

Cours d'hydrogéologie générale

Objectifs de l'enseignement

Ce cours offre à tous les participants du Master une introduction approfondie sur les propriétés des milieux dans lesquels les eaux souterraines sont localisées avant de se focaliser sur le fonctionnement des systèmes aquifères et l'organisation des écoulements souterrains. De nombreux exercices permettent aux participants de comprendre et d'appréhender quantitativement la dynamique des systèmes hydrogéologiques et hydrologiques.

1. Définition

L'hydrogéologie est une science qui étudie les phénomènes que peuvent subir les fluides dans le milieu souterrain, en fonction du type de réservoir. Elle permet de suivre l'évolution des pollutions pouvant se propager dans les sols et les eaux souterraines, et de déterminer les moyens les plus appropriés pour les combattre. Elle est également indispensable lors de la mise en place de puits de captages, afin de localiser précisément les lieux d'implantation ; ceci par l'étude des nappes d'eaux disponibles sur le terrain. Pour cela, plusieurs approches d'études se recoupent : la partie géologique du terrain, avec les formations existantes (appelées formations lithostratigraphiques), la partie hydrodynamique et son aspect physico-chimique. Enfin, la partie pratique "in situ", très importante pour évaluer les paramètres d'écoulement (pompages d'essai).

Les branches de l'hydrogéologie

- Son domaine d'étude repose essentiellement sur deux branches des [sciences de la Terre](#), la [géologie](#) et l'[hydrologie](#), mais aussi sur de nombreuses autres branches comme la [géostatistique](#), la [physique](#), la [chimie](#), la [biologie](#), la [géochimie](#), l'[hydrochimie](#), la [géophysique](#), l'[hydrodynamique](#), l'[hydraulique souterraine](#), l'[analyse numérique](#) ainsi que des techniques de [modélisation](#). À ce titre, l'hydrogéologie est par excellence une [science interdisciplinaire](#).
- L'hydrogéologie s'occupe de la distribution et de la circulation de l'eau souterraine dans le [sol](#) et les [roches](#), en tenant compte de leurs interactions avec les conditions géologiques et l'[eau de surface](#).

Eau et Pétrole

Dans les gisements de pétrole, les hydrocarbures (huile et gaz) expulsés des roches mères (où ils ont mûri) par la pression lithostatique, migrent vers la surface en remplaçant l'eau plus dense dans les pores des roches, jusqu'à ce qu'ils rencontrent un piège, la roche réservoir couverte par une roche peu perméable (argileuse ou compacte), dans une configuration géométrique favorable (biseau, dôme anticlinal, coin de faille...). Pétrole et gaz subissent un entraînement par l'écoulement latéral des eaux souterraines ; à leur différence de densité et de viscosité près, ils obéissent aux mêmes lois d'écoulement que l'eau. Cependant, la migration des hydrocarbures est un phénomène lent et la circulation d'eau souterraine peut modifier la taille des vides de la roche (cimentation ou dissolution des grains – Machel 1999). Dans les milieux très

peu perméables, la composition chimique de l'eau originellement salée peut être modifiée dans le sens d'une concentration (saumures de gisement de pétrole).

Les cycles 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'infiltré 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

LE CYCLE INTERNE

Origine de l'eau sur Terre

La détection de l'eau dans l'Univers est rendue difficile par l'absorption des radiations par l'atmosphère terrestre. Il faut donc se placer à l'extérieur de cette dernière. Les données recueillies, en particulier par le télescope infrarouge de l'Agence spatiale européenne ISO (Infrared Spatial Observatory) et le satellite américain SWAS (Submillimeter Wave Astronomy Satellite), montrent que l'eau existe un peu partout dans notre Galaxie. Elle est largement répartie dans l'Univers.

L'hydrogène y est présent dès les premiers instants du Big Bang. L'atome d'oxygène de la molécule d'eau apparaît plus tard, issu des réactions de fusion nucléaire dans les étoiles. L'eau existe dans l'Univers sous forme de gaz, de glace ou d'hydrates et aussi sous forme liquide sur les planètes (Reeves, 1981). Grâce à sa signature spectrale, l'eau a pu être mise en évidence à la surface et à la périphérie d'étoiles de température peu élevée ainsi que dans les nuages moléculaires interstellaires (figure 2). La Terre est née, il y a environ 4,5 milliards d'années, d'agrégats de gaz et poussières contenant déjà des silicates hydratés et de la glace. Ces grains ont pu former, par accréation, des corps kilométriques, puis des planètes telluriques au sein desquelles le volcanisme et les impacts ont permis le dégazage de l'eau sous forme de vapeur.



Figure 2 Pics d'absorption dans l'infrarouge caractérisant la présence d'eau dans la nébuleuse d'Orion (d'après Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics).

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. L'analyse des produits issus de la partie supérieure du manteau atteste de la présence d'eau. Les laves d'Hawaï (États-Unis) peuvent contenir jusqu'à 0,45 % d'eau et celles des Trapps du Dekkan (Inde) jusqu'à 0,6 %. De même, de l'eau est-elle présente dans les fragments de péridotite, d'origine mantellique plus profonde.

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, l'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 1011 kg par an. Le bilan est difficile à quantifier. Il est considéré comme équilibré puisque le niveau des océans est relativement stable. La présence d'eau dans le manteau est très importante car, en modifiant les points de fusion et la viscosité des minéraux, elle change les propriétés physico-chimiques des roches et joue certainement un rôle dans les mécanismes de convection responsables de la tectonique des plaques (Gillet, 1993).

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, calottes et banquises (figure 4), mais 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 (ponces, tourbes...)
- 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. Le tableau 1 présente une estimation de la répartition de l'eau sur le globe. Il ne s'agit que d'un ordre d'idée,



Figure 4 Différents types d'eau sur la planète.

car l'évaluation des réserves souterraines est très variable selon les auteurs, entre 7 et 30.106 km³.

TABLEAU 1 ESTIMATION DE LA RÉPARTITION DE L'EAU SUR TERRE.

	Volumes d'eau stockés		
	Totaux	Eaux douces	
			en % des eaux douces totales
OCÉANS et banquises salées	1 350 000		
LACS SALÉS	100		
GLACE : calottes, glaciers, neiges, pergélisol	23 000	23 000	60
EAUX SOUTERRAINES			
Aquifères	8000	16 000	39
tranche 0-800 m	8000		
tranche > 800 m			
Humidité du sol	16	16	
EAU DE SURFACE DES CONTINENTS			
Lacs	176	176	1
Lits des cours d'eau	2	2	
ATMOSPHERE	13	13	
EAU BIOLOGIQUE	1	1	
HYDROSPHERE	1390000	40200	100
GLOBE (0,3 % du manteau)	2000000		

D'après le BRGM, la France compte environ 200 aquifères régionaux exploitables, de 100 à 100 000 km², renfermant quelques 2 000 km³ d'eau. On estime que 100 km³/an

s'écoulent vers les sources et les cours d'eau, et que 7 km³/an sont puisés dans les nappes d'eau souterraine.

Moteur du cycle et bilan radiatif

Depuis son dégazage de l'intérieur du globe vers l'hydrosphère, l'eau passe sans cesse d'un réservoir à l'autre, entraînée dans un cycle sans fin dont les moteurs sont : le Soleil et le flux géothermique. Une partie de l'énergie rayonnée est réfléchiée par la Terre (océans inclus) et par l'atmosphère, l'autre partie est absorbée par ces deux milieux. Le rayonnement est réémis depuis la Terre vers l'atmosphère et de cette dernière vers l'espace et la Terre. Le sol reçoit en moyenne 95 w.m⁻². La figure 6 décrit les pourcentages respectifs des rayonnements émis, réfléchis et absorbés.

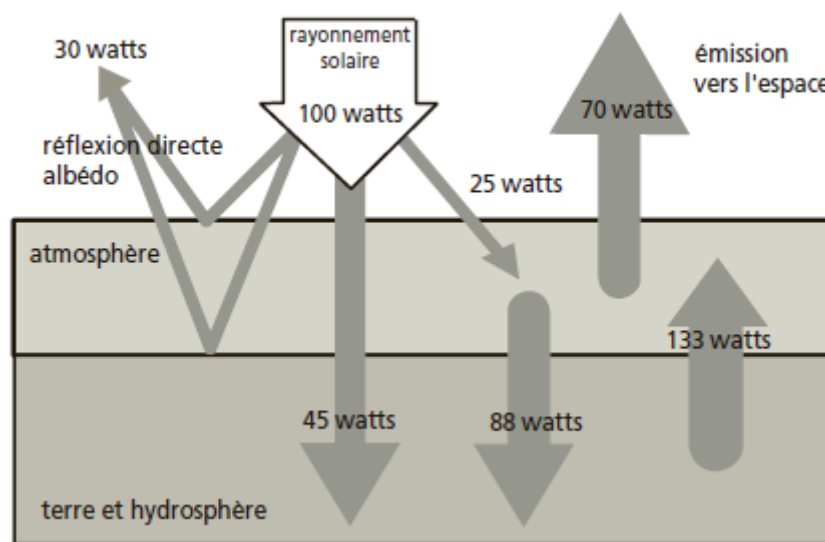


Figure 6 Rayonnement solaire

Le bilan radiatif global est équilibré, la Terre reçoit autant d'énergie du Soleil qu'elle en émet, ce qui lui permet de n'être ni une sphère aride, ni une boule de glace. Cependant, ce bilan est localement déséquilibré, les zones polaires où le rayonnement solaire est rasant sont déficitaires, tandis que l'équateur où le rayonnement est maximum est excédentaire (figure 7). L'inclinaison de l'axe des pôles, la répartition spatiale des continents et des mers, les variations d'altitude, les circulations atmosphériques et les courants océaniques modifient localement ce schéma pour donner les multiples climats de la Terre et définir ainsi les valeurs très dispersées de précipitations et d'évapotranspiration.

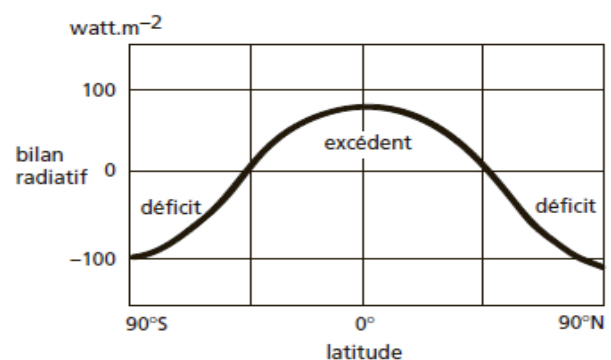


Figure 7 Bilan radiatif selon la position géographique.

Chapitre I : Introduction à l'Hydrologie de surface

1. Définition de l'hydrologie

L'hydrologie décrit le cycle de l'eau, à partir du moment où elle s'évapore de la mer et de la surface de la terre. Cette vapeur d'eau forme des nuages, qui retombent ensuite quelque part sur le sol sous forme de pluie. Une partie de cette eau s'infiltré dans le sol et devient de l'eau souterraine, alors qu'une autre partie coule dans les cours d'eau et les rivières, et rejoint à nouveau la mer. De là, le cycle de l'eau peut recommencer.

D'une façon très générale, l'hydrologie peut se définir comme l'étude du cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. L'hydrologie au sens large regroupe : la climatologie, pour la partie aérienne du cycle de l'eau (précipitations, retour à l'atmosphère, transferts, etc.) ; l'hydrologie de surface au sens strict, pour les écoulements à la surface des continents ; l'hydrodynamique des milieux non saturés pour les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines (infiltration, retour à l'atmosphère à partir des nappes, etc.) ;

L'hydrodynamique souterraine pour les écoulements en milieux saturés.

L'hydrologie de surface est une science appliquée qui fait appel à des connaissances dans des domaines très divers :

- Météorologie et Climatologie : Etude des pluies et du retour à l'atmosphère
- Géologie, Géographie et Pédologie : Analyse du comportement hydrologique du bassin
- Hydraulique : Mesure et étude des écoulements à surface libre
- Statistique : Traitement des données, simulations...
- Calcul numérique : Propagation de crue, modélisations et optimisations...
- Informatique : Instrument de travail pour les calculs numériques, le stockage des données...

2. Domaines d'applications

Les domaines d'application de l'hydrologie de surface sont également très variés. Parmi les plus importants et les plus classiques, on notera :

L'agriculture : irrigation, drainage ; l'étude des ressources en eaux : eau potable, eau pour l'industrie ; la lutte contre la pollution : étude des débits d'étiage évacuant les effluents, les calories ; l'énergie hydraulique ; le transport solide (dépôt ou érosion) ;

3. Définition du cycle hydrologique

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre (Fig. 1). C'est une succession des phases par lesquelles l'eau passe de l'atmosphère à la terre et retourne à l'atmosphère : évaporation à partir des terres, des mers ou des nappes d'eau continentales, condensation en nuages, précipitations, accumulation dans le sol ou à sa surface et évaporation.

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents.

La figure montre le cycle hydrologique : l'eau, de l'atmosphère, tombe sur terre sous forme de précipitation, pénètre dans les eaux de surface ou percole dans la surface de saturation et l'eau souterraine avant de remonter dans l'atmosphère par transpiration et évaporation pour recommencer le cycle.

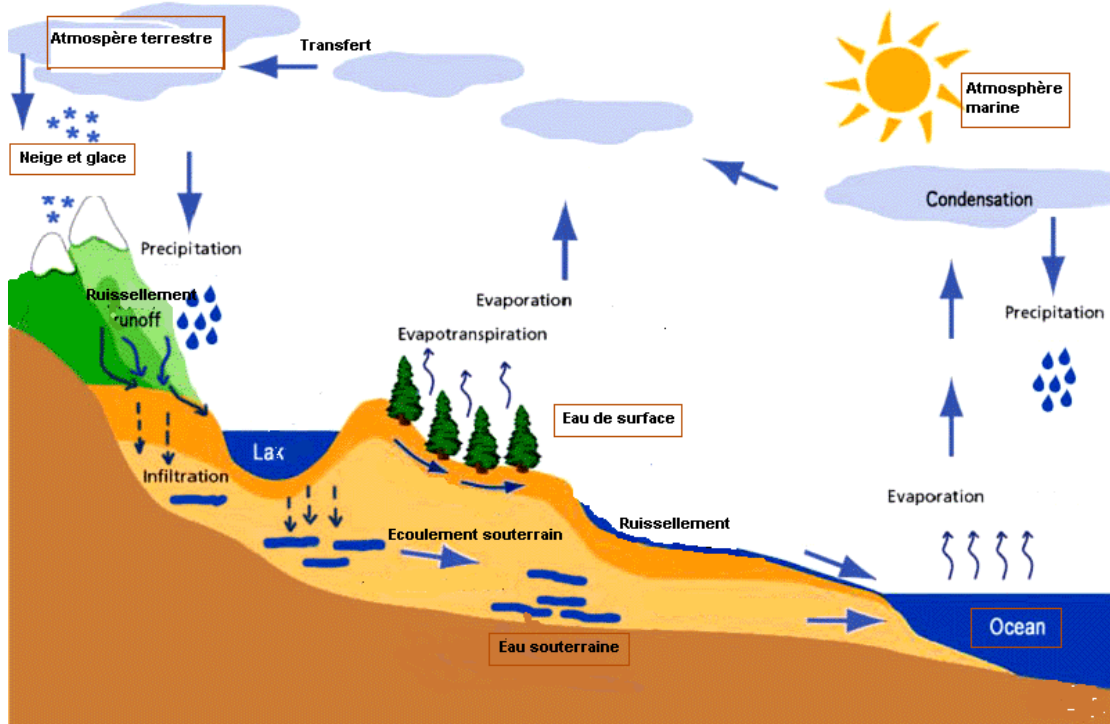


Fig.1 : Cycle hydrologique

5. Bilan hydrologique (hydrique)

Le bilan hydrologique permet d'estimer l'infiltration et le ruissellement dans un bassin versant en tenant compte des précipitations moyennes et de l'évapotranspiration réelle. Son équation est de la forme :

$$P = ETR + I + R \text{ avec :}$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

;

ETR : Evapotranspiration réelle (mm) ;

I : la lame d'eau infiltrée (mm) ;

R : la lame d'eau ruisselée (mm).

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

$$PE = P - ET.$$

ET évapotranspiration