

Chapitre I :

LE CYCLE DE L'EAU

La circulation et le séjour de l'eau dans le sous-sol sont une étape d'un processus sans fin, *le cycle de l'eau*. Par les précipitations et le ruissellement, une fraction de l'eau entraînée dans ce cycle s'infiltre sous terre.

L'infiltration, en renouvelant l'eau des réservoirs souterrains, alimente les circulations profondes à l'origine des sources.

Mais il existe aussi un cycle interne de l'eau, dans lequel une fraction est entraînée en profondeur dans les zones de subduction et restituée par l'intermédiaire du volcanisme.

1.1. Cycle interne de l'eau :

L'eau du manteau est partiellement restituée en surface par les magmas basaltiques ou directement par des sources chaudes et des fumerolles très minéralisées comme les fumeurs noirs et les diffuseurs blancs des dorsales médio-océaniques.

Au fond des océans, l'eau de mer s'infiltre dans la croûte et hydrate les roches. La teneur en eau de la croûte altérée atteint 1 à 2 %. Dans les zones de subduction, la croûte est entraînée vers le manteau qui s'enrichit ainsi en eau.

On estime que la quantité d'eau rejoignant la profondeur est comprise entre 5 et $16 \cdot 10^{11}$ kg par an. Le bilan est difficile à quantifier. Il est considéré comme équilibré puisque le niveau des océans est relativement stable.

1.2. Répartition de l'eau :

L'eau existe sous forme **gazeuse** dans l'atmosphère, sous forme **liquide** dans les océans, les cours d'eau et les aquifères, sous forme **solide** dans les neiges, glaciers et banquises (figure 1).

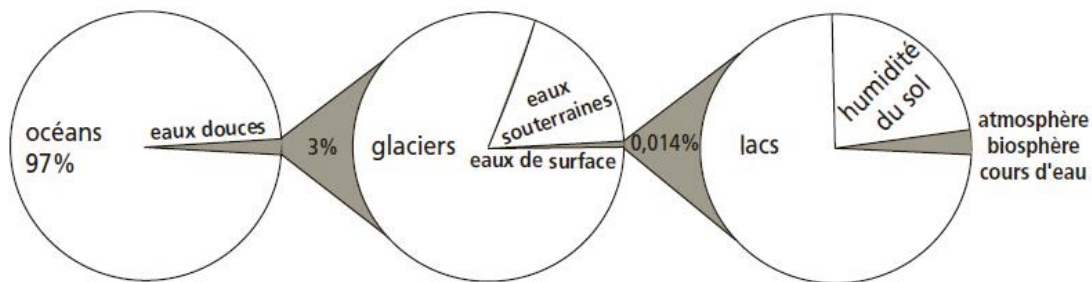


Figure 1- Différents types d'eau sur la planète.

Elle est aussi présente dans la plupart des roches :

- **eau de constitution** qui entre dans la formule des minéraux ;
- **eau présente dans les pores fermés** ;
- **eau adsorbée**, fixée électriquement aux surfaces ioniques, et extractible ou non par les racines des plantes ;
- enfin, **eau gravitaire** qui peut circuler dans les pores et discontinuités ouverts des roches. C'est le domaine de l'hydrogéologie. Elle peut occuper d'importants volumes souterrains et constituer des réserves de plus en plus sollicitées.

La figure 2 présente une estimation de la répartition (en %) de l'eau sur le globe. Il ne s'agit que d'un ordre d'idée, car l'évaluation des réserves souterraines est très variable selon les auteurs, entre 7 et $30 \cdot 10^6$ km³.

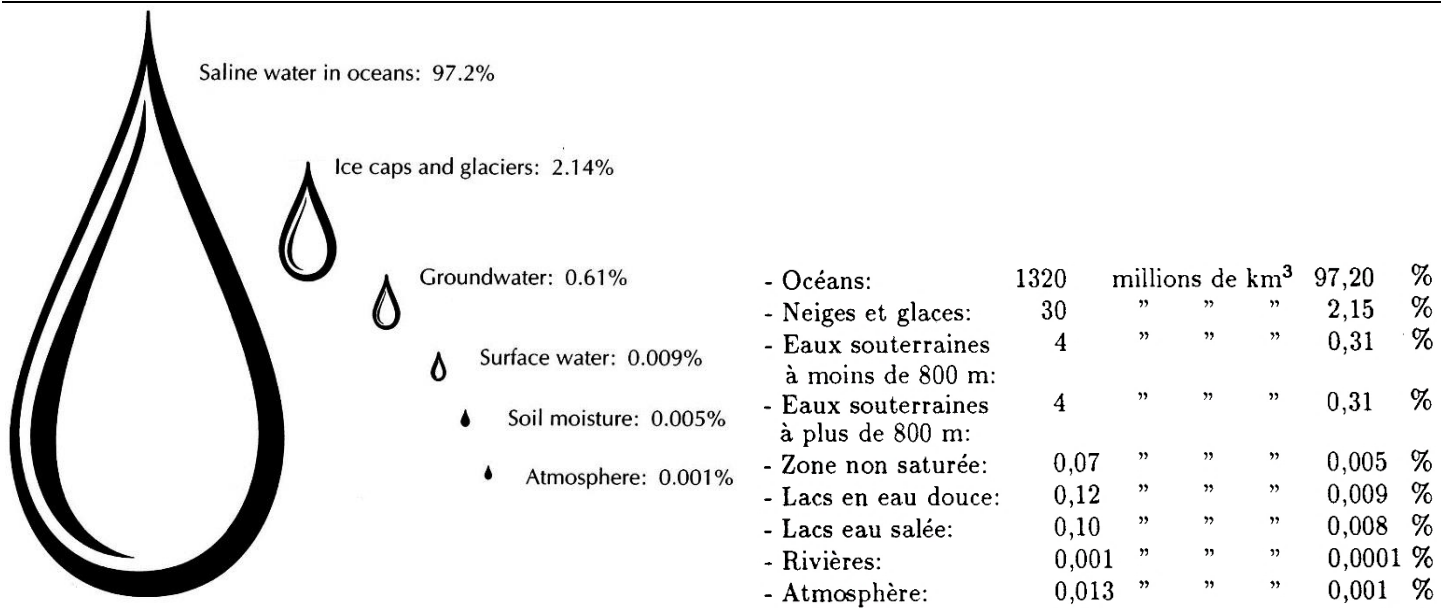


Figure 2- Répartition de l'approvisionnement mondial en eau (d'après : Filimonau and Barth 2016 ; Shiklomanov 1993).

1.2.1. Le cycle de l'eau :

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau des océans et des surfaces terrestres passe en phase gazeuse, et s'élève dans l'atmosphère où elle se condense sous forme de gouttelettes (figure 3).

Elle retombe dans les océans et sur terre sous forme de précipitations liquides ou neigeuses. Leur volume annuel est estimé à 577 000 km³.

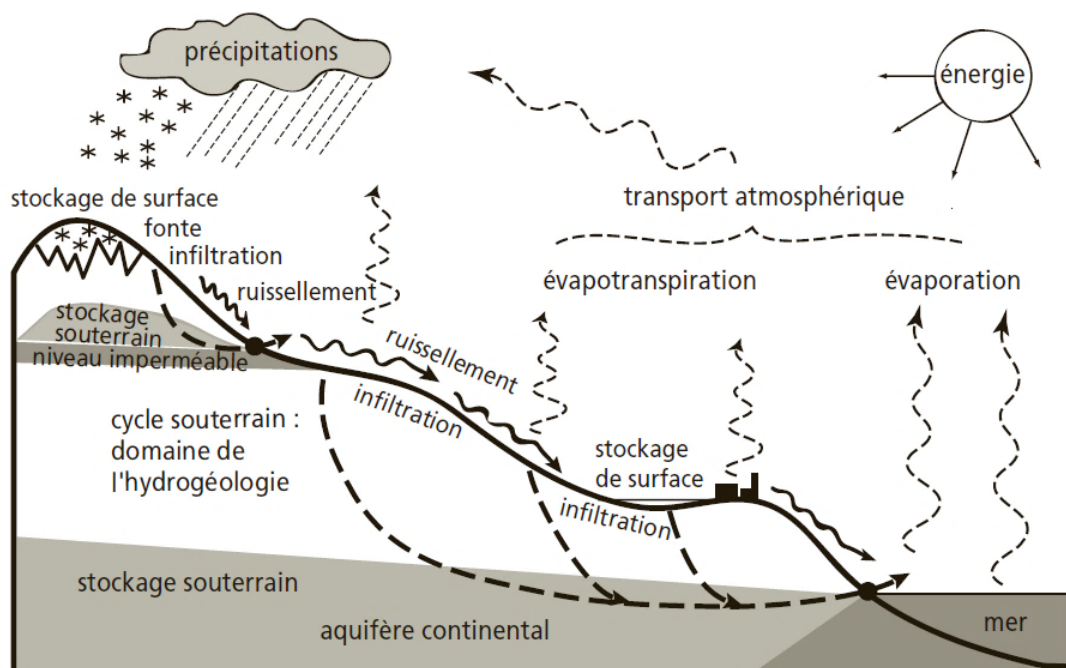


Figure 3- Cycle externe de l'eau.

Les précipitations alimentent les dépôts de glace et de neige dans les zones froides. Dans les zones chaudes, la pluie non interceptée par la végétation fournit les eaux de ruissellement qui forment les cours d'eau.

Une partie des précipitations pénètre dans le sous-sol et constitue les eaux d'infiltration, domaine de l'hydrogéologie.

En effet, lorsque l'eau atteint un terrain perméable, elle peut s'infiltrer. L'infiltration est partielle et diffuse dans la plupart des cas ou quasi nulle lorsque la roche est imperméable (argiles), mais elle peut être concentrée et totale dans certains systèmes karstiques, où des cours d'eau se jettent dans des cavités souterraines.

L'hydrogéologie s'intéresse principalement à la partie souterraine du cycle entre l'infiltration et la restitution. Cette dernière pouvant être rapide mais aussi très lente, comme dans le cas des aquifères fossiles du Sahara, pour lesquels le transit de l'eau peut prendre plusieurs dizaines ou centaines de milliers d'années.

Tableau 1- Ordre de vitesse de transit dans les différents réservoirs.

Milieu naturel	Temps de transit
Atmosphère	Quelques heures à quelques jours
Glaces continentales	Quelques centaines à quelques milliers d'années
Surface du sol	Quelques jours à quelques mois
Aquifères	Quelques semaines à plusieurs centaines de milliers d'années

Les aquifères et les glaces jouent donc un rôle de régulateur à long terme des eaux qui transitent sur les continents. À l'exception des eaux infiltrées, protégées du rayonnement, les autres classes d'eau sont à nouveau soumises au changement de phase. Dans les milieux à surface d'eau libre ou dépourvus de végétation, évaporation et évapotranspiration sont confondues.

Sur une portion de territoire :

$$P = Q + I + ET + \Delta R.$$

avec : **P** précipitations ; **Q** lame d'eau écoulee ; **I** lame d'eau infiltrée ; **ET** évapotranspiration, **ΔR** variation des réserves. Les valeurs sont généralement exprimées en *mm*.

Les précipitations efficaces **PE** correspondent à l'eau réellement disponible pour alimenter ruissellement et infiltration.

$$PE = P - ET.$$

1.2.2. Les systèmes hydrologiques et les bilans :

Le cycle de l'eau peut s'aborder à l'échelle du globe, mais aussi à celle des unités géographiques ou structurales qui forment les systèmes hydrologiques. On peut classer ces systèmes en trois domaines.

a) Bassin hydrologique :

Il correspond au bassin versant d'un cours d'eau et de ses affluents, limité généralement par les crêtes topographiques, sauf dans certains cas, les zones karstiques par exemple. Au niveau du bassin, sur un long terme, le bilan est équilibré.

Le volume des précipitations efficaces est théoriquement égal au volume total d'eau écoulee.

$$PE = Q_T$$

avec **Q_T** : lame d'eau écoulee totale, exprimée en *mm*.

Cependant **Q_T** n'est pas facile à appréhender, car une partie de l'eau circule en souterrain et peut être évacuée du système de façon occulte, par exemple en direction d'un autre bassin ou directement en mer dans les zones littorales.

b) Aquifère :

L'aquifère (du latin *aqua fero* : porter l'eau) est une structure géologique perméable contenant de l'eau, comme des alluvions de rivière, des granites fissurés, un plateau calcaire, etc. Issue de l'infiltration, l'eau contenue dans un aquifère circule dans le sous-sol et nourrit une ou plusieurs sources, ou se déverse de façon occulte dans un milieu récepteur, mer, lac, cours d'eau ou autre aquifère.

Un aquifère est caractérisé par sa géométrie, sa superficie et sa profondeur, et par les caractéristiques intrinsèques de la roche dont il est formé, lithologie, porosité, perméabilité, fracturation, homogénéité, etc.

L'aquifère permet un stockage plus ou moins important et plus ou moins long de l'eau infiltrée ; le transit peut aller de quelques heures à plusieurs centaines de milliers d'années.

c) Bassin hydrogéologique :

Ce système correspond à la partie souterraine contenant de l'eau, d'une portion, de la totalité ou de plusieurs bassins hydrologiques. Il est constitué d'un ou plusieurs aquifères.

d) Bilans :

Afin d'étudier le fonctionnement des systèmes hydrologiques, on effectue des mesures et des bilans, en quantifiant les entrées et les sorties d'eau, afin d'évaluer les volumes d'eau circulant dans les différents réservoirs du cycle.

$$P = Q + ET + \Delta R.$$

Avec : **P** précipitations ; **Q** ruissellement et écoulements souterrains ; **ET** évapotranspiration ; **ΔR** variation des réserves (eau souterraine, neige, glace) pendant la période d'étude. Les valeurs peuvent être exprimées en mm ou en m³.

Ce bilan s'effectue sur une année hydrologique, période d'environ 12 mois choisie pour que les variations des réserves **ΔR** soient minimales.

La fréquence et la durée des mesures sont des points très importants. Du fait des variations climatiques, une réflexion sur une durée de 10 ans est indispensable pour travailler sur une année hydrologique représentative. Plus la fréquence des mesures est élevée, plus la précision sera importante.

1.2.3. L'évapotranspiration

Des différentes parties du cycle de l'eau, l'évapotranspiration est le point le plus délicat à évaluer. Contrairement aux pluies ou aux écoulements qui peuvent faire l'objet d'une approche quantitative satisfaisante, bien que peu précise, il est actuellement très difficile de mesurer directement le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

L'évapotranspiration dépend de nombreux facteurs :

- température du sol, de l'air et de l'eau ;
- hygrométrie de l'air (quantité de vapeur d'eau contenue de l'air humide) ;
- état et quantité d'eau contenue dans le sol ;
- rayonnement solaire ;
- vent et pression atmosphérique ;
- nature et état de la végétation ;
- topographie et exposition.

Diverses formules permettent d'évaluer l'évapotranspiration. Il convient de différencier l'évapotranspiration potentielle **ETP**, qui est la quantité d'eau théoriquement évaporable par une surface d'eau libre, et l'évapotranspiration réelle **ETR**, qui est la quantité d'eau réellement évaporée et qui dépend des conditions naturelles (végétation, nature du sol...) et de la quantité d'eau disponible dans le sol aussi appelée réserve utile (**RU**). Cette quantité d'eau est comprise entre 0 (réserve superficielle vide) pendant l'étiage et une valeur maximale appelée réserve en eau facilement utilisable (**RFU** ou **RU_{max}**).

Les zones désertiques ont ainsi une **ETP** très élevée mais une **ETR** très réduite, du fait d'une **RU** nulle.

A. Calcul de l'ETP :

L'**ETP** peut être évaluée à l'aide de nombreuses formules (Thornthwaite, Turc, Primault, Penman, FAO-Penman-Monteith, ...).

La figure 4 présente une estimation de l'**ETP** dans les différentes zones climatiques du globe :

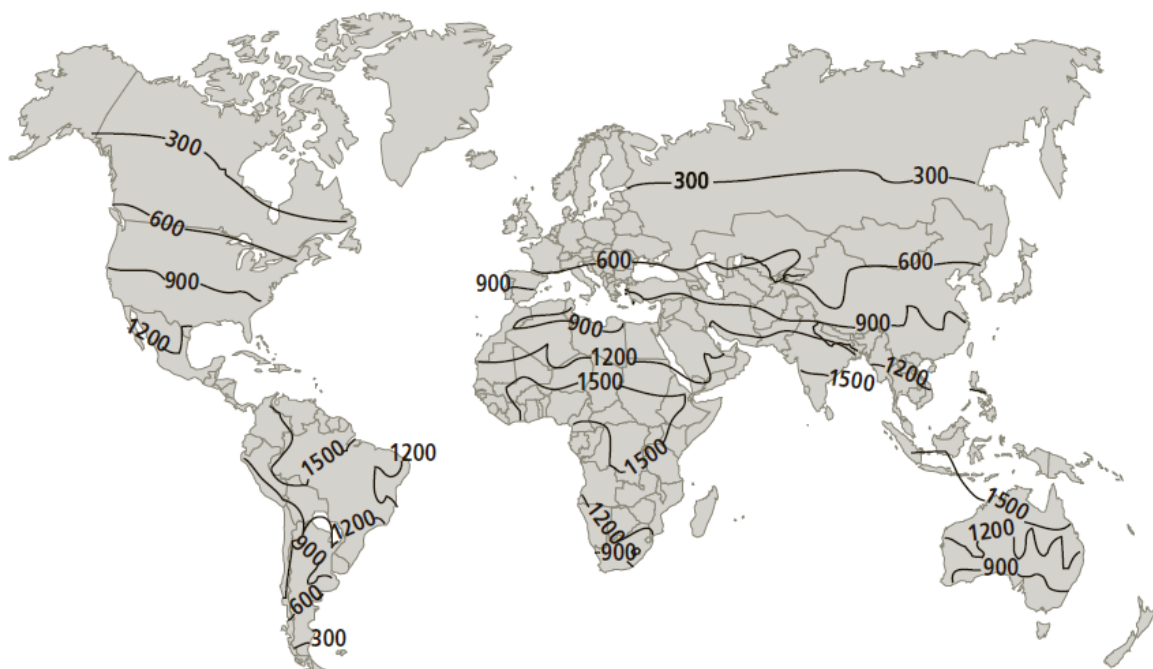


Figure 4- Évapotranspiration potentielle annuelle (en mm) des différentes zones du globe (D'après Ahn et Tateishi, 1994).

B. Méthode du bilan hydrologique :

On conçoit bien que, compte tenu des multiples paramètres et de la diversité des environnements naturels, l'approche expérimentale puisse être aussi précise que le calcul. L'évapotranspiration réelle peut ainsi être sommairement évaluée en faisant le bilan sur un long terme des entrées et sorties d'eau sur des unités hydrologiques ou hydrogéologiques bien circonscrites. Si, sur l'ensemble du bassin, on connaît bien les précipitations, grâce à des réseaux de pluviomètres, et les débits des cours d'eau grâce à des seuils de mesure.

$$ETR = Q_e - Q_s \pm \Delta R.$$

avec Q_e ensemble des flux entrants ; Q_s ensemble des flux sortants ; ΔR variation des réserves.

Si ces mesures peuvent être acquises sur plusieurs années, pour minimiser l'incertitude liée au renouvellement des réserves souterraines, alors le terme ΔR devient négligeable puisque l'eau infiltrée est restituée sous forme d'écoulement et $ETR = Q_e - Q_s$.

C. Méthodes expérimentales :

L'**ETR** peut être mesurée expérimentalement à l'aide d'un lysimètre, bac qui contient un sol couvert ou non de végétation et dont on évalue la quantité d'eau infiltrée et drainée par rapport à celle apportée par les précipitations. La mesure peut se faire par pesée ou par collecte de l'eau infiltrée.

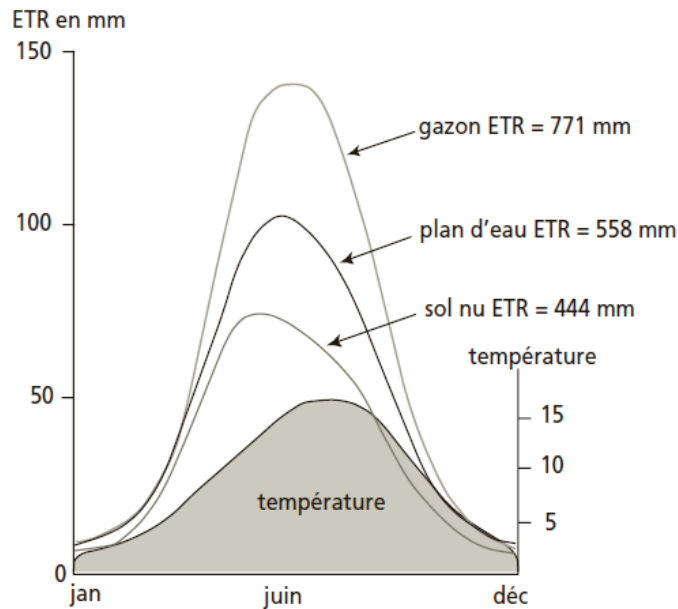


Figure 5- Évapotranspiration réelle mesurée sur des aux Pays-Bas (d'après Lambert, 1996).

D. Mesures directes :

La télédétection permet d'élaborer, à partir d'images satellitaires dans l'infrarouge thermique, des cartes de température de surface et d'évapotranspiration réelle.

À l'échelle de l'Europe, on considère qu'environ 60 % de l'eau des précipitations repart dans l'atmosphère par évapotranspiration (figure 6).

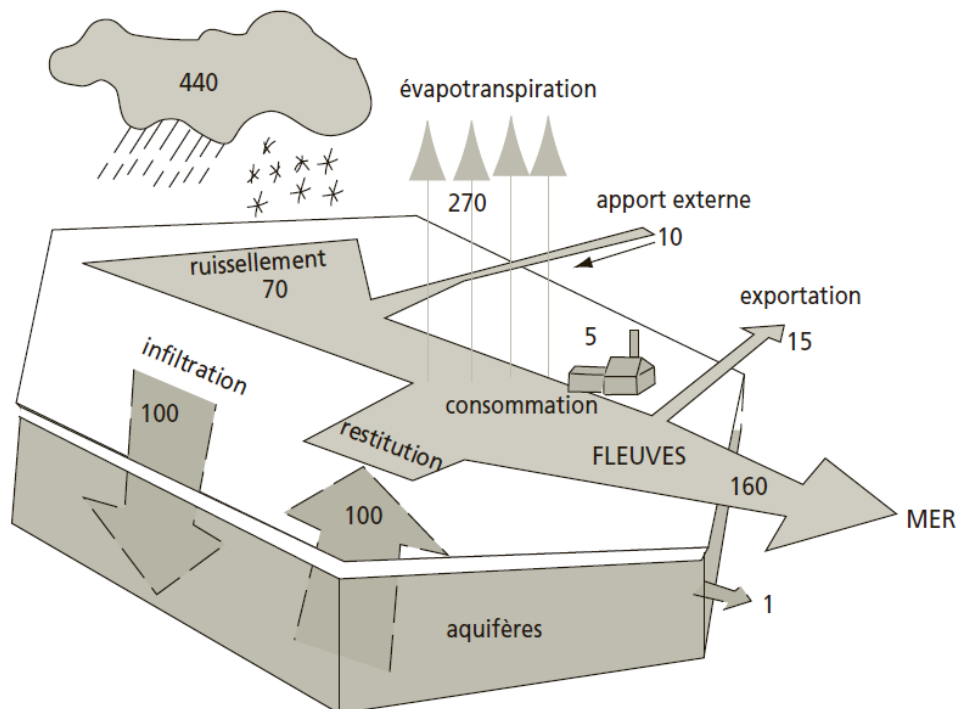
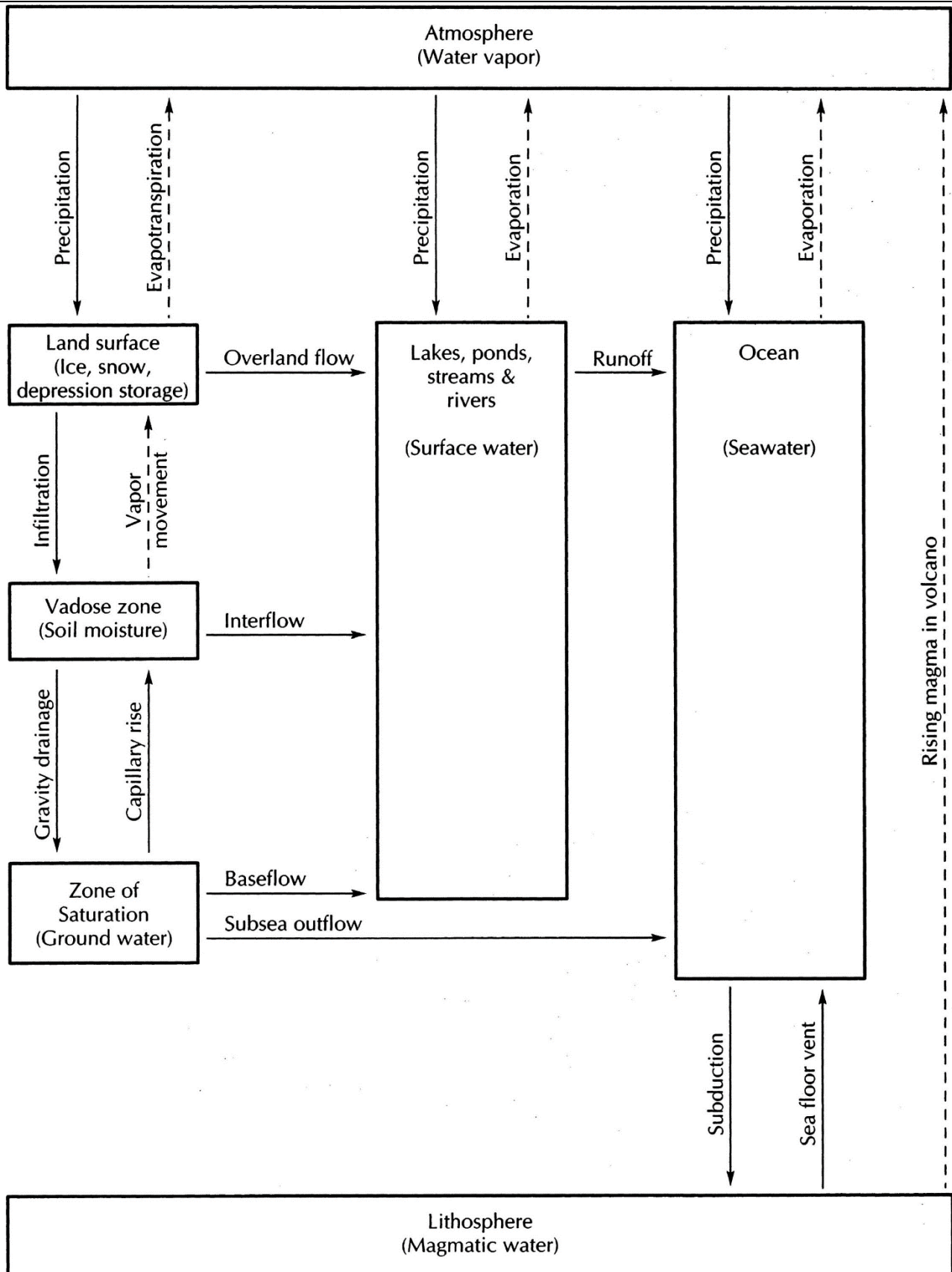


Figure 6- Bilan annuel de l'eau en France.



Dessin schématique du cycle hydrologique. Le mouvement de l'eau liquide est représenté par une ligne continue et le mouvement de la vapeur d'eau est représenté par une ligne pointillée.

1.3. L'infiltration de l'eau dans le sous-sol et la notion d'aquifère :

1.3.1. Mécanisme de l'infiltration :

Le terme infiltration est imprécis, car il désigne à la fois le phénomène d'imbibition des sols superficiels (zone d'infiltration ou zone non saturée) et celui d'atteinte de la surface de la zone saturée. On appelle nappe d'eau souterraine cette zone saturée en permanence.

Rôle du sol : interface entre l'atmosphère et l'aquifère, le sol étale le signal d'entrée dans le temps. Son rôle dépend de son argilosité, de la pente et de la nature de la surface. Dans le sol, l'infiltration de l'eau dépend des relations entre microporosité (écoulement lent) et macroporosité (écoulement rapide).

L'eau tapisse les parois de la matière solide, puis remplace toute l'atmosphère du sol (improprement appelée « air ») présente dans les vides. L'eau d'infiltration sature donc temporairement la porosité du sol (figure 7).

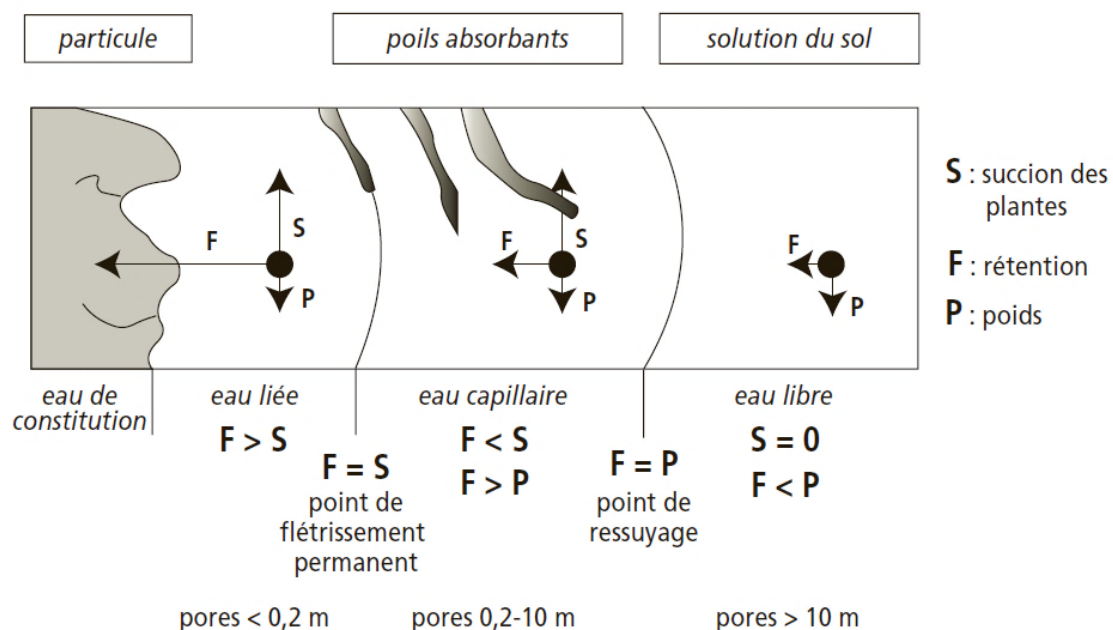


Figure 7- Types d'eau contenus dans un matériau solide (d'après Gobat et al., 1998).

Cette eau qui remplit les pores larges est soumise à la gravité et s'écoule donc de haut en bas. En revanche, l'eau des pores de petite taille est soumise à la gravité, mais surtout à la capillarité.

L'eau présente à très faible profondeur subit le phénomène d'évaporation, et le plan de flux nul (figure 8) sépare l'eau qui repart vers l'atmosphère en phase vapeur de celle qui s'écoule en phase liquide vers la nappe (infiltration « vraie »). Le plan de flux nul est caractérisé par sa teneur en eau maximale ; au-dessus de ce plan, la charge saline est élevée et la teneur en isotopes lourds enrichie.

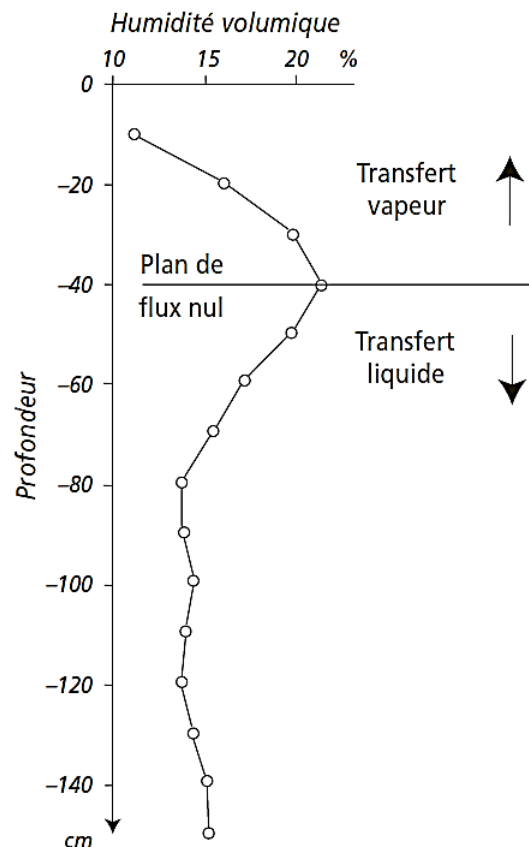


Figure 8- Répartition de l'eau dans un profil de sol.

Le transfert de l'eau vers la profondeur s'explique par une désaturation progressive du milieu (figure 9). Lorsque la phase liquide prédomine, l'eau s'écoule gravitairement et le gaz du sol est immobile. Le stade pour lequel la phase gazeuse devient continue et ouverte sur l'atmosphère permet l'évaporation de l'eau, et c'est la forme liquide qui n'est plus mobile.

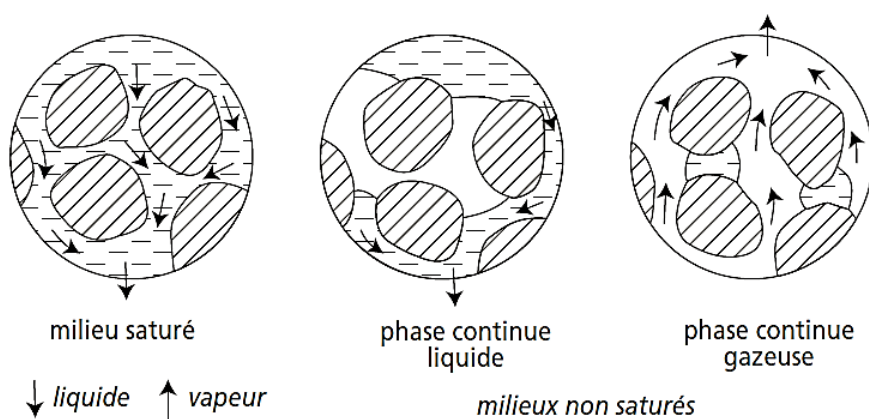


Figure 9- Désaturation progressive d'un sol.

Lorsque l'eau infiltrée atteint la nappe, le trajet des molécules se fait avec une composante horizontale prédominante en direction de l'exutoire.

On appelle aquifère l'ensemble des formations géologiques renfermant la nappe ; il englobe donc sa zone d'infiltration.

1.3.2. Rôle de la structure et de la lithologie :

(**Lithologie** : Branche de la géologie qui étudie la composition des sédiments ou des roches, comprenant les caractéristiques physiques et chimiques, telles que la couleur, la composition minéralogique, la dureté ou la taille des grains.)

Si la surface de la nappe se localise dans des formations poreuses aquifères en communication verticale avec l'atmosphère, la nappe est dite **libre** (figure 10). Les conséquences d'un tel dispositif sont :

- le remplissage immédiat des forages ou des puits en cours de réalisation dès qu'ils atteignent la surface de la nappe ou la première discontinuité aquifère (joint de stratification ou fracture) ;
- la facilité de la recharge de la nappe ;
- le maintien de conditions oxydantes propices à la persistance des espèces chimiques métalliques (fer, manganèse) sous forme de minéraux solides (oxydes, hydroxydes) ;
- la minéralisation des substances organiques humiques ou polluantes (aspects positifs) ;
- l'exposition de la ressource à la pollution inorganique de surface (aspect négatif).

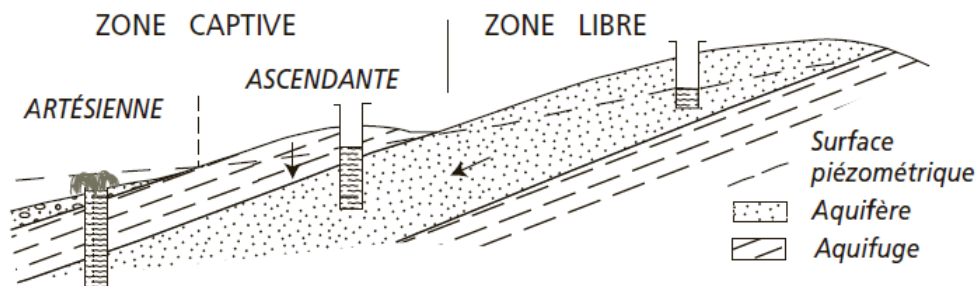


Figure 10- Nappe libre et nappe captive.

Si la surface de la nappe est contrainte par un toit imperméable empêchant l'eau d'atteindre son profil de pression (surface piézométrique), la nappe est dite **captive**.

La recharge ne peut alors se faire que par transit latéral depuis les zones d'affleurement de l'aquifère (zone libre), ou vertical par le faible flux traversant les terrains peu perméables de couverture (drainance descendante). La conséquence est un milieu plus abrité de la pollution de surface, mais aussi de l'oxygénation, ce qui se traduit par des conditions anoxiques favorisant la conservation des molécules organiques et le passage en solution des cations métalliques indésirables (fer et manganèse).

L'étanchéité de la nappe dépend de la nature lithologique des formations du toit : dans les séries géologiques, les couches argileuses, si elles ne sont pas fracturées ou si elles sont suffisamment épaisses pour ne pas être déconnectées par les failles, constituent des toits efficaces de nappes captives.

1.3.3. Différents types d'aquifères (poreux, fissurés, karstiques) :

Selon la nature, donc la genèse des vides contenant l'eau, on peut distinguer différents types d'aquifères :

- Si les vides sont des espaces intergranulaires d'origine sédimentaire ou diagénétiques, on parlera de porosité intergranulaire ou porosité vraie. Ces aquifères seront appelés **aquifères poreux**. Les aquifères poreux sont constitués de blocs, galets, graviers, sables, silts, grès, craie, scories volcaniques, arènes granitiques... Ces aquifères peuvent donc être constitués de formations meubles (formations continentales souvent hétérogènes) ou bien de couches cimentées cohérentes.
- Les **aquifères fissurés** sont développés dans les roches magmatiques (massifs de granite, de gabbros, coulées de roches effusives...), mais aussi métamorphiques (gneiss, micaschistes, pélites...) ou sédimentaires (grès, carbonates...). Généralement, les aquifères fissurés sont observés dans des séries dont les minéraux sont peu solubles ou altérables (silicates).

- Une mention particulière doit être faite des séries de roches fissurées constituées de minéraux solubles (évaaporites, carbonates), car elles ont subi le processus de karstification. La karstification demeure fonctionnelle lorsque les gradients hydrauliques sont suffisamment élevés pour maintenir un écoulement. Ces types d'aquifères (**aquifères karstiques**) présentent donc des caractéristiques différentes. La taille du volume élémentaire représentatif, concept permettant de décrire les propriétés du milieu, varie selon son homogénéité.

La taille des volumes élémentaires représentatifs (**VER**) des trois types d'aquifères, change d'ordre de grandeur : en effet, pour représenter statistiquement les propriétés moyennes d'un matériau aquifère, il faudra quelques m^3 d'une roche poreuse marine, quelques dam^3 d'une roche poreuse continentale, quelques hm^3 d'une roche fissurée et quelques km^3 d'un massif karstifié. La taille de ce dernier **VER** peut inclure la totalité de l'hydrosystème.