

**Spécialité: 2<sup>ème</sup> année Licence Génie Min**

**Semestre : 4**

**Titre : Hydrogéologie**

**Responsable : Dr. S.BOUNAB (cours+TP)**

**Crédits : 3**

**Coefficient : 2**

**Volume horaire hebdomadaire: 37h30,( Cours : 1h30,TP : 1h00)**

**Cours : 3+4**

### **3 : LE BILAN HYDRIQUE**

#### **1) Les stocks d'eau de surface**

La rétenion de surface comprend toute l'eau accumulée sur, ou au-dessus du sol. Elle comprend l'eau interceptée par le couvert végétal, l'évaporation durant les précipitations et le stockage dans les dépressions du sol qui est le volume d'eau emmagasiné dans les petites dépressions du sol jusqu'à leur niveau de déversement. Elle ne comprend pas la rétenion superficielle qui est la partie de la pluie qui demeure à la surface du sol durant la précipitation et qui ruisselle ou s'infiltré quand la pluie a cessé.

Toute l'eau captée dans les dépressions de surface, des plus petites, dues à la rugosité du sol, aux plus grandes plaines inondées, lacs, marais, étangs, etc., est désignée comme le **stock d'eau de surface**. Selon l'échelle de temps (averse, saison, année, etc.) et l'échelle spatiale (type de dépression) on peut donc distinguer :

- Les petites dépressions de surface qui se remplissent dès que l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité d'absorption du sol. Ces dépressions ne sont que de petits réservoirs temporaires, qui peuvent cependant agir comme tampons durant une averse sur un bassin versant.
- Les lacs, les étangs ou les plaines inondées sont des réservoirs d'eau de surface, naturels ou artificiels, de volume et superficie pouvant être très importants. Ils interviennent directement dans le bilan hydrologique par les échanges d'eau avec le sol (relations eau de

surface-nappe), en favorisant l'évaporation à leur surface ou encore, en retardant l'écoulement en rivière par laminage.

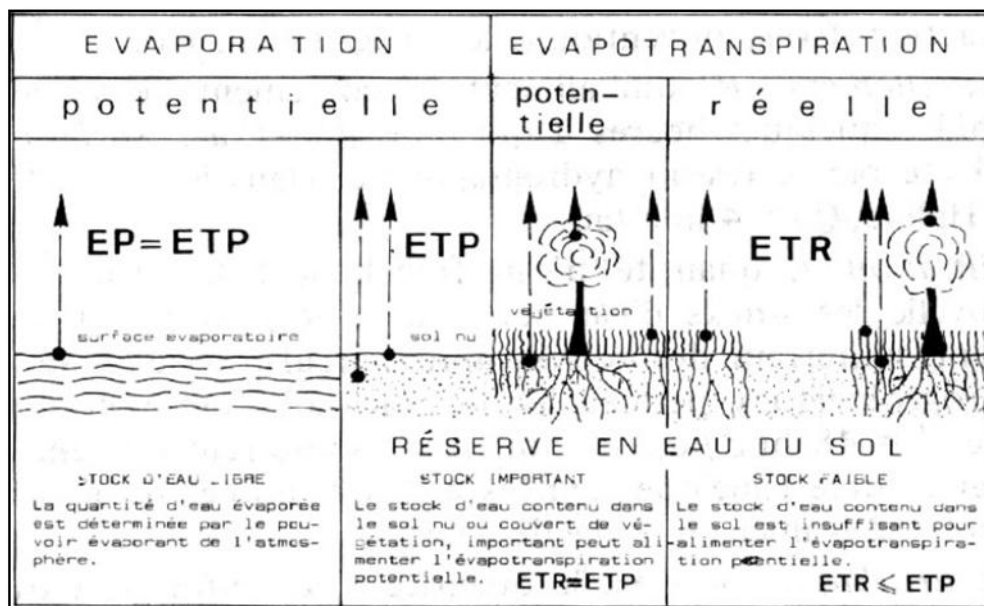


Figure : Réserve en eau du sol et phénomène d'évaporation

## 2) LES EAUX SOUTERRAINES

Le système des eaux souterraines est lié au cycle hydrologique par différents processus : infiltration par la zone non saturée, apport souterrain par percolation et drainance, évaporation par la zone non saturée et finalement sous-écoulements. L'eau qui pénètre dans le sol peut séjourner, un court instant ou de longues années (phase souterraine du cycle de l'eau). Les contraintes qui régissent la circulation de l'eau dans toute l'épaisseur du sol et du sous-sol amène à distinguer l'eau du sol et l'eau des réservoirs souterrains.

## 3) Le bilan d'eau (hydrique) :

Tous les phénomènes cycliques impliquant une égalité des pertes et des gains, on appelle cette égalité le bilan. Si on estime le bilan hydrique sur le continent, on écrit l'équation suivante :

$$P = ET + I + R \text{ (mm)} \quad \text{OU} \quad X_0 = Y_0 + Z_0$$

Avec : **p** et **x<sub>0</sub>** : la précipitation annuelle moyenne (mm)  
**ET** et **Z<sub>0</sub>** : évapotranspiration  
**R** : écoulement superficiel  
**I** : infiltration  
**Y<sub>0</sub>** : écoulement générale (superficiel et souterrain)

### 3-1- Les précipitations

Sont dénommées précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. La vapeur d'eau de l'atmosphère se transforme en liquide lorsqu'elle atteint le point de rosée par refroidissement ou augmentation de pression. Pour produire la condensation, il faut également la présence de certains noyaux microscopiques, autour desquels se forment des gouttes d'eau condensées. La source de ces noyaux peut être océanique (chlorides, en particulier NaCl produit par l'évaporation de la mer), continentale (poussière et autres particules entraînées par des courants d'air ascendants) ou cosmiques (poussières météoriques). Le déclenchement des précipitations est favorisé par la coalescence des gouttes d'eau. L'accroissement de poids leur confère une force de gravité suffisante pour vaincre les courants ascendants et la turbulence de l'air, et atteindre le sol. Enfin, le parcours des gouttes d'eau ou des flocons de neige doit être assez court pour éviter l'évaporation totale de la masse. Les précipitations sont exprimées en intensité (mm/h) ou en lame d'eau précipitée (mm) (rapport de la quantité d'eau précipitée uniformément répartie sur une surface).

### 3-2- L'évaporation/l'évapotranspiration

L'évaporation définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. On parle de sublimation lors du passage direct de l'eau sous forme solide (glace) en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire.

Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes. On distingue :

- *l'évapotranspiration réelle (ETR)* : somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.
- *l'évapotranspiration potentielle (ETP)*: quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

L'évaporation est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant.

Ils existent plusieurs facteurs qui influent sur l'évapotranspiration, on distingue ; les facteurs physiques comporte des facteurs atmosphériques (vitesse de vent, pression...) et des facteurs hydrogéologique (granulométrie, porosité, profondeur de la nappe...), et les facteurs physiologiques (densité de couverture végétale, volume des feuilles, profondeurs des racines...).

La formule le plus utilisé pour calculer de l'évapotranspiration est la formule de **TURC** :

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ (mm)}$$

Avec :

$P$  : pluie annuelle (mm)

$T$  : température moyenne annuelle [°C].

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3.$$

### 3-3 : Précipitation efficaces : (PE)

Elle représente la quantité d'eau fournis par la précipitation qui reste disponible à la surface du sol après soustraction des pertes par évapotranspiration.

$$PE = P - ET$$

Avec : PE : Précipitation efficaces (mm)

P : Précipitation (mm)

ET : l'évapotranspiration réelle (mm)

### 3-4- Répartition des précipitations efficaces :

L'eau de précipitation efficace est répartie à la surface du sol en 2 fractions inégales

#### a) Ruissellement (R) (Ecoulement)

De par la diversité de ses formes, on ne peut plus aujourd'hui parler d'un seul type d'écoulement mais bien des écoulements. On peut distinguer en premier lieu les écoulements rapides des écoulements souterrains plus lents. Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en écoulement de surface (mouvement de l'eau sur la surface du sol) et écoulement de subsurface (mouvement de l'eau dans les premiers horizons du sol).

L'écoulement superficiel ( $Q_s$ ) est collecté par les réseaux hydrographiques.

On calcule l'écoulement superficiel par la relation de TEXON BERCALLOF :

$$R = P^3 / ET^2 \quad (\text{mm})$$

#### b) L'infiltration et la percolation

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de

pression. La percolation représente plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique. Le taux d'infiltration( $Q_w$ ) est donné par la tranche ou le volume d'eau qui s'infiltrer par unité de temps (mm/h ou  $m^3/s$ ). La capacité d'infiltration ou l'infiltrabilité est la tranche d'eau maximale qui peut s'infiltrer par unité de temps dans le sol et dans des conditions données. L'infiltration est nécessaire pour renouveler le stock d'eau du sol, alimenter les eaux souterraines et reconstituer les réserves aquifères. De plus, en absorbant une partie des eaux de précipitation, l'infiltration peut réduire les débits de ruissellement.

Permis les facteurs qui influe sur l'infiltration on note : hydrogéologie (perméabilité...), hydrométéorologie (quantité de pluie, l'intensité et la durée de pluie, et la qualité de pluie) et la caractéristiques des sols (morphologie de surface, couverture végétal...)

La quantité d'eau infiltrée est déduite à partir de la relation générale, on connaissant les 3 composantes de bilan hydrogéologique :

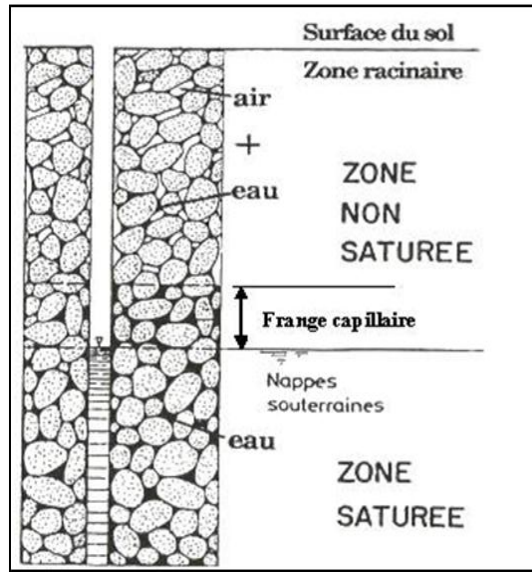
$$I = P - ET - R \quad (\text{mm})$$

#### 4) Distinction zone saturée et zone non saturée

Au-dessous de la surface du sol, deux zones (**Fig.**) peuvent être identifiées de haut en bas :

- la zone non saturée ; système à trois phases (solide, liquide, gaz) ou seule une partie des espaces lacunaires sont remplis d'eau, le reste étant occupé par l'air du sol,
- la zone saturée ; système à deux phases (solide, liquide) où tous les pores sont remplis d'eau.

La distinction fondamentale entre la zone saturée et la zone non saturée réside dans le comportement hydrodynamique de l'eau dû à l'effet de l'air et se traduit notamment par une conductivité hydraulique différente. Cependant, les zones saturées et non saturées ne sont pas des domaines séparés, mais font partie d'un système d'écoulement continu. Pour faciliter l'étude de l'eau souterraine, nous distinguons toutefois :



**Figure :** Représentation schématique de la zone non saturée et la zone saturée.

Atmosphère vers surface: précipitation (pluie, grêle, neige)

Surface vers atmosphère:

- évaporation : liquide vers vapeur
- sublimation : solide vers vapeur
- transpiration : évaporation d'eau par les plantes

Quand elle s'infiltré dans le sol, l'eau rencontre différentes régions :

- **La zone non saturée (ZNS)** où les pores sont remplis partiellement d'eau et partiellement d'air.
- **La frange capillaire** où l'eau remonte de la zone saturée vers la zone non saturée. Cette région correspond à la partie inférieure de la zone sous saturée.
- **La zone saturée (ZS)** (phréatique)

La ZNS est divisée dans 3 sous-zones ayant une capacité de rétention d'eau différente:

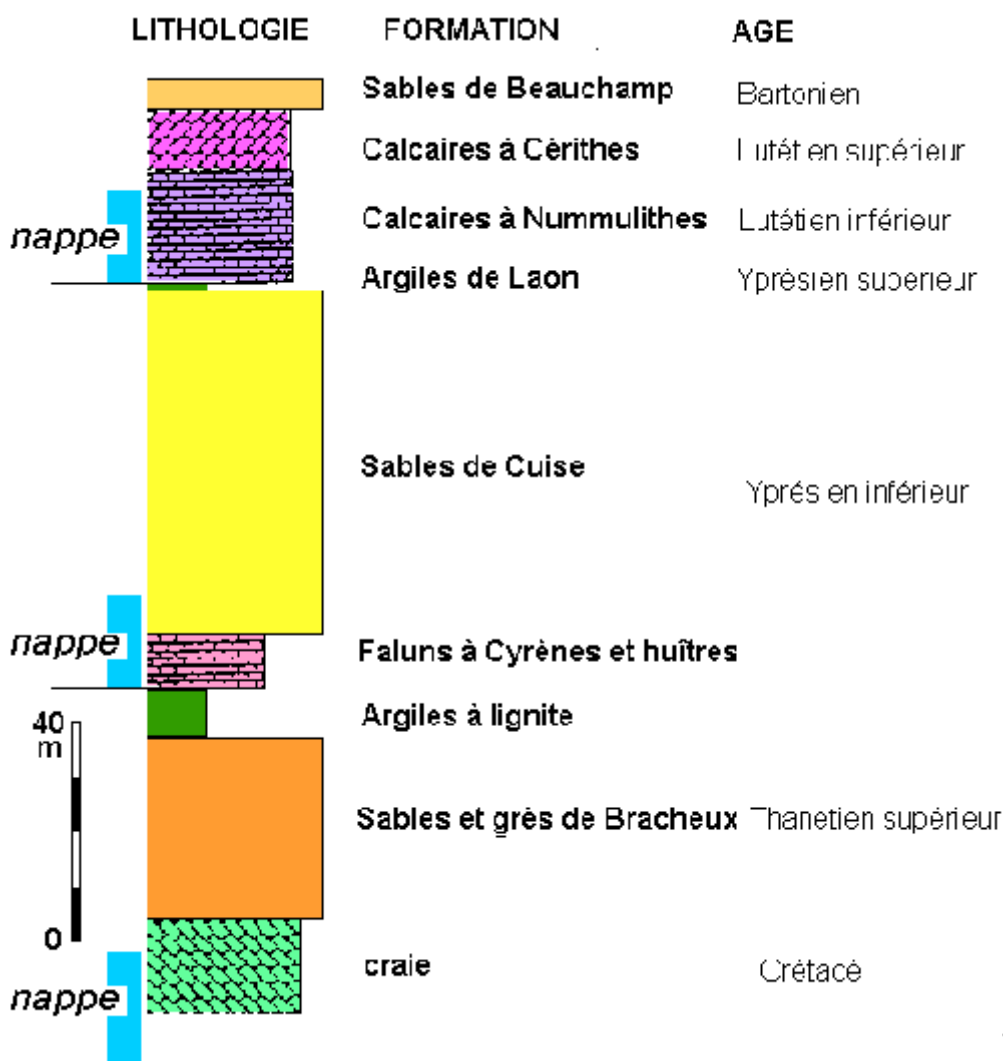
- La zone d'évapotranspiration dans la partie haute de la ZNS (à la limite surface/sous-sol). La teneur en eau dans cette zone varie fortement vu l'infiltration (précipitations) et l'évapotranspiration (température en surface) variables.
- La zone de rétention d'eau: Une particule a tendance à retenir une pellicule d'eau par des forces électrostatiques. Cette pellicule est indépendante des variations éventuelles de la surface piézométrique, contrairement à la frange capillaire.
- La frange capillaire: Partie basse de la zone non saturée: l'eau remonte par ascension capillaire de la ZS dans la ZNS. Il est intuitivement perceptible que la frange capillaire sera d'autant plus importante que la granulométrie du sol est fine.

## 4) IDENTIFICATION GEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE

### 1) Formations lithostratigraphiques et hydrogéologiques

Une formation lithostratigraphique est constituée par un corps de terrain de nature homogène : sable, calcaire, grès, granite, argile, gypse, etc. Elle est désignée par le nom de la région (ou de la localité) où elle a été observée et décrite ou par un terme d'étage. Exemples : calcaire de Champigny, alluvions de la Crau, sables albiens du bassin de Paris.

Elle est identifiée par 3 ensembles de données fixes : surfaces limites, localisation dans le sous-sol et structure.



## **2) SURFACES LIMITES DU RESERVOIR**

Les surfaces limites du réservoir, inférieure ou substratum, supérieure ou toit, et latérales (affleurements, passage latéral de faciès, failles), identifient les conditions aux limites géologiques.

### **a) Les formations hydrogéologiques et les aquifères**

La caractéristique essentielle d'une formation hydrogéologique est son degré de perméabilité. La perméabilité, aptitude d'un réservoir à conduire l'écoulement d'eau, dans des conditions hydrodynamiques imposées, permet un classement en 3 grandes catégories; perméables, imperméables et semi-perméables.

#### **1/ Formations hydrogéologiques perméables, gisements d'eau souterraine, origines des aquifères.**

Les matériaux ayant la propriété de se laisser traverser par l'eau à des vitesses appréciables (quelques mètres à des milliers de mètres par an), sous l'influence de différences d'altitudes ou pente de la nappe appelés gradients, sont dits perméables. Ce sont les graviers, les alluvions, les sables gros et moyens, les calcaires fissurés, etc.

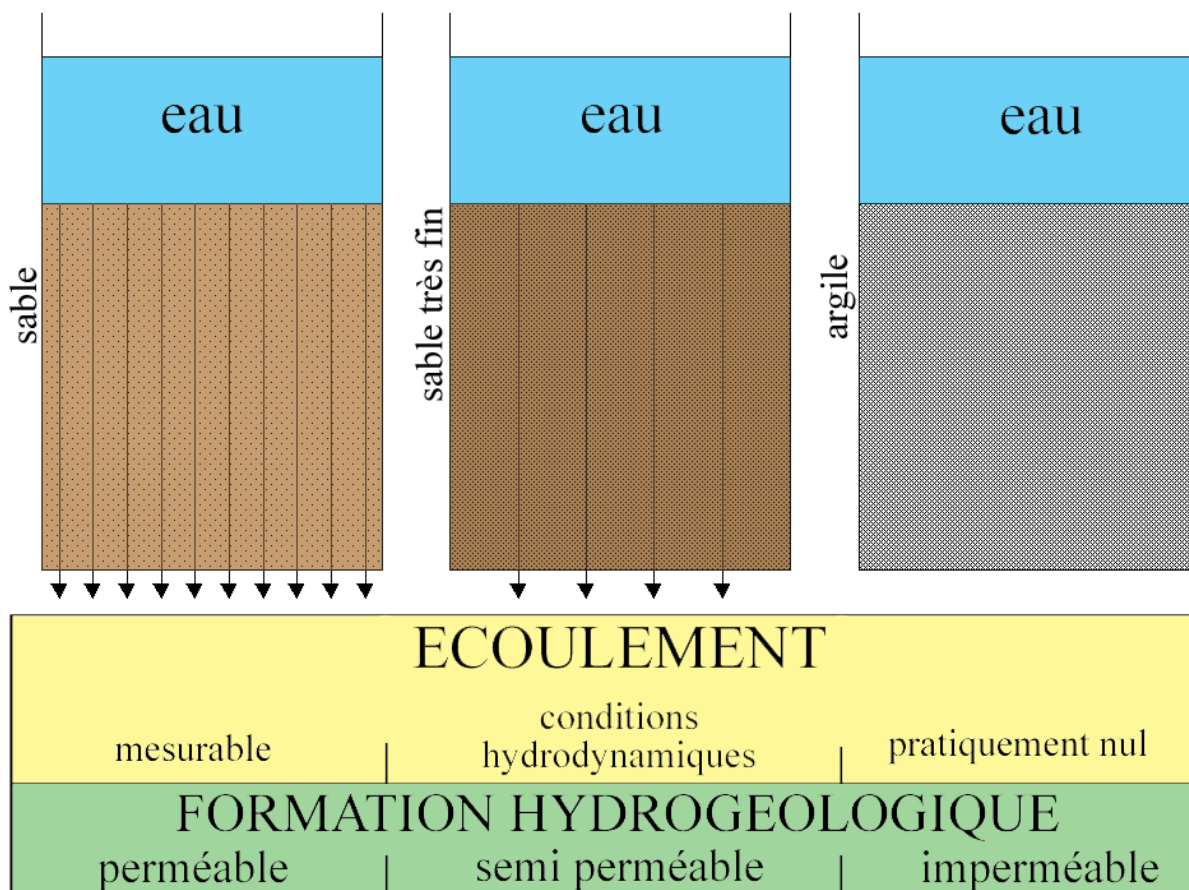
#### **2/ Formations hydrogéologiques imperméables imposant les limites géologiques des aquifères**

Les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine, dans certains matériaux, sont très faibles, pratiquement non mesurables (quelques millimètres par an). Ils constituent les formations hydrogéologiques imperméables imposant les limites géologiques des aquifères. Ce sont les silts, les argiles, les marnes, etc.

#### **3/ Formations hydrogéologiques semi-perméables à l'origine de l'aquifère multicouche**

Certains matériaux, comme les sables très fins, les sables argileux, de très faible perméabilité permettent dans des conditions hydrodynamiques favorables, les échanges verticaux montants ou descendants entre aquifères superposés, par un phénomène naturel appelé la drainance. Ils constituent les formations hydrogéologiques semi-perméables.

Une structure hydrogéologique, constituée d'une alternance de formations hydrogéologique perméables et semi-perméables identifie un aquifère multicouche.

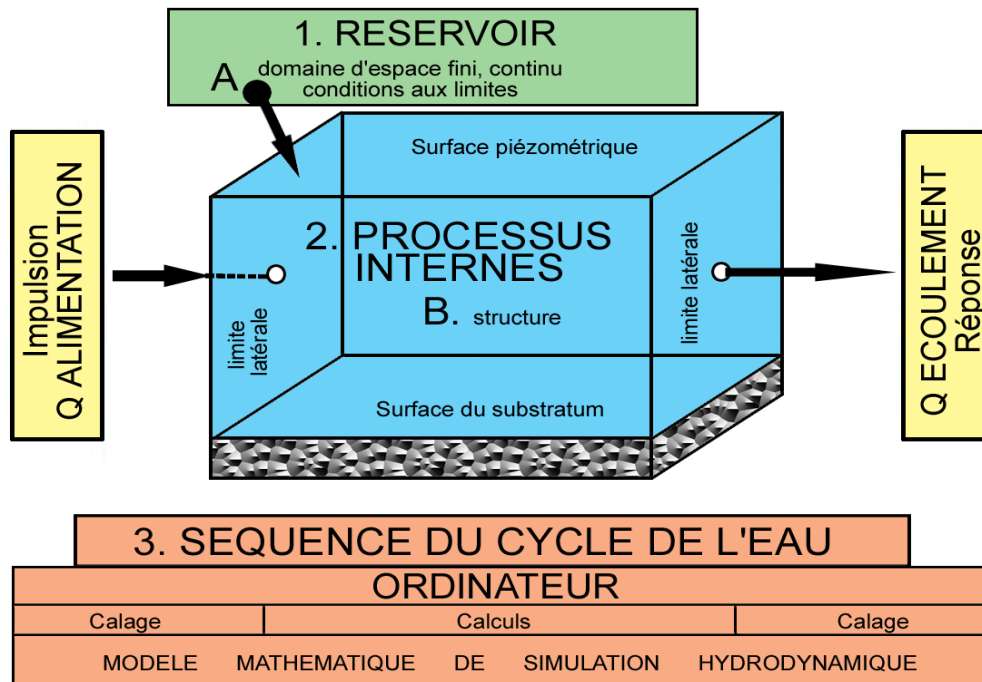


## b) Identification hydrodynamique de l'aquifère

### Concept d'aquifère

Un aquifère (acque= eau ; fera=je porte) est un système hydrologique, hydrodynamique. Il est donc identifié par 5 ensembles de caractéristiques quantifiables :

- Un réservoir, domaine d'espace fini, caractérisé par ses conditions aux limites et ses dimensions ou configuration et par son organisation interne ou structure. Il est identifié par une (ou une combinaison de ) formation hydrogéologique.
- Des processus internes ou mécanismes hydrodynamiques, hydrochimiques et hydrobiologiques, entraînant 3 fonctions du réservoir vis-à-vis de l'eau souterraine : stockage, conduite (transfert de quantités d'eau ou d'énergie) et milieu d'échanges géochimiques.
- Une séquence du cycle de l'eau, avec des interactions avec l'environnement se traduisant par 3 comportements, hydrodynamique, hydrochimique et hydrobiologique. Elle est caractérisée par le couple impulsion/réponse exprimé par une relation ou fonction de transfert.
- La variabilité dans l'espace de ces caractéristiques.
- Des conditions de temps, toutes les mesures de caractéristiques étant rapportées à une date donnée ou à une durée moyenne. Ces dernières, basées sur des historiques, permettent les prévisions.



### 3) TYPES DE NAPPES

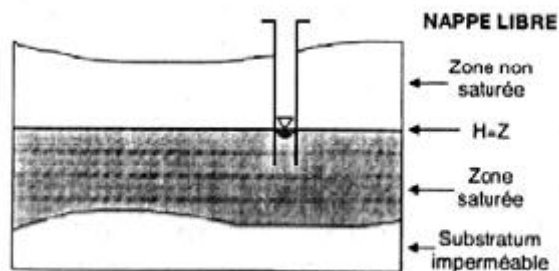
La configuration ou enveloppe, de l'aquifère porte sur ses dimensions et les caractéristiques de ses limites géologiques et hydrodynamiques.

La base de l'aquifère, appelé substratum, est constitué par une formation hydrogéologique imperméable; Par contre sa limite supérieure est de 3 types :

- Hydrodynamique avec fluctuations libres : aquifère à nappe libre
- Géologique imperméable : aquifère à nappe captive
- Géologique semi-perméable : aquifère à nappe semi-captive

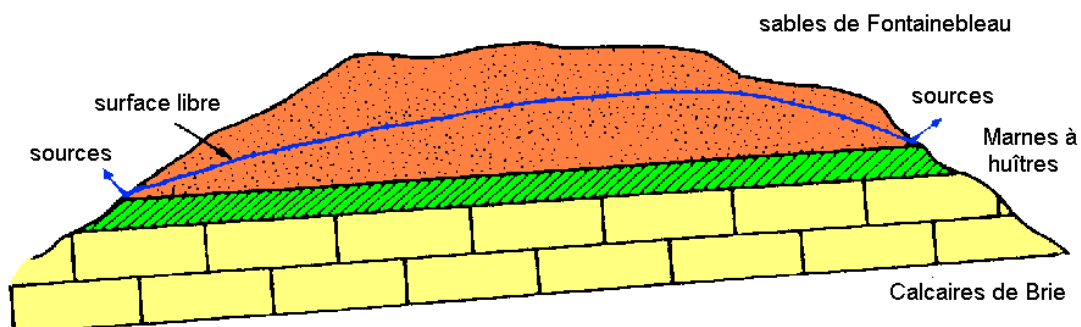
#### 3.1 : Aquifère à nappe libre

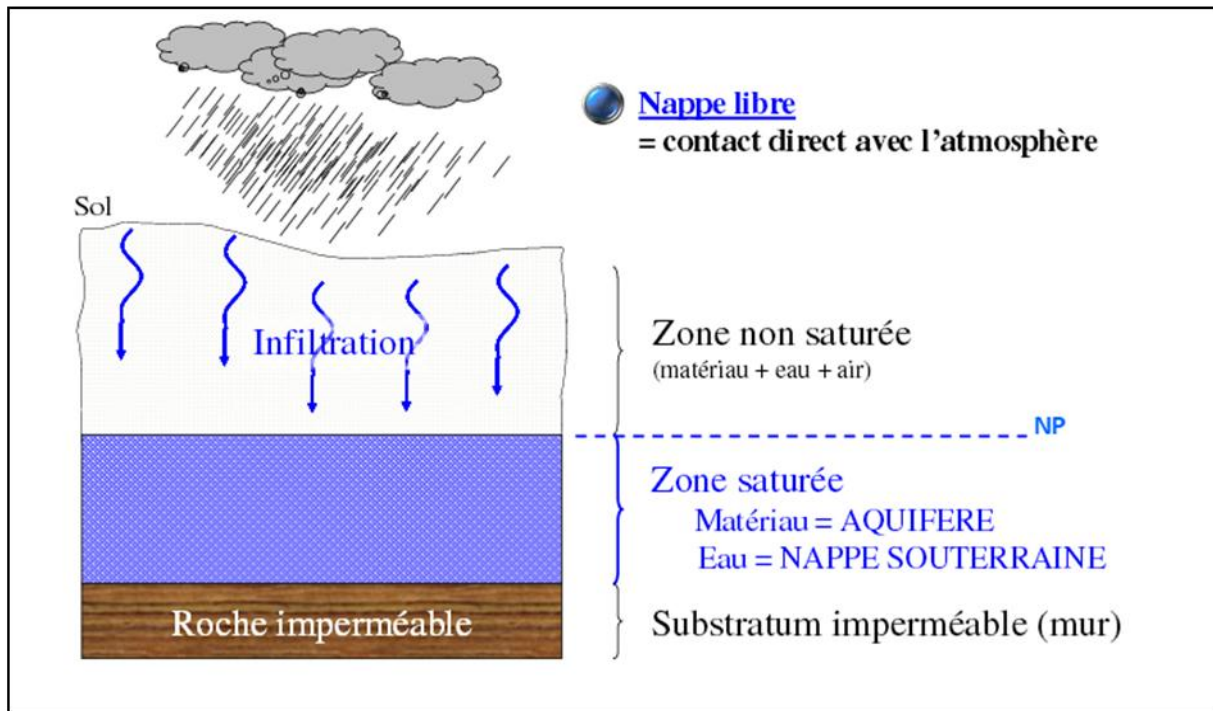
Les puits et sondages du premier aquifère, rencontré sous la surface du sol, présentent un niveau d'eau dont l'altitude est appelée par convention, le niveau piézométrique. Souvent, ce niveau est mesuré dans des ouvrages de petit diamètre, appelés piézomètres. L'ensemble des niveaux piézométriques mesurés en différents points à une date donnée, détermine la surface piézométrique.



De même que les cotes du niveau du sol permettent de tracer la surface topographique, elle est représentée sur des cartes piézométriques par des courbes d'égal niveau piézométrique ou courbes hydroisohypses. C'est une limite hydrodynamique. Cette surface peut s'élever ou s'abaisser librement dans la formation hydrogéologique perméable, d'où la dénomination d'aquifère à nappe libre.

Une **nappe libre** est une nappe dont la limite supérieure dans la formation poreuse est à surface libre, sans contraintes physiques.

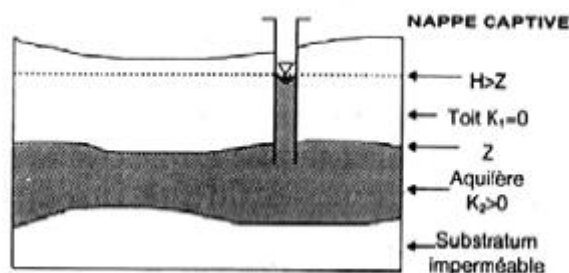




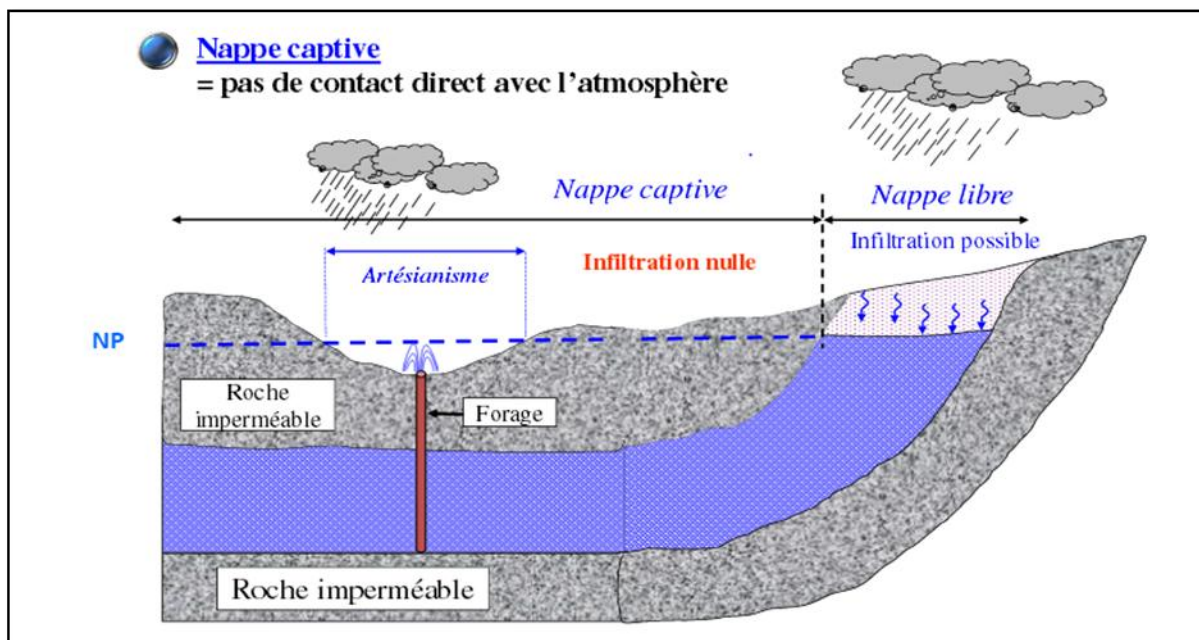
**Figure :** Alimentation d'une nappe libre

### 3.2 : Aquifère à nappe captive

Dans les aquifères plus profonds, les eaux souterraines sont emprisonnées dans la formation hydrogéologique perméable, entre 2 formations imperméables fixes : le substratum à la base et le toit au sommet.



Les eaux souterraines sont dites ascendantes. Si le niveau piézométrique se situe au-dessus de la surface du sol, l'eau jaillit naturellement. C'est l'artésianisme. Donc, si le captage des aquifères profonds exige des sondages coûteux, leur exploitation s'effectue souvent à faible profondeur et parfois même sans pompage, l'artésianisme produisant un débit naturel en surface.



**Figure :** Nappe captive et phénomène d'artésianisme

### 3.3 : Aquifère à nappe semi-captive

Le toit ou le substratum (ou les 2) de l'aquifère sont souvent constitués par une formation semi-perméable. Celle-ci permet, dans certaines conditions hydrodynamiques favorables (différences de charge) des échanges d'eau (ou de pression) avec l'aquifère superposé ou sous-jacent, appelé drainance. Ce phénomène implique un aquifère à nappe semi-captive

