

Chapitre 1

Une ressource renouvelable

Par définition, l'énergie hydraulique consiste en une énergie cinétique issue du mouvement continu ou alternatif des eaux. En effet, ce mouvement est continu dans le courant des fleuves et rivières, dans les rapides, les cascades et les chutes d'eau en général, mais il l'est aussi dans les courants marins généraux. Il est, à l'inverse, alternatif, dans le mouvement des marées et de leurs courants induits, et dans celui des vagues.

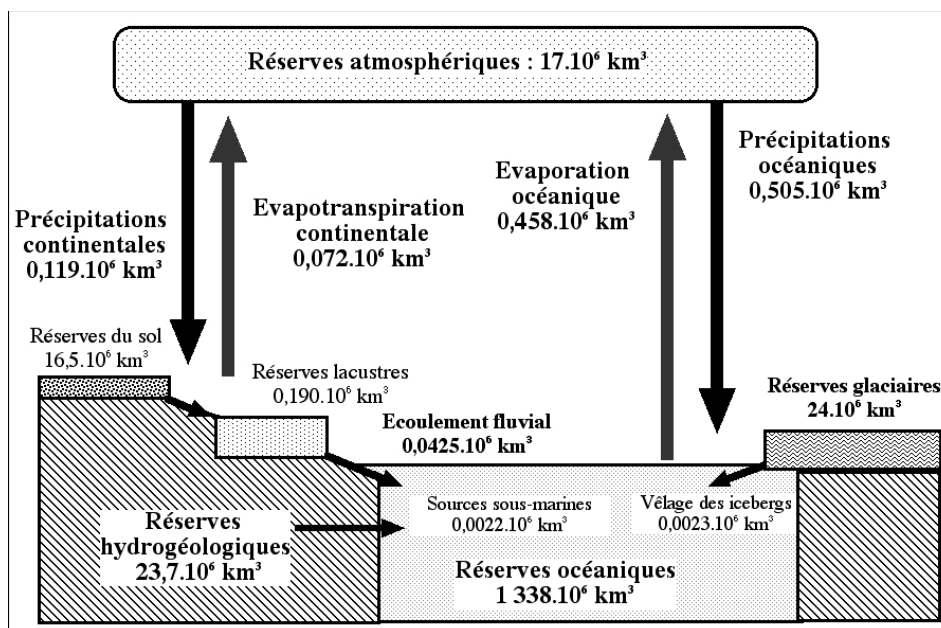
Mais, entre deux plans d'eau de niveaux différents - lacs de versants glaciaires des montagnes tempérées ou retenues artificielles construites par l'homme - il existe une énergie potentielle qu'il est possible de transformer en énergie cinétique en ouvrant une canalisation entre les deux plans d'eau. Du fait du principe des vases communicants, l'eau s'écoulera du plan le plus élevé vers le plus bas, générant un courant d'énergie cinétique. C'est ce mécanisme qui est évidemment le plus utilisé, car il fournit une énergie considérable, produite et distribuée avec régularité, ce qui n'est pas toujours le cas des mouvements naturels.

Notre planète est la seule du système solaire à posséder une hydrosphère, ce qui, vu de l'espace, lui donne la couleur bleue des océans et la couleur blanche des nuages et des glaces. Du fait d'une température moyenne de 15°C, comprise entre des minima extrêmes de -70°C à -80°C dans l'Arctique et l'Antarctique, et 60 à 70°C au sol, par certaines journées torrides du Sahara, l'eau existe sous ses trois états sur la Terre : glace, liquide et vapeur. Aussi, existe-t-il un cycle dans lequel l'eau passe successivement par ces trois états. L'état qui nous intéresse est l'état liquide, celui qui, naturellement, peut générer une énergie économiquement utilisable. La plus grande part des eaux est marine (plus des 9/10), mais elle fait l'objet de mouvements naturels relevant à la fois de la dynamique des vents saisonniers, donc des phénomènes météorologiques, des mouvements combinés du soleil et de la lune, ou marées, et de la taille, comme de la forme, des mers bordières et de leurs littoraux.

L'écoulement fluvial ne concerne qu'une infime partie de la masse d'eau contenue sur la Terre, mais c'est celle qui interfère le plus avec les activités humaines. Il est contrôlé par l'approvisionnement pluvial et les températures : deux facteurs climatiques. L'abondance saisonnière d'un cours d'eau peut alors varier très fortement, selon qu'il se tienne sur une façade océanique de l'hémisphère nord, dans une montagne tempérée, sur un bouclier arctique ou tropical.

1. Le cycle de l'eau

La condensation de la vapeur d'eau juvénile, il y a près de 4 milliards d'années, a fourni à la Terre un volume global estimable à $1\,400.10^6 \text{ km}^3$ qui est réparti dans l'atmosphère, les océans et les continents. Or, sur les continents, le volume d'eau qui se déplace dans les fleuves nous apparaît insignifiant : $0,047.10^6 \text{ km}^3$, soit 0,003 % d'un cycle hydrique considérable.



Document 1.1 - Le cycle de l'eau

L'eau séjourne dans trois réservoirs dont les volumes ne se maintiennent en équilibre que parce qu'ils 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 1.1). C'est le cycle de l'eau.

1.1.1. La partie superficielle des océans est en perpétuel renouvellement. C'est la conséquence du cycle fini mais sans limite de l'évaporation, de la condensation et de l'apport continental par les fleuves.

Dans les océans, le flux sortant ne concerne qu'un seul processus l'évaporation marine avec un total de $0,505.10^6 \text{ km}^3$. Le flux entrant, que nous venons de décrire comme marqué par une double provenance, prend la plus grande partie de son origine dans les précipitations océaniques avec un total de $0,458.10^6 \text{ km}^3$ (91 %). En face, l'apport continental apparaît mineur en volume avec seulement $0,047.10^6 \text{ km}^3$ (9%). Mais surtout les océans constituent un réservoir très stable. Très peu d'eau marine circule : le flux entrant (et le flux

sortant) et ne concerne que 0,038 % des réserves océaniques, et l'apport continental - 0,004 % - y apparaît presque négligeable.

L'atmosphère est un milieu assez pauvre en eau : $0,017 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. 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 $0,577 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Elle exporte un double flux sortant vers les océans et les continents de même valeur : $0,577 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. 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 $47,961 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Le flux entrant est pluvial avec un apport de $0,119 \cdot 10^6 \text{ km}^3$; mais ce ne sont que 0,25 % du stock. Le flux sortant est double; une grande partie est évaporale : $0,072 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ et retourne à l'atmosphère, mais une petite partie appartient à l'écoulement des eaux de surface : $0,047 \cdot 10^6 \text{ km}^3$, soit 0,01 % du stock continental.

1.1.2. 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 évaporés, et seulement $0,047 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ d'eau circulent, soit 0,03% de l'ensemble des eaux atmosphériques, continentales et océaniques. Mais ce sont ces 0,003 % ou 3 ppm qui jouent le premier rôle dans la vie et l'économie de la planète.

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 $0,505 \cdot 10^6 \text{ km}^3$, les précipitations océaniques ne sont que de $0,458 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Par conséquent, il s'y réalise un déficit de $0,047 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ destiné aux continents. En effet, les précipitations continentales sont de $0,119 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ contre $0,072 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ évaporés.

Il est vrai que la totalité des $0,047 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ n'entre pas dans le *cycle utile de l'eau*. On estime que $0,0022 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ sont restitués à l'océan par les sources sous-marines, et que $0,0023 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ sont transférés par la fonte des icebergs. Néanmoins, ce sont tout de même $0,0425 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ qu'on retrouve à un moment ou à un autre dans l'écoulement fluvial.

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

$$\begin{array}{ccc} \text{Actif} & & \text{Passif} \\ P + (R + \partial R_1) & = & E_{tr} + Q + (R + \partial R_2) \end{array}$$

... où R représente la capacité des réservoirs continentaux, estimée à $47,961 \cdot 10^6 \text{ km}^3$.

À l'actif, on rencontre d'abord les précipitations $P = 0,119.10^6 \text{ km}^3$ et une restitution ∂R_1 que R réalise pendant une durée déterminée. Au passif, l'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 $0,047.10^6 \text{ km}^3$ d'eaux de surface, des sources sous-marines et du vêlage des icebergs, et une recharge ∂R_2 des réserves qu'on nomme aussi les pertes par infiltration et gel, opposées aux pertes par évaporation.

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

Actif	=	Passif
$0,119 + 47,961 + \partial R_1$	=	$0,72 + 0,47 + 47,961 + \partial R_2$
$48,08 + \partial R_1$	=	$48,08 + \partial R_2$
∂R_1	=	∂R_2

... 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. À l'échelle annuelle, on estimera que c'est vrai.

2. L'énergie cinétique des océans

Avec un volume estimé à $1\,338.10^6 \text{ km}^3$, les cinq océans rassemblent près de 95 % des eaux de la planète (document 1.1 ci-dessus). Ils constituent une masse considérable d'énergie potentielle, du fait des différences de température et de salinité entre le fond et la surface. À partir de 1 000 m de profondeur, la température de l'eau est, en moyenne, de 4°C ; mais entre les deux tropiques, les eaux de surface ont une température moyenne de 28°C . Dans le sens vertical, les eaux de l'océan intertropical constituent, sur une colonne de 1 000 m, une source froide profonde de 4°C et une source chaude superficielle de 28°C , qui théoriquement seraient capables d'alimenter une machine thermique. On reconnaît le concept de la pompe à chaleur : de la source froide on extrairait la chaleur, qui serait réinjectée dans la source chaude. Mais on peut aussi concevoir un moteur à vapeur fonctionnant avec une chaudière à 28°C et un condensateur à 4°C . L'idée d'une telle machine fut évoquée par Paul Boucherot et Georges Claude dans les années 1920.

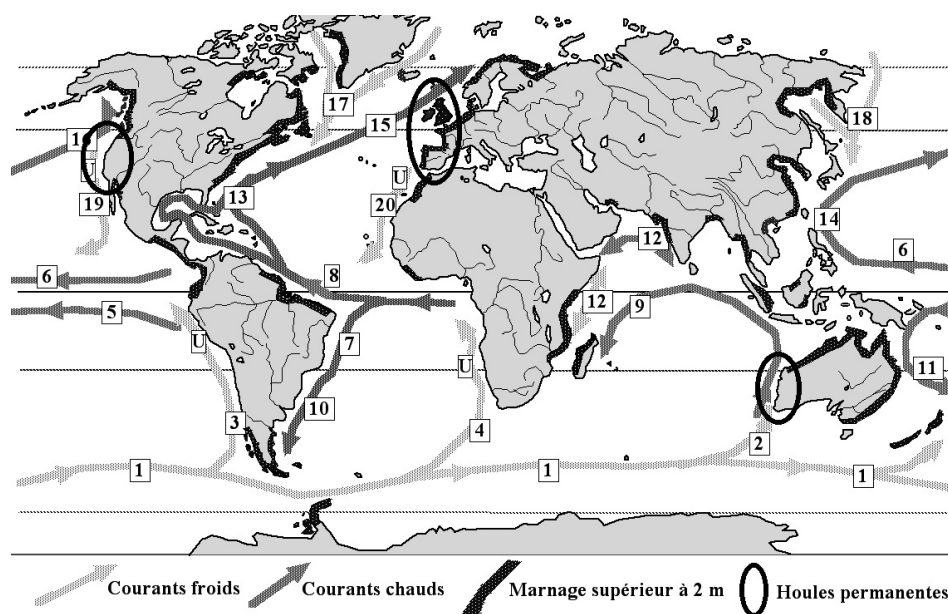
Toutefois, nous n'envisagerons que les mouvements permanents de la l'océan : les courants généraux, les marées et les courants qu'elles génèrent, ainsi que la grande houle engendrée par le vent.

2.1. Les courants généraux

Ils animent les premiers hectomètres superficiels (document 1.2.b).

2.1.1. *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 profondes très froides, une eau également froide est entraînée en permanence par les vents d'ouest des 40° 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.



Document 1.2 - Courants, marées et houles : énergie des océans

Selon le même mécanisme, les alizés chassent l'eau de surface vers les côtes des Antilles et des îles 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 Etats-Unis et de la Chine : 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).

2.1.2. Cependant, des courants froids sont issus de l'Arctique : les courants du Labrador et du Groenland (17) qui refroidissent la côte est du Canada et des Etats-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(U) 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 et courant de Humboldt, 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. Mais on a aussi envisagé de capter cette dynamique et de la convertir en énergie mécanique puis en électricité, comme nous l'évoquerons à la fin de cet ouvrage.

2.2. Les marées et les courants de marées

Au cours d'un premier processus le niveau de la mer monte pendant quelques heures et se stabilise : c'est l'étale de haute mer. Ensuite le niveau redescend jusqu'à un étale de basse mer. On appelle alors flot ou flux, la marée montante, reflux ou jusant, la marée descendante. Enfin, la différence entre les deux étales d'une même marée est le marnage.

2.2.1. C'est Newton qui démontra l'origine astronomique de la marée. L'élévation et l'abaissement périodiques de la surface marine sont dus à l'attraction exercée par le Soleil et la Lune sur notre globe. Si la Terre était isolée dans l'univers, les seules forces à s'exercer sur les océans seraient les forces de la pesanteur, et dans ce cas, la surface de l'Océan Mondial prendrait la forme d'une sphère.

Cependant la Terre n'est pas isolée, et Newton démontra que les astres s'attirent proportionnellement à leur masse et en raison inverse du carré de leur distance : un astre nous influence d'autant plus qu'il est gros et proche. D'autre part, la Terre a un diamètre non négligeable en regard de la distance Terre-Lune : l'attraction de la Lune varie donc d'un point à l'autre de la surface de la Terre d'une petite quantité par rapport à l'attraction moyenne (appliquée au centre de la Terre). Cette petite différence s'appelle la force de marée. Ces forces de marée s'exercent en tous points du globe et sont importantes sur les océans où la surface de l'eau prend la forme d'un ballon de rugby pointé vers la Lune. Ce même schéma s'applique au Soleil ; une fois cela admis, les marées deviennent simples à comprendre.

La force de marée varie de façon régulière, selon la position relative du Soleil et de la Lune. Lorsque le soleil, la lune et la terre sont alignés, on dit en syzygie, il existe deux cas de figure : la Lune et le Soleil sont du même côté de la Terre, soit en conjonction, ou de part et d'autre de la Terre, soit en opposition. Dans les deux cas, leur action s'ajoute et la force de marée sera élevée. Les marées en conjonction et en opposition ont une grande amplitude, ce sont des marées de vive-eau correspondant à la nouvelle Lune et à la pleine Lune. Le fait est accentué au moment des équinoxes.

Lorsque La Terre, la Lune et le Soleil forment un angle droit, ils sont en quadrature, et leur action s'oppose ; aussi l'attraction exercée est celle de la Lune diminuée de celle du Soleil. Les marées en quadrature, d'une amplitude beaucoup plus faible, sont une marée de morte-eau, qui se rencontre au premier quartier ou au dernier quartier de la Lune. L'action prépondérante de la Lune, qui reparaît au même point de l'horizon au bout de 23 heures 56 mn 4,1 secondes, explique que les marées qu'elle détermine se succèdent chaque jour avec un retard de 56 mn sur la veille. Il en est ainsi dans l'Atlantique Nord où la mer monte deux fois en 23 h 56'.

Mais le phénomène de marée est beaucoup plus compliqué et résulterait de la combinaison d'ondes variées provoquées par des forces diverses, ce qui expliquerait certaines anomalies. Si les marées lunaires, semi-diurnes, l'emportent sur nos côtes, celles de la Polynésie ont un rythme semi-diurne solaire : la mer monte exactement deux fois en 24 heures avec les pleines mers toujours un peu après midi et minuit. En Nouvelle-Guinée, la marée diurne est solaire avec une seule pleine mer par jour à 24 heures d'intervalle.

Quant au marnage, nous autres, Européens de l'Ouest, sommes habitués aux fortes marées de l'Atlantique et de la Manche. C'est une illusion : en beaucoup de lieux, les marées sont modérées.

Les marnages faibles - 0,10 m à 1 m - sont le fait des mers fermées : Méditerranée, Caraïbe, Mer Rouge, et des petites îles au milieu des Océans : Polynésie, Mélanésie, Micronésie, îles de l'Atlantique médian, Mascareignes. Toutefois, les marées peuvent dépasser 1 m et atteindre parfois 1,90 m au fond des golfes étroits : Mer Adriatique, 2 m dans le fond du Golfe de Gabès, 1,80 m à Suez, fond du Golfe Persique. Ces marnages relativement forts sont réalisés dans des culs-de-sac s'ouvrant largement sur le reste de la mer : ainsi pour la Mer Rouge et la Méditerranée.

Les marnages moyens - 1 à 2 m - n'ont pas de répartition bien particulière et s'observent surtout sur les côtes rectilignes des continents.

Les marnages forts et très forts de plus de 2 m (les seuls cartographiés sur le document 1.2) relèvent des rivages précédés d'une large plate-forme continentale, ou bien dans les détroits. La première coïncidence est réalisée en Europe du NW (Manche, Mer du Nord), en Mer de Chine septentrionale, sur la

côte NW de l'Australie, sur la côte NE des États-Unis et E du Canada, et en Patagonie. La seconde coïncidence se rencontre dans le détroit d'Ormuz, le canal de Mozambique, les détroits malais

Plus que la périodicité, ce sont ces forts marnages qui pourraient jouer un rôle dans la production d'énergies renouvelables.

2.2.2. *Ce sont alors les courants induits par la marée qui sont intéressants.* Ils ne sont pas les plus répandus, mais ce sont les plus rapides ; ceux qu'en Bretagne on nomme raz. Au Canada, le Skookumchuck Narrows peut dépasser 12 nœuds (22 km/h). Leur connaissance et leur localisation ont toujours été du plus haut intérêt par suite de la gêne qu'ils peuvent apporter à la navigation, et de leurs effets possibles sur le relief du littoral. Leur vitesse s'accroît pendant les marées de vive-eau, mais l'amplitude du marnage n'est pas le facteur aggravant, et deux paramètres sont à retenir.

2.2.2.1. *Le franchissement d'un étranglement et/ou d'un haut fond accroît la vitesse,* car la même quantité d'eau doit être évacuée. Aussi, dans le cas des courants généraux qui ne s'écoulent pas dans un chenal limité et dont la pente du fond est nulle, la vitesse ne variera pas.

Dans le cas qui nous concerne, il faut évoquer le rapport V/h entre la vitesse V et la profondeur h du milieu. Sur une plage, au cours du flot par exemple, la vitesse de la masse d'eau qui arrive n'augmente pas car la profondeur s'accroît. Dans un chenal entre deux îles, entre une île et le continent et/ou à l'entrée d'une baie, si la pente est nulle, le schéma sera le même, la profondeur croît avec le flux, et la vitesse V du courant reste uniforme et généralement faible. Mais, le passage d'un détroit est généralement accompagné d'une diminution de la profondeur. Alors que la même quantité d'eau afflue, le rapport V/h doit s'élever au profit de la vitesse. Ce détroit constitue un goulet qui gêne la progression du flot, lequel augmente sa vitesse : c'est ce phénomène d'accélération qui prend le nom de raz en Bretagne (et non le profil géomorphologique comme on le pense trop souvent).

C'est dans de telles situations qu'on observe généralement les courants les plus violents du monde. Dans le *Raz de Sein*, entre l'île de Sein et la pointe du Raz, et dans le *Fromveur*, chenal entre Ouessant et le plateau de Molène, le flot peut atteindre 10 à 11 nœuds au maximum du flot. À l'entrée du Morbihan, malgré un marnage faible pour la Bretagne (5,55 m à Port-Navalo), le courant atteint 8 nœuds au jusant, par coefficient maximal.

Mais des valeurs plus élevées sont connues dans le monde : dans le Salström (Norvège), entre un fjord et la mer, et dans certains détroits des îles Soula (Moluques), le flot atteint 16 nœuds (près de 30 km/h).

2.2.2.2. *De grandes différences horaires de la marée entre des points rapprochés ont le même résultat,* du fait du principe des vases communicants.