ordre de 10 %) et nettement moins que des déserts jusqu'à 35 %) et, surtout, que des surfaces enneigées ou recouvertes de glace jusqu'à 80 %) ; celles-ci jouent donc un rôle considérable dans l'équilibre thermique de la planète.

- la réflexion par les nuages, la plus importante, atteint 20 % du rayonnement solaire incident. Ce nouveau couplage entre les deux cycles de l'énergie et de l'eau est dû aux gouttelettes  
290 d'eau qui infléchissent la trajectoire du proche infrarouge et en renvoient une partie vers la partie supérieure de l'atmosphère. Cet effet ne dépend pas de la longueur d'onde du rayonnement incident, ce qui explique pourquoi les nuages sont incolores. À masse égale, cette diffusion est d'autant plus forte que les gouttelettes d'eau sont plus petites ; certaines pollutions, comme celles que provoquent les aérosols sulfatés, affectent la taille des gouttes, perturbant alors l'équilibre énergétique de la  
295 planète.

La machine climatique fonctionne à partir des  $240 \text{ W.m}^{-2}$  restants du rayonnement solaire qui sont absorbés soit par la terre, soit par l'océan, et qui présentent deux comportements opposés

- l'Océan est chauffé par le haut, car la totalité du rayonnement solaire y est absorbé en quelques dizaines de mètres;

- 300 - l'atmosphère, très transparente au rayonnement solaire, est chauffée essentiellement par le sol. L'ascendance de cet air chaud explique le caractère actif et turbulent de la circulation atmosphérique.

- l'atmosphère est également chauffée par le rayonnement solaire direct, puisqu'elle en absorbe environ 20 %. Cette absorption est due à quelques constituants minoritaires de  
305 l'atmosphère:

- l'ozone, qui absorbe l'ultraviolet dans la stratosphère, c'est-à-dire au delà d'une quinzaine de kilomètres d'altitude, est responsable de la croissance de la température à ce niveau

- la vapeur d'eau absorbe une part importante du rayonnement infrarouge, en particulier dans  
310 les nuages où les diffusions multiples sur les gouttes allongent le trajet de la lumière.

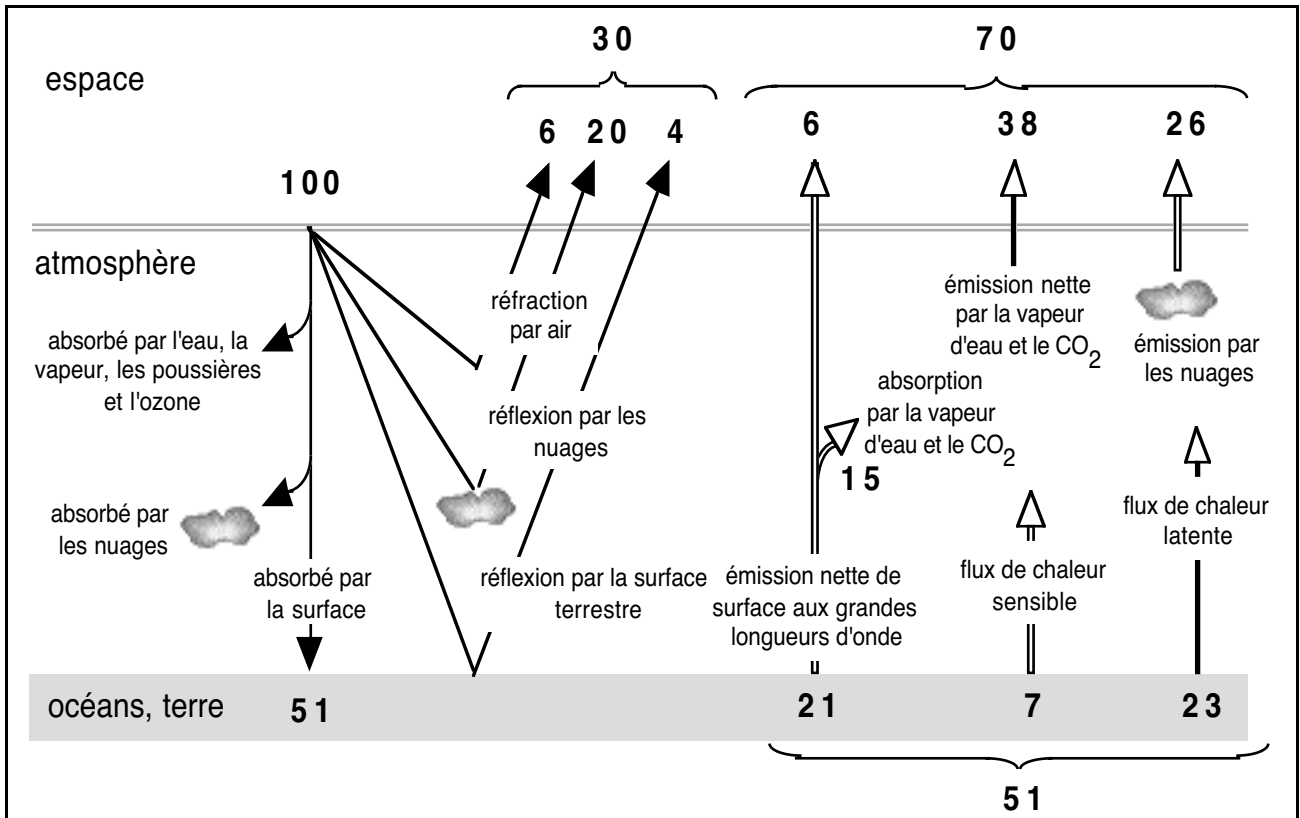


Figure 8: bilan radiatif moyen de la terre (en %)

Sur une année, le bilan est équilibré. Le flux incident d'énergie solaire est de  $342 \text{ W.m}^{-2}$ , mais cette énergie n'est pas totalement disponible.

- 30% repart vers l'espace

- l'énergie absorbée est compensée par une émission infrarouge équivalente par la Terre et l'atmosphère

- 25% est absorbé dans l'atmosphère

- arrivent en surface  $160 \text{ W.m}^{-2}$ , dont  $100 \text{ W.m}^{-2}$  correspondent à un excédent d'énergie qui réchauffe l'air environnant et permet l'évaporation.

Le cycle de l'eau redistribue cette énergie en atténuant les différences de température

Les phénomènes qui sont décrits ci-dessus ne correspondent évidemment qu'à une toute  
 315 petite partie du cycle de l'eau. L'intégration de données supplémentaires est indispensable pour  
 donner un tableau plus complet des phénomènes qui ont lieu. En particulier, il faudrait tenir compte  
 d'autres propriétés physico-chimiques de l'eau telles que les notions de couple rédox et acido-  
 basique, de solubilité, de précipitation et de complexation, qui ont un rôle fondamental dans  
 certaines étapes de ce cycle hydrologique.

320

Mais il s'agit là d'une autre histoire !!!