

DES RESSOURCES FINIES

On estime que les ressources planétaires en eau douce sont largement suffisantes et pourraient satisfaire aux besoins de 20 milliards d'êtres humains, mais la quantité globale d'eau continentale est finie ; ce qui signifie que le plus grave problème est celui de la détérioration de la qualité de cette eau. La question de l'eau n'est pas un problème de quantité mais de qualité

Selon Sokolov (1975 et Tardy (1986)	Capacité en millions de km ³	Part en %	Temps de résidence
Stock planétaire	1 386,1	100	
Stock océanique	1 338,000	97	3.172 ans
Stock continental	47,961	3	8.250 ans
Stock atmosphérique	0,017	0,0012	110 jours
Stock continental	47,961	100	8.250 ans
Réserves	47,914	99,9	8.250 ans
Écoulement	0,047	0,1	12 jours
Réserves continentales	47,914	100	
Inlandsis	24,000	50,1	8.250 ans
Lithosphère et pédosphère	23,713	49,5	315 ans
Lacs	0,200	0,418	6 ans
Phyto-zoosphères	0,001	0,0023	Quelques jours
Circulation	0,047	100	
Réseau hydrographique	0,0425	90,4	12 jours
Vélage des icebergs	0,0023	4,9	8.250 ans
Sources sous-marines	0,0022	4,7	?

Document 1.1 - Composition de l'hydrosphère.

En 1957, l'Américain C.E. Hutchinson présenta la première estimation de la quantité globale d'eau de la planète. Il avait non seulement évalué le volume des *eaux externes*, celles qui sont contenues par les océans et l'atmosphère, les fleuves et les lacs, les glaciers et les inlandsis, les eaux superficielles et souterraines, la zoosphère et la phytosphère... Mais aussi celui des *eaux internes* de l'écorce et du manteau. Il parvint à un chiffre faramineux. Dans ce premier chapitre, nous utiliserons souvent le million de Km³ ou 10⁶ Km³ comme unité de capacité ; et le volume qu'il estimait avoisinerait 25 750 10⁶ Km³, dont 98 % seraient contenus dans l'écorce et le manteau. L'évaluation n'avait rien d'aberrant ; les eaux internes existent, mais, en général, elles ne relèvent pas du cycle des eaux de surface, et doivent être plutôt considérées comme un élément minéral qui participe au métamorphisme par exemple. Cependant, elles peuvent parfois apparaître accidentellement, ce sont les eaux juvéniles de quelques sources thermales,

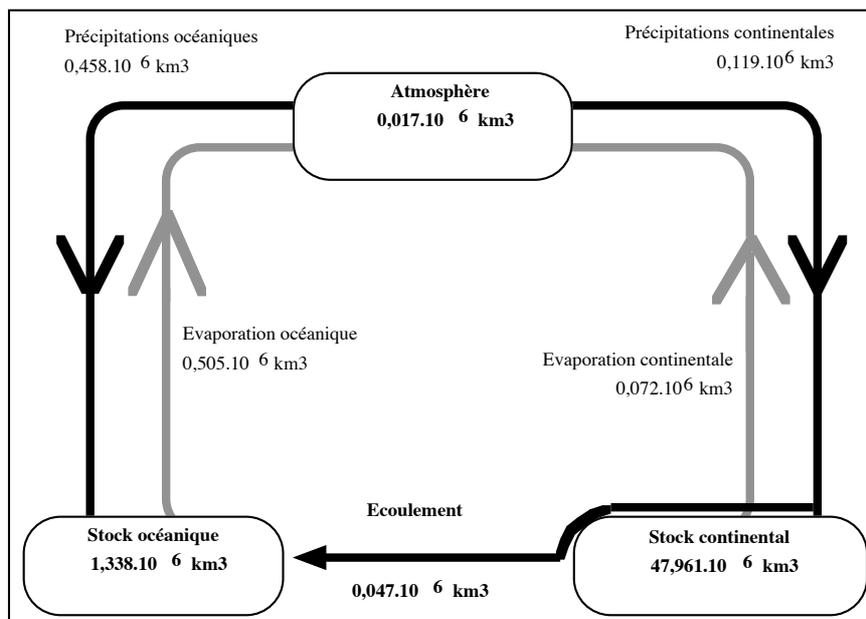
et surtout des éruptions volcaniques. Mais leur part est négligeable, car, en réalité, tout s'est joué lors de la formation de la planète, il y a près de quatre milliards d'années. L'estimation d'Hutchinson n'a qu'une valeur scientifique.

Puis, dans les années 1970, les travaux simultanés des Américains avec Leopold (1974), et des Soviétiques avec Lvovitch et Sokolov (1975) apportèrent des estimations fiables concernant le volume des *eaux externes*. Ces volumes furent confirmés en France par Y. Tardy en 1986 (document 1.1), avec un total voisin de $1\,400 \cdot 10^6 \text{ km}^3$.

Ces eaux externes se répartissent en trois grands ensembles dont les interconnexions constituent le **cycle de l'eau**.

I. LE CYCLE DE L'EAU

L'eau séjourne dans trois grands réservoirs de contenances très différentes, mais dont les réserves ne se maintiennent en équilibre que parce qu'elles font l'objet de flux. Si nous prenons le plus grand d'entre eux, le réservoir océanique, il subit l'*évaporation* qui constitue le *flux sortant*, mais celui-ci se trouve compensé par *deux flux entrants*, les *précipitations* océaniques d'une part et l'*écoulement* issu des continents d'autre part (document 1.2).



Document 1.2 - Le cycle de l'eau.

C'est ainsi que se réalise le cycle de l'eau depuis près de 4 milliards d'années. Car l'équilibre est à peu près réalisé depuis la fin du dégazage de

l'écorce terrestre, et la constitution du réservoir d'**eaux marines et océaniques** estimé à $1\,338.10^6 \text{ Km}^3$, il y aurait environ 3,8 milliards d'années

➤ **L'atmosphère** est un milieu assez pauvre en eau. C'est un *réservoir très tenu* : $0,017.10^6 \text{ Km}^3$. Par contre, elle fait l'objet de *flux très importants*. Elle reçoit un *double flux entrant* en provenance des océans et des continents estimé à $0,577.10^6 \text{ Km}^3$, et exporte un *double flux sortant* vers les océans et les continents de même valeur : $0,577.10^6 \text{ Km}^3$. C'est donc principalement un *lieu où l'eau en transit* couvre un volume 34 fois plus important que le volume stocké en permanence. Ce transit est la caractéristique essentielle du rôle de l'atmosphère dans le cycle de l'eau.

➤ **Les eaux continentales** concernent le plus directement la géographie humaine. On sait que la *capacité du réservoir* est estimée à $47,961.10^6 \text{ Km}^3$. Le *flux entrant* est *pluvial* avec un apport de $0,119.10^6 \text{ Km}^3$; mais ce ne sont que 0,25 % du stock. Le *flux sortant* est double ; une grande partie est évaporale : $0,072.10^6 \text{ Km}^3$ et retourne à l'atmosphère, mais une petite partie appartient à l'écoulement des eaux de surface : $0,047.10^6 \text{ Km}^3$, soit 0,01 % du stock continental.

Le cycle est donc bouclé, mais en réalité très peu d'eau circule : 91 % des eaux océaniques évaporées retournent à l'océan sous forme de pluies, 61 % des précipitations continentales sont immédiatement évaporées, et seulement $0,047.10^6 \text{ Km}^3$ d'eau circule, soit 0,03 % de l'ensemble des eaux atmosphériques, continentales et océaniques. Mais ce sont ces 0,03 % qui jouent le premier rôle dans la vie et l'économie de la planète. Il s'agira maintenant de ne retenir que la part des eaux continentales participant aux flux. Lu de manière différente, le cycle de l'eau montre que l'océan mondial est source de toutes ces eaux en transit, car s'il s'en évapore $0,505.10^6 \text{ Km}^3$, les précipitations océaniques ne sont que de $0,458.10^6 \text{ Km}^3$. Par conséquent, il s'y réalise un déficit de $0,047.10^6 \text{ Km}^3$ destiné aux continents. En effet, les précipitations continentales sont de $0,119.10^6 \text{ Km}^3$ contre $0,072.10^6 \text{ Km}^3$ évaporés. Il est vrai que la totalité des $0,047.10^6 \text{ Km}^3$ n'entre pas dans le "*cycle utile de l'eau*". On estime que $0,0\,022.10^6 \text{ Km}^3$ sont restitués à l'océan par les sources sous-marines, et que $0,0\,023.10^6 \text{ Km}^3$ sont transférés par la fonte des icebergs. Néanmoins, ce sont tout de même $0,0\,425.10^6 \text{ Km}^3$ qu'on retrouve à un moment ou à un autre dans l'écoulement fluvial.

Le bilan hydrologique peut être présenté comme n'importe quel budget, avec un *actif* et un *passif*. En général ce bilan est défini par l'égalité ...

$$\begin{array}{ccc} \text{Actif} & & \text{Passif} \\ \mathbf{P + (R + \delta R_1)} & = & \mathbf{Etr + Q + (R + \delta R_2)} \end{array}$$

... où R représente la capacité des réservoirs continentaux estimée à $47,961.10^6 \text{ Km}^3$. À l'actif, on rencontre d'abord les précipitations $\mathbf{P} = 0,119.10^6 \text{ Km}^3$ et une *restitution* δR_1 que \mathbf{R} réalise pendant une durée déterminée. Au passif, $\mathbf{Etr} = 0,072.10^6 \text{ Km}^3$ constitue l'*évapotranspiration*

réelle, c'est à dire la consommation naturelle sous l'action de la chaleur d'origine solaire ou *évaporation physique*, et la consommation réalisée par les êtres vivants pour la satisfaction de leurs besoins physiologiques ou *transpiration* (photosynthèse + respiration). Il faut y ajouter l'*écoulement Q* des 0,047.10⁶ Km³ d'eaux de surface, des sources sous-marines et du vêlage des icebergs, et une *recharge δR₂ des réserves* qui constitue ce qu'on nomme aussi les pertes par infiltration et gel, opposées aux pertes par évaporation.

Ecrité avec ses valeurs approchées l'égalité deviendrait...

Actif	=	Passif
0,119 + 47,961 + δR₁	=	0,72 + 0,47 + 47,961 + δR₂
48,08 + δR₁	=	48,08 + δR₂
δR₁	=	δR₂

... ce qui signifierait que les réserves continentales ont un volume constant, et que les pertes enregistrées au passif, seraient entièrement renouvelées par les gains récupérés à l'actif. Toutefois il faut tenir compte de la durée.

➤ **Sur une courte période** (l'année par exemple), il faut tenir compte de tous ces facteurs, et en particulier au cours des années sèches comme 1975-1976 ou 1989-1990-1991 où la recharge δR₂ des réserves eut tendance à être inférieure à sa vidange δR₁, ce qui entraîna l'assèchement de nombreuses nappes phréatiques en Europe occidentale.

➤ **Sur une longue période** (la décennie ou mieux le siècle) on admet l'équilibre *entre* δR₁ et δR₂ : le soutirage des réserves étant équilibré par l'infiltration. Mais, c'est admettre aussi une certaine stabilité climatique statistique. Le bilan devient alors P = E + ERC + EST.

➤ **Sur une très longue période** (le millénaire, ou la dizaine de milliers d'années) il faut, à l'inverse, faire intervenir les variations climatiques globales. Par exemple, au cours des glaciations δR₂ l'emporta très largement sur δR₁ par la mise en réserve d'une grande partie des précipitations sous forme de glace. Il en résulta une ponction considérable dans le réservoir océanique qui se serait abaissé d'une centaine de mètres. Au contraire, le réchauffement post-glaciaire provoqua la fonte de ces inlandsis : δR₁ étant nettement supérieur à δR₂, provoquant alors la remontée du niveau marin ou transgression flandrienne.

➤ **À l'échelle des temps géologiques** (millions à centaines de millions d'années) même les variations du stock des inlandsis sont négligeables, et l'on admet alors que la quantité d'eau contenue dans les océans est immuable depuis la fin de la condensation des eaux de l'atmosphère primitive, et du dégazage interne avec l'apparition de l'océan primitif, il y a entre 3,8 et 4 milliards d'années.

On en comprend mieux la complexité des rapports entre l'eau en réserve et l'eau en circulation. Mais pour ce qui nous concerne, nous n'évoquerons

pour l'instant que l'hypothèse d'une période décennale ou centennale. Ainsi sur la Charente à Cognac, on établit le bilan suivant pour la période 1960-1994.

Actif	=	Passif
P + d.R₁	=	Etr + Q + d.R₂
135 742 + 53	=	83 250 + 52 439 + 53 km³
99,94 + 0,06	=	61,31 + 38,63 + 0,06 %

Que remarque-t-on ? L'apport pluvial est primordial, mais la participation des réserves souterraines est dérisoire. L'écoulement est pluvial. L'évapotranspiration est la principale destination des pluies, mais les hydrologues préfèrent le terme de *déficit d'écoulement* ; il est ici de 8 3250 Km³ pour un apport pluvial de 135 742 Km³. Ainsi, 39 % des précipitations se sont retrouvées dans l'écoulement ; c'est le *coefficient d'écoulement*, lequel se révèle assez élevé, ce qui explique *certain usages* du fleuve : navigation, irrigation... On comprend encore pourquoi les basses eaux sont si prononcées en période de déficit pluviométrique, ou quand on *consomme trop d'eau d'origine fluviale*. La Charente représente un cas assez commun en Poitou-Charente, et dans le sud-ouest français.

Précipitations et déficits d'écoulement restent les deux paramètres fondamentaux dans l'expression des bilans hydrologiques.

II. LES RESSOURCES GLOBALES

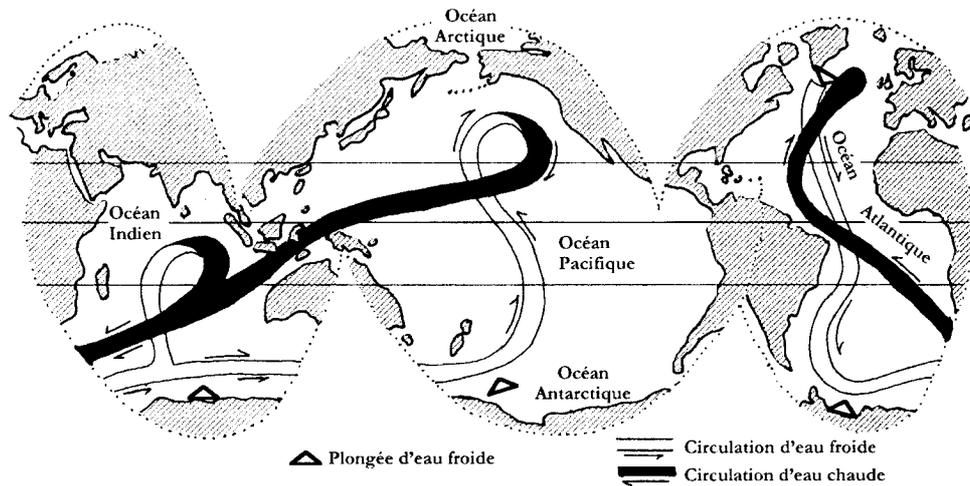
Les trois grands réservoirs, bien qu'ils concernent des quantités d'eau très différentes, sont intimement liés quant à leur fonctionnement. Mais, conséquence de leurs volumes respectifs, l'eau du cycle y séjourne plus ou moins longuement, aussi chacun d'entre eux constitue-t-il un système respectif, dans lequel on peut relever une certaine autonomie.

A. Les eaux atmosphériques sont assez bien connues

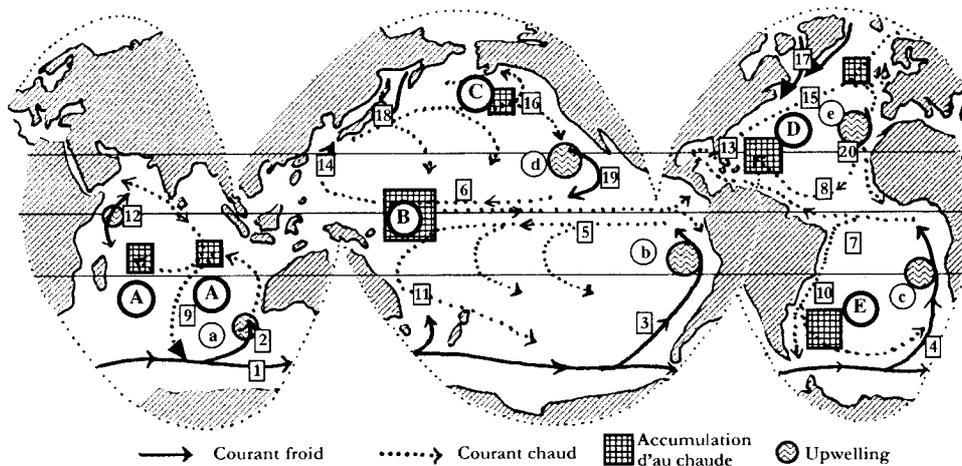
Elles proviennent principalement de l'évaporation physique des océans, des lacs, des eaux superficielles et de la vaporisation immédiate des pluies continentales ; mais une partie non négligeable provient aussi de la transpiration des êtres vivants.

Ces eaux se présentent sous deux formes : de la *vapeur d'eau* et une "*eau liquide*" constituée de gouttelettes microscopiques et/ou de minuscules cristaux de glace en suspension, les nuages. Les sondages par ballons ont permis d'en évaluer la capacité moyenne à 0,017.10⁶ Km³ : un volume modeste qui correspond en fait à la contenance moyenne d'une atmosphère à 1 013 hPa.

La réalité est que cette eau est en mouvement permanent et à renouvellement si rapide que le volume en transit est beaucoup plus important que le volume stocké en permanence. On sait que, les *flux entrant et sortant* sont de $0,577 \cdot 10^6 \text{ Km}^3$, soit un transit 34 fois supérieur aux réserves. Aussi, le *système-atmosphère* est-il autonome dans un cadre précis ; celui du fonctionnement de l'atmosphère, ou météorologie, et de la distribution zonale ou méridienne des climats. Or, dans notre contexte, ce mécanisme est indissociable de celui du couple évaporation-précipitation qui constitue le principal *météore*, avec la distribution des températures.



a - Itinéraires des transferts thermiques océaniques en profondeur.



b - Les courants de surface et leurs conséquences.

Document 1.3 - La circulation océanique.

B. Les eaux océaniques et marines

Ce sont les mieux appréhendées. Les auteurs se sont accordés pour un volume global de l'hydrosphère évaluée à $1\,386.10^6 \text{ Km}^3$ en moyenne, et $1\,338.10^6 \text{ Km}^3$ ou 96,5 % appartiennent aux océans. Bien que cette quantité soit fixe dans une échelle de temps courte, les temps historiques par exemple, cet immense réservoir est en perpétuel renouvellement du fait des cycles sans fin d'évaporation et de condensation provoqués par les mouvements de l'atmosphère, où d'ailleurs une part de cette eau en mouvement séjourne, avant de retourner aux océans. Si ce retour est direct dans le cadre des précipitations océaniques, une part de ces pluies se réalise sur les continents, où elle séjournera plus ou moins longuement dans des réservoirs très variés dont il est parfois difficile de déceler la capacité

1. Les importants échanges thermiques internes sont le fruit du perpétuel mouvement des océans. Même si cette mobilité relève de l'*océanographie*, les conséquences thermiques occasionnées en surface jouent un rôle important dans la répartition géographique de l'évaporation. Les inlandis sont des usines à produire de l'eau froide (document 1.3.a). Selon J.-P. Vigneau (2001) : « Dans l'Atlantique du nord-ouest, il y a production d'un énorme volume d'eaux froides. Ces eaux « plongent » alors et parcourent le fond de l'Atlantique jusque vers le 60^e degré de latitude sud. À partir de là, rejointes par leurs homologues formées à la périphérie de l'Antarctique, elles se répandent dans les océans Pacifique et Indien, en remontant très progressivement. ... S'il (ce transfert de masse) vient à s'interrompre, toute la marche du système océan-atmosphère s'en trouve modifiée ».

2. Les courants généraux animent les premiers hectomètres superficiels (document 1.3.b). Les vents dominants : *westerlies* de l'hémisphère sud et *alizés* tropicaux sont à l'origine des principaux déplacements d'eau de surface. Surmontant les eaux froides profondes, une eau également froide est entraînée en permanence par les vents d'ouest des 40^e *rugissants* : c'est la *grande dérive antarctique* (1). Du fait de la déflexion réalisée par les péninsules continentales et de la force de Coriolis, des branches obliquent vers le nord : le *courant ouest-australien* (2), le *courant de Humboldt* à l'ouest du Chili (3) et le *courant de Benguela* (4) au large de la Namibie. Selon le même mécanisme, les alizés chassent l'eau de surface vers les côtes des Antilles, et des Iles de la Sonde, suivant des *courants sud et nord équatoriaux* tant dans l'Océan Pacifique (5) et (6) que dans l'Atlantique (7) et (8), et l'océan Indien (9). Au contact des continents opposés et toujours du fait de la force de Coriolis, les *courants sud-équatoriaux* obliquent vers le sud : *courant du Brésil* (10) et *courant est-australien* (11). Dans l'hémisphère nord, le système des courants de Somalie présente l'originalité de s'inverser avec la Mousson. Mais les *courants nord-équatoriaux* atlantique et pacifique pénètrent dans la mer des Caraïbes et la mer de Chine, d'où ils s'échappent vers le nord le long

des côtes du Sud des États-Unis, le *Gulf Stream* (13) et le *Kuro-Shivo* (14). Ces deux courants conservent leur tiédeur jusqu'aux côtes d'Europe occidentale, la *dérive nord-atlantique* (15); et jusqu'aux côtes de l'Oregon et de la Colombie britannique, la *dérive nord-pacifique* (16).

Dans tous ces cas de figures, de l'eau chaude s'accumule dans des secteurs privilégiés : le centre et l'ouest de l'océan Indien (A), au nord-est de l'Australie (B), à l'est des Iles Hawaï (C), à l'est des Antilles (D) et du Brésil (E) et à l'est des Açores (F). Surtout dans le Pacifique, une partie de cette eau s'écoule à contresens : c'est le *contre-courant équatorial* (C.C.E) qui devient *El Niño* (Ñ) sur les côtes du Pérou.

Cependant de nouveaux courants froids apparaissent, issus de l'Arctique : les *courants du Labrador* et du *Groenland* (17) qui refroidissent la côte est du Canada et des États-Unis, et l'*Oya-Shivo* (18). Mais surtout, à la racine des courants équatoriaux l'eau de surface, chassée vers l'est, provoque la remontée d'eau de fond plus froide. Ce sont les *upwellings*, riches en plancton. Dans l'hémisphère sud, ils attirent aussi l'eau froide de la *grande dérive antarctique* : *upwelling ouest-australien* (a) et *courant ouest-australien* (2), *upwelling péruvien* (b) et *courant de Humbolt*, *upwelling de Namibie* et *courant de Benguela* (4). Dans l'hémisphère nord, ils engendrent des courants froids : *upwelling* (d) et *courant de Californie* (19), *upwelling* (e) et *courant de Mauritanie* (20).

La répartition de ces eaux froides et chaudes joue un rôle aussi important que la circulation atmosphérique dans la répartition des pluies continentales.

C. Les eaux continentales

Ces eaux participent plus ou moins directement à ce transfert, en stockant des volumes sans doute constants à long terme, mais qu'il est parfois difficile d'évaluer. Les réservoirs les plus volumineux sont les *glaciers* et *inlandsis* d'une part, et les *nappes superficielles* et *souterraines* d'autre part ; en effet, les eaux conservées dans les inlandsis et le sous-sol constituent plus de 99 % des eaux continentales. Comme ces stocks participent plus ou moins directement à l'écoulement, il est souhaitable d'approfondir leur présentation par rapport aux deux précédents.

1. Neiges, glaciers et inlandsis constituent la moitié des réserves continentales.

➤ **La chute de neige relève du mécanisme des précipitations** en raison de l'altitude et (ou) de la latitude du lieu et du balancement des saisons. Mais tant que les températures sont inférieures à 0°C, il se constitue un tapis neigeux : une forme de réservoir temporaire. Sous les basses latitudes, Himalaya, Kenya et Kilimandjaro ou Andes équatoriennes et boliviennes, le tapis neigeux est reconstitué en permanence et sa fonte entretient un apport hydrique pérenne. C'est lui qui soutient l'écoulement de l'Amazone ou de