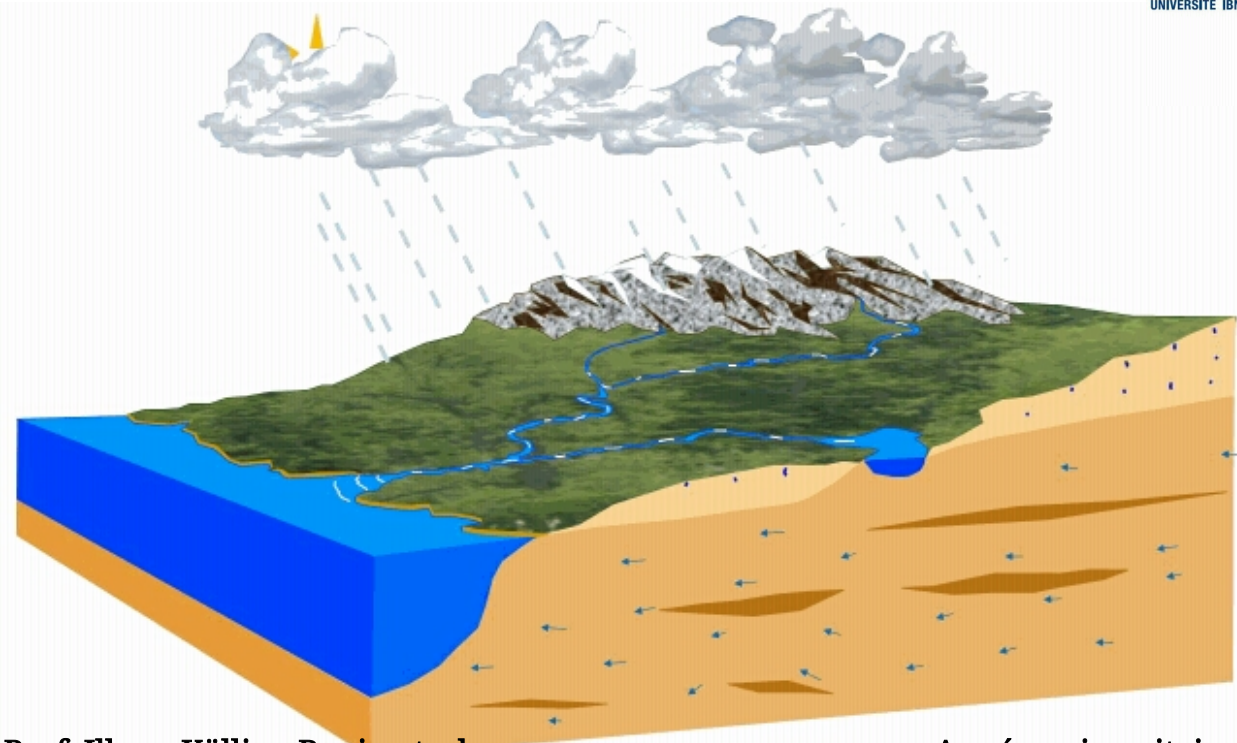


Chapitre 1 - Notions de climatologie

- 1- Définitions ;
- 2- Rappel des différentes couches de l'atmosphère ;
- 3- Rayonnement solaire, sa répartition dans l'atmosphère et au niveau du sol en fonction de la latitude, de l'altitude, de la variation de relief, de l'exposition nord ou sud, de la nature du sol, ... ;
- 4- Température à la surface de la Terre et les facteurs influençant sa répartition dans le temps et dans l'espace tels que la latitude (variations diurnes et saisonnières), la répartition des terres et des mers, la continentalité et l'altitude ;
- 5- La circulation atmosphérique avec les deux types de mouvements atmosphériques :
 - a. les mouvements verticaux avec la notion d'humidité atmosphérique (humidité absolue, humidité saturante et humidité), la notion d'adiabatique, la stabilité et l'instabilité atmosphériques, évaporation, condensation et précipitations ;
 - b. Mouvements horizontaux : pression à la surface de la Terre, centres d'action et vent ;
- 6- Les principales zones climatiques de la planète.

Chapitre 2- Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie (diagramme de phases de l'eau, bassin versant, bilan hydrologique).

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

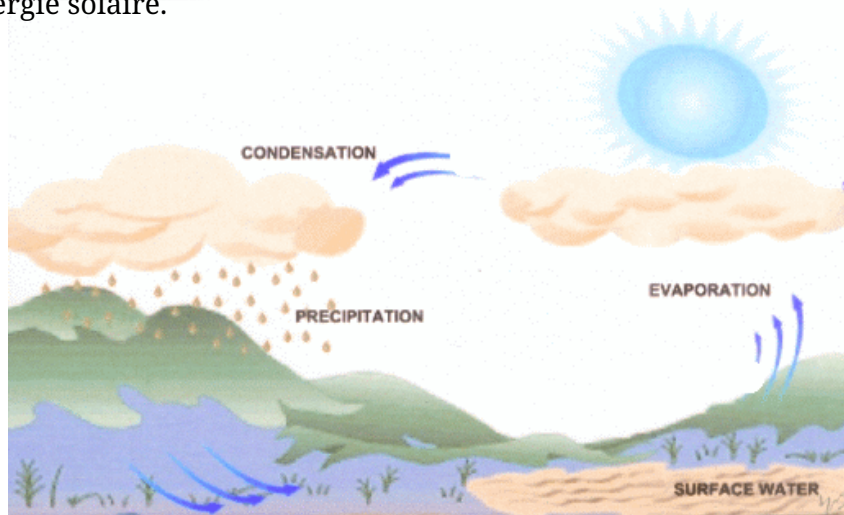


Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Le cycle de l'eau traduit les échanges d'eau liquide, solide ou gazeuse entre les différents compartiments du système climatique : atmosphère, océans, lacs, fleuves, glaciers, etc. Ces échanges sont réalisés via des flux verticaux (les précipitations, l'évaporation, la transpiration des végétaux, l'infiltration dans les sols) et horizontaux (l'écoulement dans le réseau hydrographique). Le « moteur » de ce cycle est l'énergie solaire.



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Le cycle de l'eau se résume comme suit :

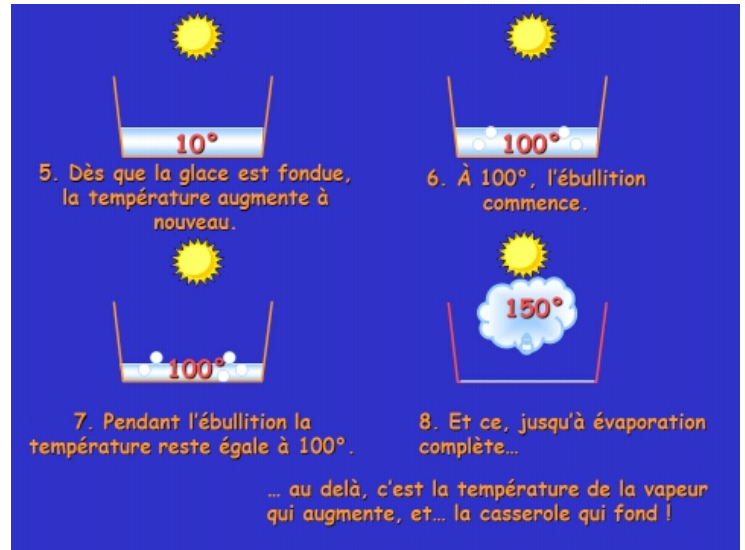
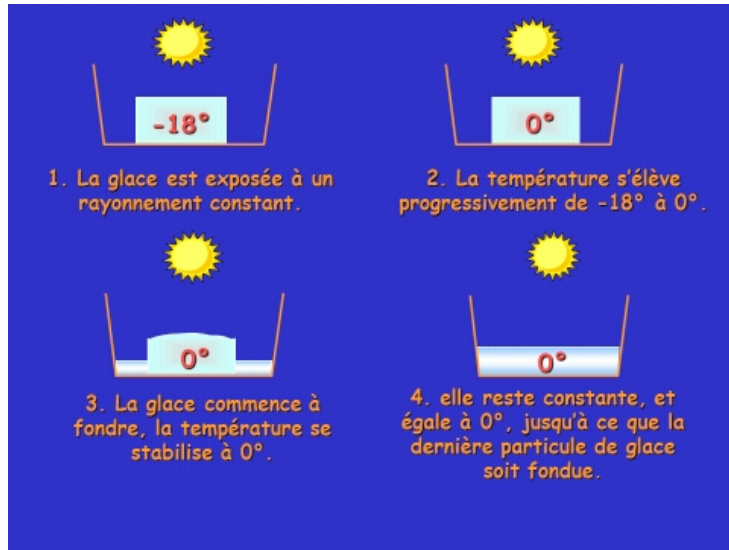
1. évaporation : chauffée par le soleil, les eaux des océans et des mers, , s'évapore
2. évapo-transpiration : elle touche les lacs, les cours d'eau ainsi que la plupart des terrains et leur végétation ;
3. condensation : En s'élevant, l'air chaud et humide se refroidit et forme des nuages par regroupement des gouttelettes d'eau, c'est la condensation ;
4. précipitations : Cette eau, contenue dans les nuages, retombe sur les océans et les continents lors des pluies et des tombées de neige.
5. ruissellement : L'eau rejoint, dans un temps plus ou moins long, un cours d'eau. L'eau va de nouveau aller dans l'océan, les lacs et va reprendre le même chemin, ainsi c'est un cycle qui recommence à chaque fois ;
6. infiltration : l'eau s'infiltré dans les roches, elle forme des nappes d'eau souterraine. Dans la plupart de ces nappes, l'eau circule lentement et fini par ressortir par des sources ou directement par le fond des cours d'eau.

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Evaporation et condensation

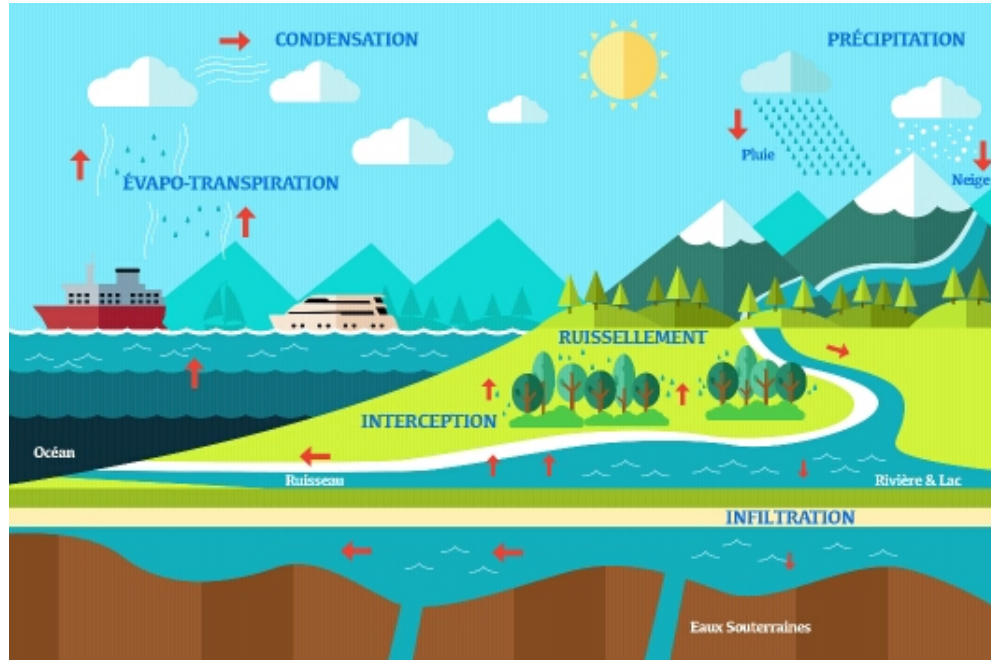


Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Précipitation, ruissellement, infiltration



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

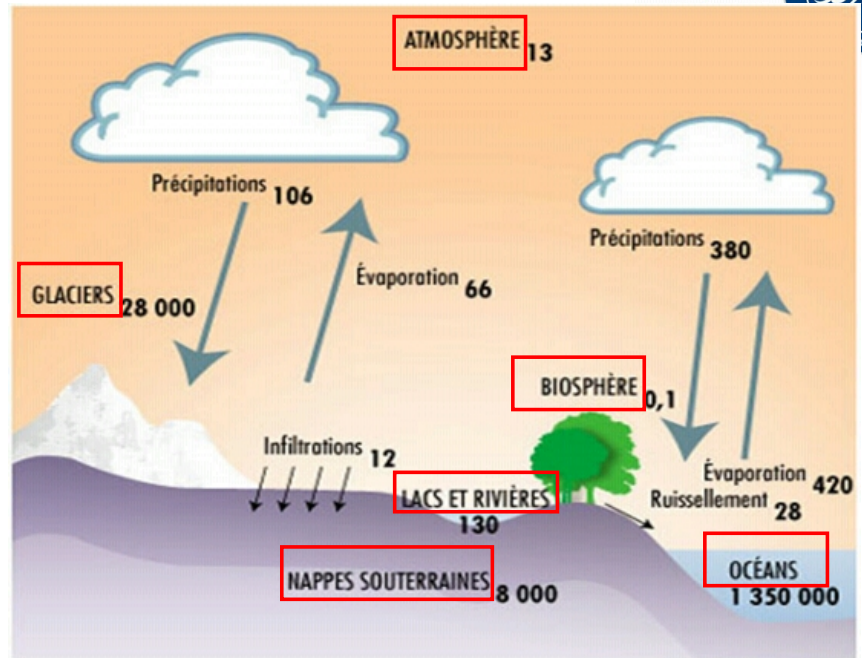
Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

La Terre est l'unique planète du système solaire qui possède de l'eau condensée et gazeuse à sa surface. Les changements de l'état de l'eau à la surface de la Terre sont possibles grâce à l'énergie que le soleil apporte à la Terre. L'eau sur la planète est distribuée comme suit :

- l'eau sous forme salée dans les mers et océans = 97,2 %.
- l'eau douce = 2,8 %
 - 3/4 de l'eau douce est sous forme de glace soit 2,1 % de l'eau de la Terre.
 - 1/4 de l'eau douce est liquide soit 0,7 % de l'eau de la Terre.

C'est l'eau douce et liquide qui est la plus facilement utilisable pour nos besoins. Sur la totalité de cette eau, seule une partie est réellement accessible, le reste étant renfermé dans des nappes souterraines profondes.



En majuscules : STOCKS; En minuscules : flux.
Valeurs exprimées en milliard de km³

Prof. Ilham Kolling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

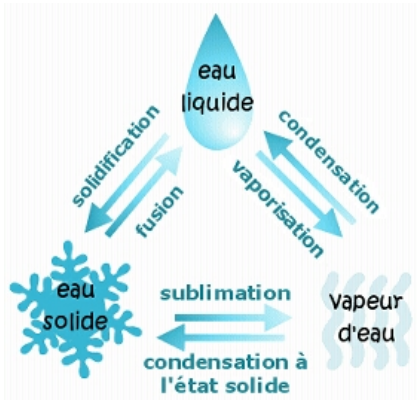
Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

L'eau est la source principale et originelle de toute vie. Elle se présente, dans la nature, sous trois états :

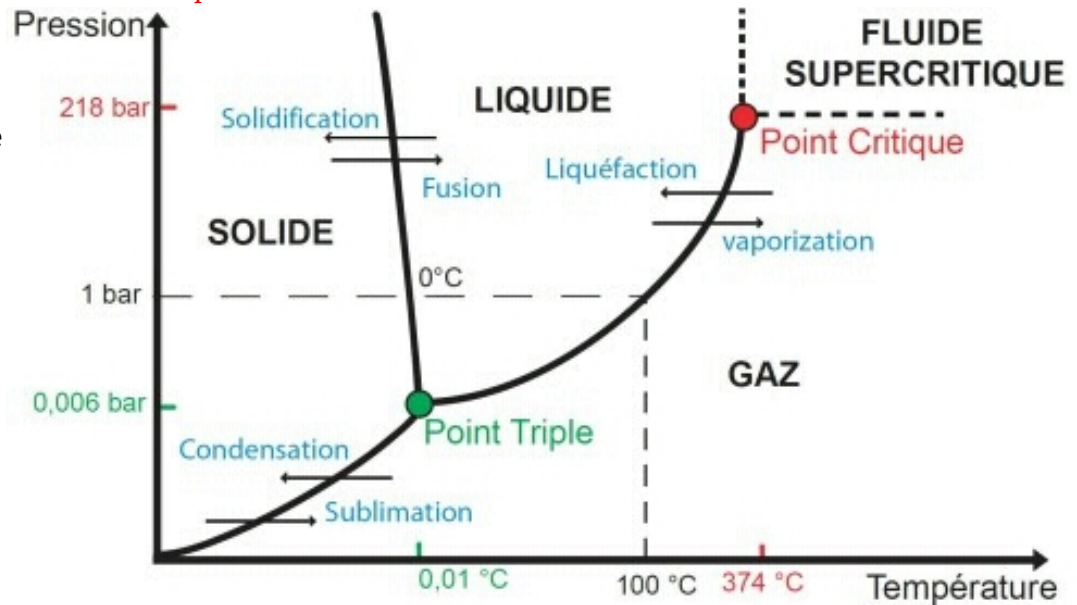
Solide : neige et glace.

Liquide : eau chimiquement pure ou chargée en solutés.

Gazeux : à différents degrés de pression et de saturation.



Le changement de phase de l'eau dépend essentiellement de la température et de la pression mais aussi du degré de pollution de l'atmosphère.



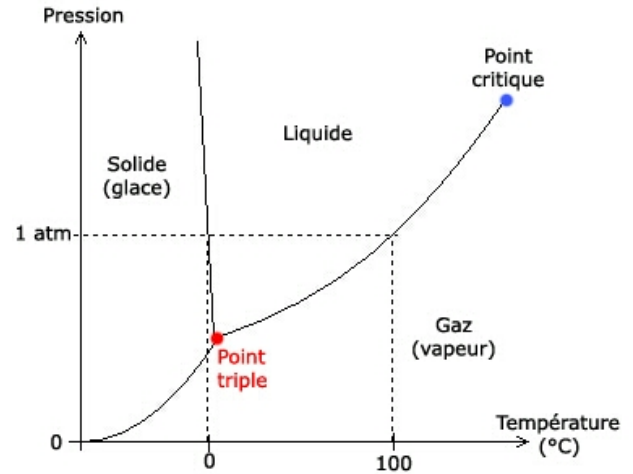
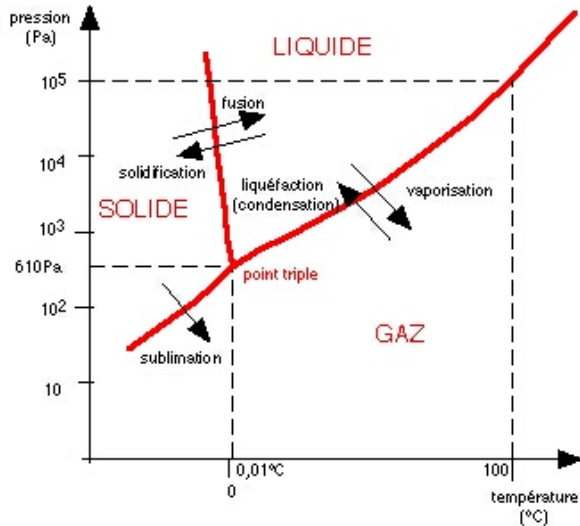
Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Il existe 2 points particuliers :

- Le point triple où les 3 états coexistent ensemble (0,006 bar et 0,01°C pour l'eau).
- Le point critique : au-delà de ce point, liquide et gaz ne sont plus distinguables et on parle alors de fluide supercritique (218 bar et 374 °C pour l'eau). C'est en quelque sorte un état indéfini, car au-delà de ce point, les transitions de phase sont impossibles et donc il n'est plus possible de distinguer gaz et liquide.

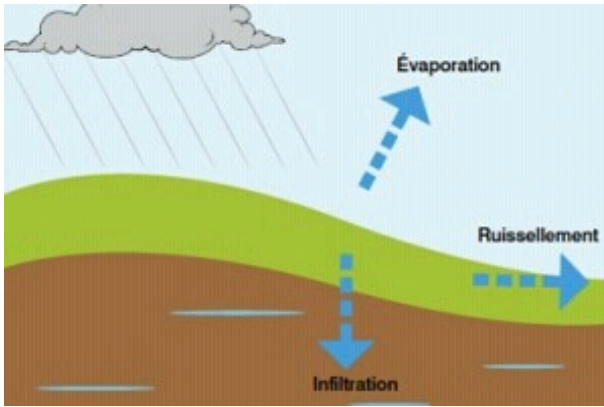


Les mécanismes des mouvements de l'eau dans la nature sont déterminés par l'énergie thermique solaire, la gravité, l'attraction solaire, l'attraction lunaire, la pression atmosphérique, les forces intermoléculaires, les réactions chimiques, nucléaires et les activités biologiques, et enfin les activités humaines.

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Ruissellement

Après les pluies, les eaux peuvent s'infiltrer, s'évaporer ou ruisseler ; les eaux de ruissellement sont aussi appelées eaux sauvages ; elles sont responsables de certaines formes d'érosion telles :



Cheminées de fée dans les alpes



Ravinement de sol rouge



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Cours d'eau

Contrairement au ruissellement, la circulation des eaux peut se concentrer sous forme de cours d'eau en vallées plus ou moins étroites. un cours d'eau est

- son Bassin Versant (bassin hydrographique);
- son Lit (ou chenal d'écoulement);
- son Embouchure



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

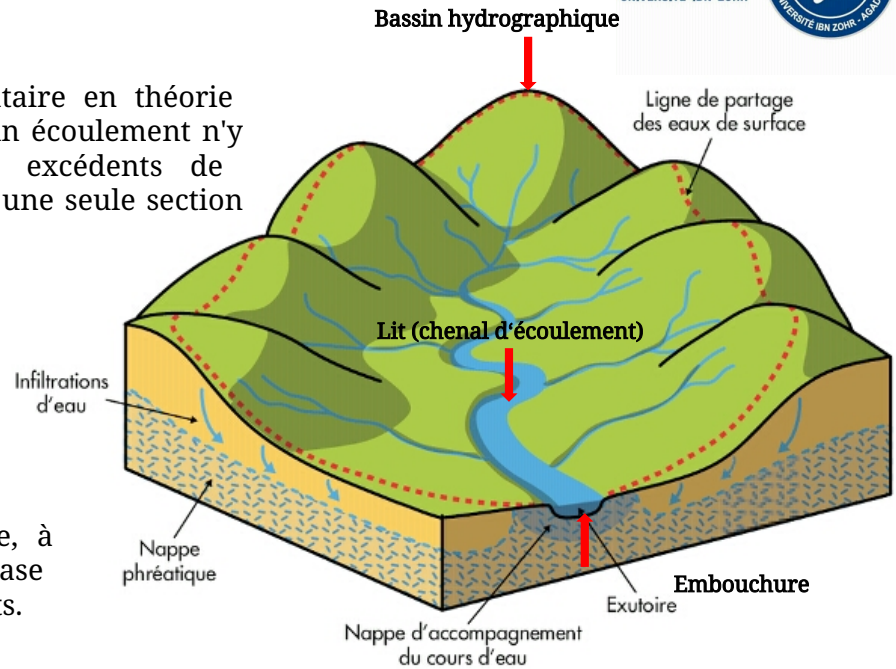
Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant

Le bassin versant est une surface élémentaire en théorie hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire

C'est l'ensemble des pentes inclinées vers un même cours d'eau qui alimentent celui-ci en eau de ruissellement ; les Bassins versants voisins sont séparés par la ligne de partage des eaux .

Le bassin versant correspond, en principe, à l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

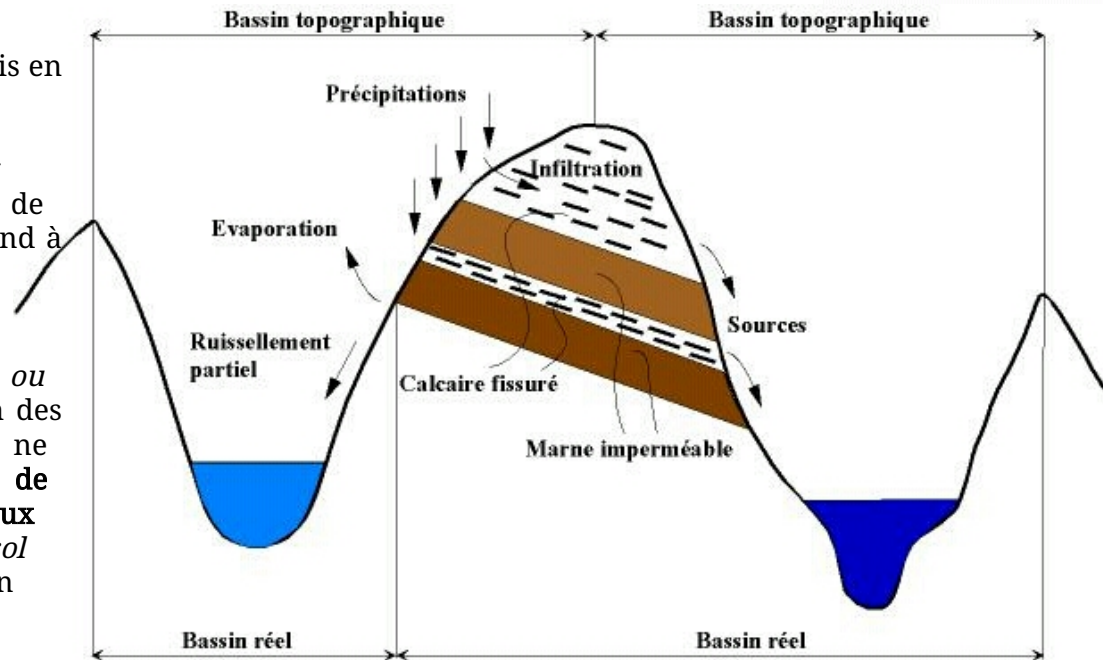
Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant

Deux types de bassins sont mis en évidence:

- Le *bassin versant topographique*: la ligne de partage des eaux correspond à la ligne de crête;
- Le *bassin versant réel ou hydrogéologique*: la division des eaux selon la topographie ne correspond pas à la **ligne de partage effective des eaux souterraines** lorsqu'un *sol perméable* recouvre un *substratum imperméable*.



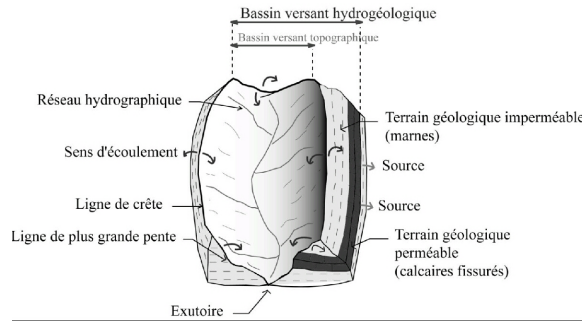
Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant

Lorsque l'on s'intéresse au ruissellement, la délimitation du bassin versant doit aussi tenir compte des barrières artificielles (routes, chemins de fer, etc.). En effet, l'hydrologie du bassin versant (notamment la surface drainée), peuvent être modifiées par la présence d'apports latéraux artificiels, comme les réseaux d'eaux usées ou potables, les drainages, les routes, les pompages ou les dérivations artificielles modifiant le bilan hydrologique.



Prof. Ilham Kolling-Bouimetarhan

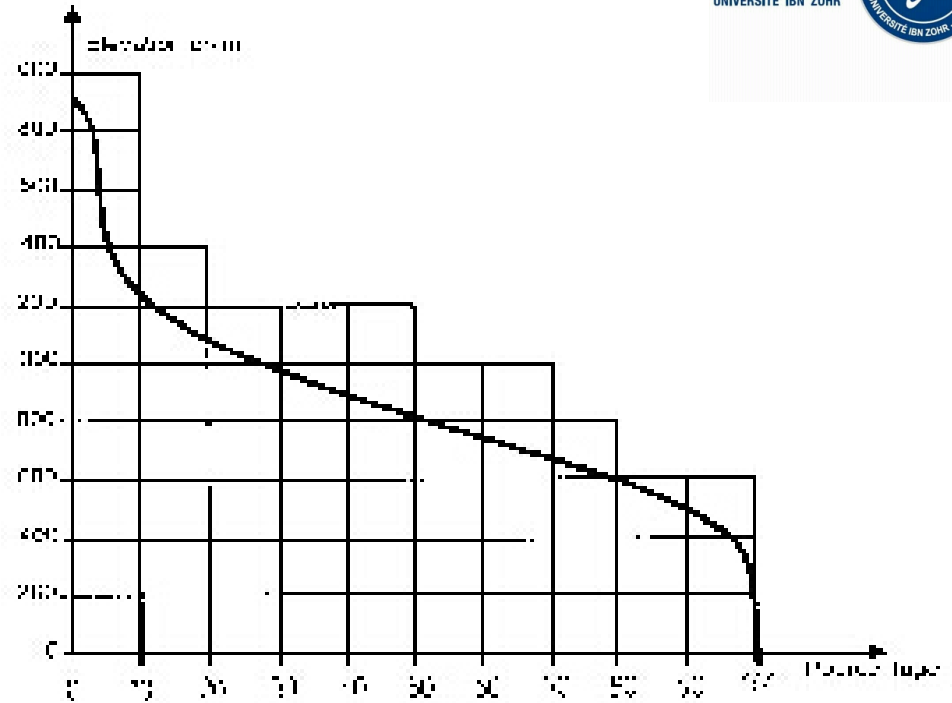
Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Cours d'eau: bassin versant

Le bassin versant est un **objet complexe** dont l'ensemble des caractéristiques (géométriques, géologiques, physiographiques, humaines, etc.) joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin à une sollicitation des précipitations (régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certaines d'entre elles (altitude, exposition...), directement dans le processus de formation de la pluie.

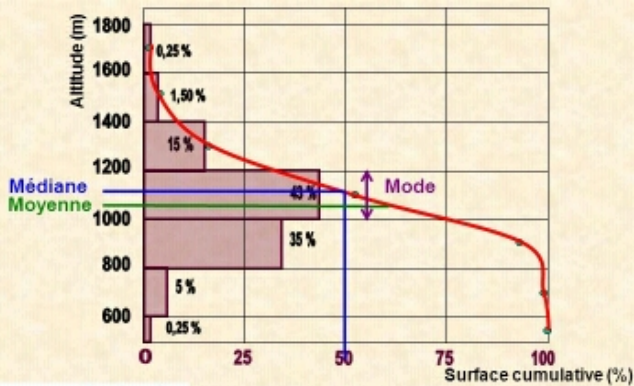


Prof. Ilham Kolling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant



Altitude moyenne du bassin

$$H_{moy} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \left[S_i \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right]$$

- H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant (en m)
- A : Surface totale du bassin versant (en m^2)
- S_i : Surface comprise entre deux courbes de niveau (en m^2)
- h_i, h_{i+1} : Altitudes haut et bas qui délimite la surface S_i (en m)

Altitude médiane: Correspond au point d'abscisse (50 %) sur la courbe hypsométrique.

Mode ou altitude la plus fréquente : C'est la classe qui représente le plus grand effectif.

Surface

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

Forme

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants.

Courbe hypsométrique (Relief)

Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

En abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

La plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont fonction de l'altitude. La courbe hypsométrique traduit la répartition des altitudes à l'intérieur du bassin versant et permet, en outre, de déterminer les altitudes caractéristiques.

L'altitude est décrite par la courbe hypsométrique qui représente la surface en km^2 (ou le pourcentage de la surface) en fonction des altitudes supérieures à une côte Z donnée.

Cette courbe est établie en planimétrant pour différentes altitudes les surfaces situées au dessus de la courbe de niveau correspondante. Une autre méthode consiste à échantillonner

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Courbe hypsométrique

Altitude m	Surface Km ²	% Surface totale	Surface cumulative %
1800-1600	250	0,25	0,25
1400-1600	1500	1,5	1,75
1200-1400	15000	15	16,75
1000-1200	43000	43	59,75
800-1000	35000	35	94,75
600-800	5000	5	99,75
400-600	250	0,25	100

Pour réaliser l'hypsogramme

$$S_T = S_1 + S_2 + \dots + S_n = \sum_{i=1}^n S_i = 100000 \text{ m}^2$$

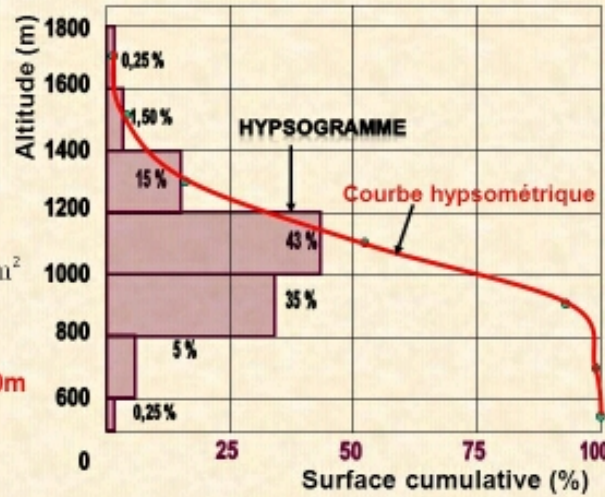
$$S_i (\%) = \frac{S_i}{S_T} \times 100$$

Exemple pour l'altitude 1800-1600m

$$S_i (\%) = \frac{250}{100000} \times 100 = 0,25 \%$$

Pour réaliser la courbe hypsométrique:

$$S_k = \sum_{i=1}^k S_i$$



Pour l'altitude 1800-1600 m on a 0,25 %
 Pour 1400-1600 m on a 0,25+1,5 = 1,75%
 Pour 1200-1400 m on a 1,75+15 = 16,75%

Les altitudes selon un maillage carré, l'altitude au centre d'une maille étant considérée égale à l'altitude moyenne de la maille.

Altitude médiane correspond au point d'abscisse 50 % sur la courbe hypsométrique. **L'altitude maximale et minimale** du bassin (Altitude la plus fréquente) : c'est l'altitude correspondante au maximum de superficie sur la courbe hypsométrique

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Cours d'eau: bassin versant



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

- **bassin jeune** : superficie faible par rapport au changement d'altitude initiale, ce qui est caractéristique des bassins abrupts.
- **vieux bassin** : plaine douce près d'un cours d'eau où l'altitude varie très peu malgré une superficie importante ;
- **bassin « mature »** 'intermédiaire' entre le jeune et le vieux bassin.

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant

1- **Le stade de jeunesse** d'une vallée fluviale se caractérise par le creusement qui conduit à la formation des vallées étroites en **V** ; les reliefs sont accentués et on trouve le long des cours d'eau les chutes et les cascades issus de l'érosion linéaire.



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan



Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant



1- **Le stade de maturité** le cours d'eau aplanit ses reliefs et diminue les pentes ; il commence à éroder latéralement élargissant la vallée et créant des **méandres**

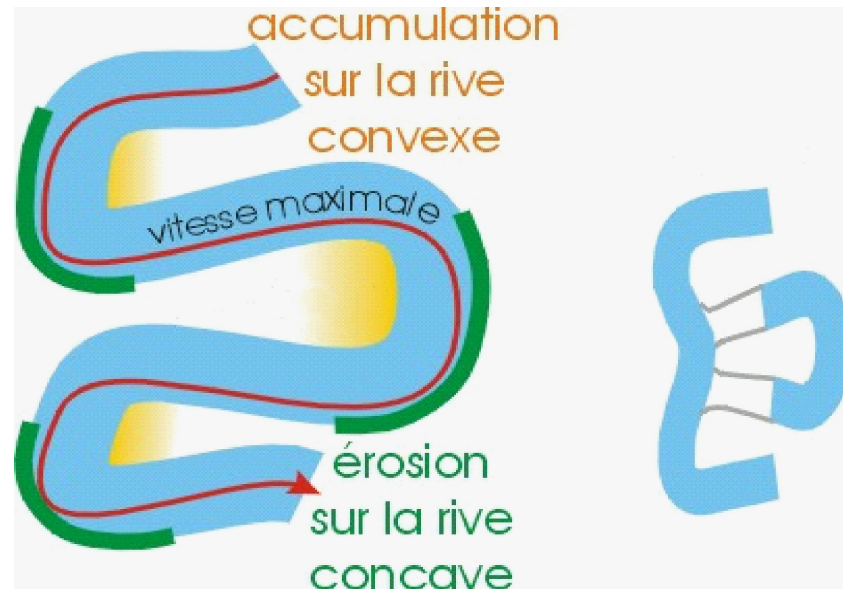


Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant



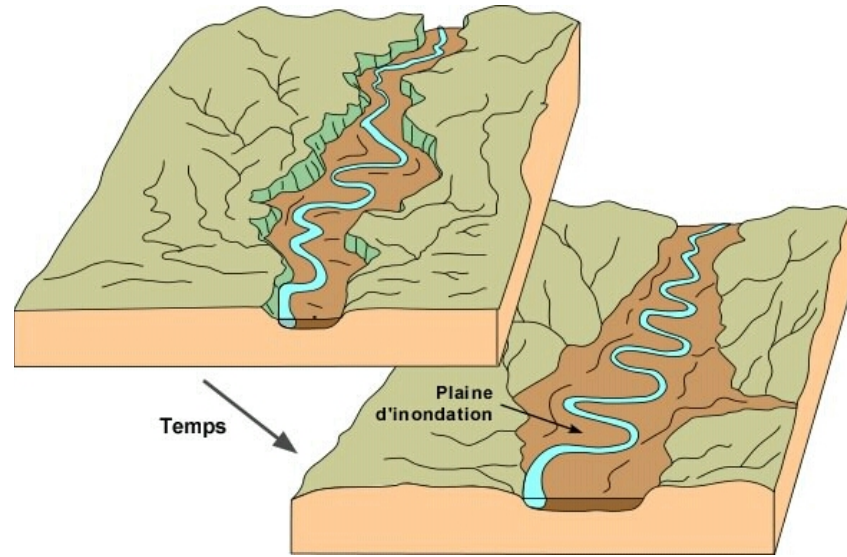
Méandre dans la région la haute vallée de Dades
(Tortue de Dades)

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant



Stade de vieillesse d'une vallée fluviale

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: bassin versant



Il se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est une des caractéristiques les plus importantes du bassin. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin versant à un autre est essentiellement due à quatre facteurs principaux :

Géologie

Par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. Le réseau de drainage n'est habituellement pas le même dans une région où prédominent les roches sédimentaires, par comparaison à des roches ignées (i.e. provenant du refroidissement du magma). La structure de la roche, sa forme, les failles, les plissements, forcent le courant à changer de direction.

Climat

Le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.

Pente

Elle détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

Effet anthropique

Le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Cours d'eau: Lit ou chenal d'écoulement

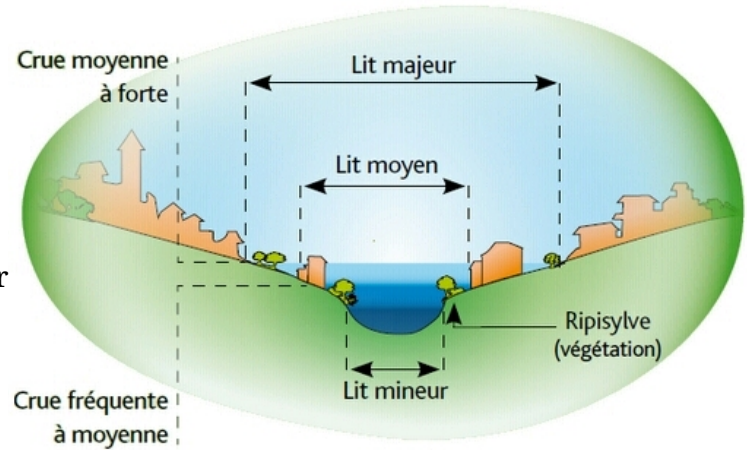
Le Lit d'un Cours d'eau est la partie de la vallée occupée d'une manière permanente ou temporaire par l'eau. On y distingue les parties suivantes

Lit majeur est la zone où l'eau s'étale lors des inondations (crues exceptionnelles) ;

Lit mineur est la zone empruntée habituellement par le cours d'eau lors des crues normales ;

Plaine d'inondation est la zone du lit majeur envahie par l'eau lors des grandes crues (= inondations).

Chenal d'étiage est la partie du lit mineur occupée par l'eau lorsque le débit est minimal (étiage) ;

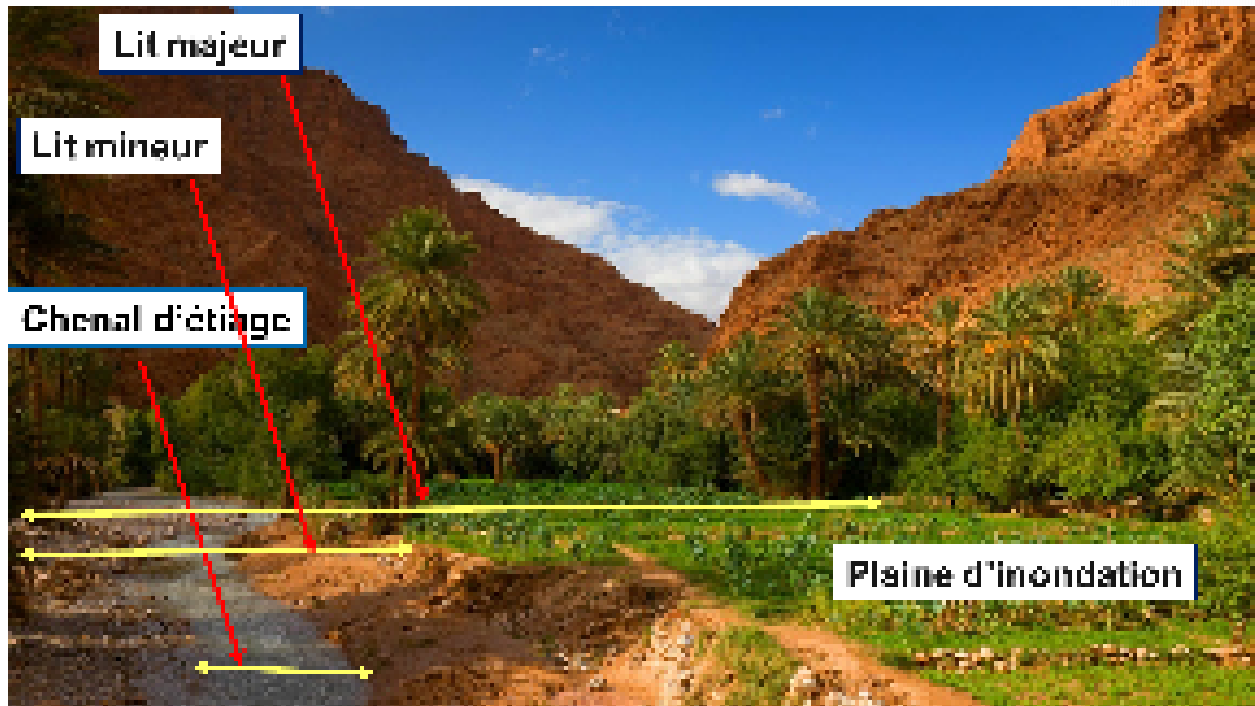


Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: Lit ou chenal d'écoulement



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Cours d'eau: Embouchure

C'est l'endroit où déverse un fleuve ou une rivière dans une mer (Cours d'eau exoréique: ex. Oueds Draa, Souss, Massa, Saguia El Hamra, Oum Errabia, Bouregreg, ...)

ou dans un lac (Cours d'eau endoréique). Un cours d'eau n'ayant pas d'embouchure est aussi qualifié d'endoréique. l'embouchure peut être un Delta ou un Estuaire



Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Cours d'eau: Embouchure



La nature de l'embouchure dépend du débit solide du cours d'eau et de l'énergie des courants marins au niveau de la côte :

si les courants marins sont si forts pour déblayer et redistribuer les matériaux apportés par le fleuve, on parle d'Estuaire ; dans ce cas il y a pénétration du milieu marin dans le milieu continental



Estuaire de Moulouya

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Cours d'eau: Embouchure

Si le débit solide du fleuve est important et les courants marins sont faibles, les sédiments s'accumulent et aboutissent à la formation d'un Delta. Dans ce cas, le milieu continental gagne du terrain sur le milieu marin.

Delta du Nil

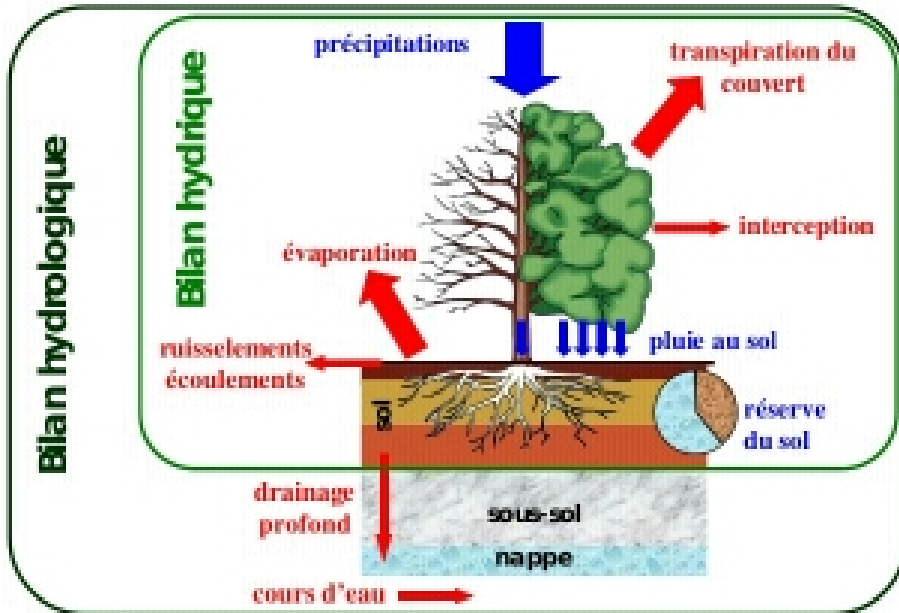


Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Bilan hydrologique



On peut schématiser le phénomène continu du cycle de l'eau en trois phases :

les précipitations,
le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain,
l'évaporation.

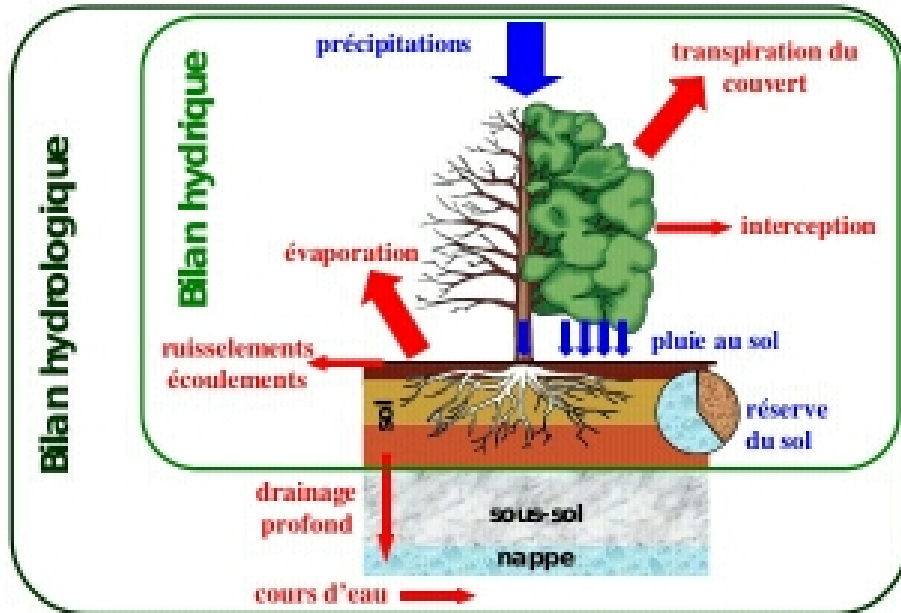
Dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état. Il s'ensuit que l'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut se faire à l'aide d'une équation appelée "hydrologique" qui est le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps.

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Bilan hydrologique



Le temporel introduit la notion de l'**année hydrologique**.

En principe, cette période d'une année est choisie en fonction des conditions climatiques.

Ainsi en fonction de la situation météorologique des régions, l'année hydrologique peut débuter à des dates différentes de celle du calendrier ordinaire.

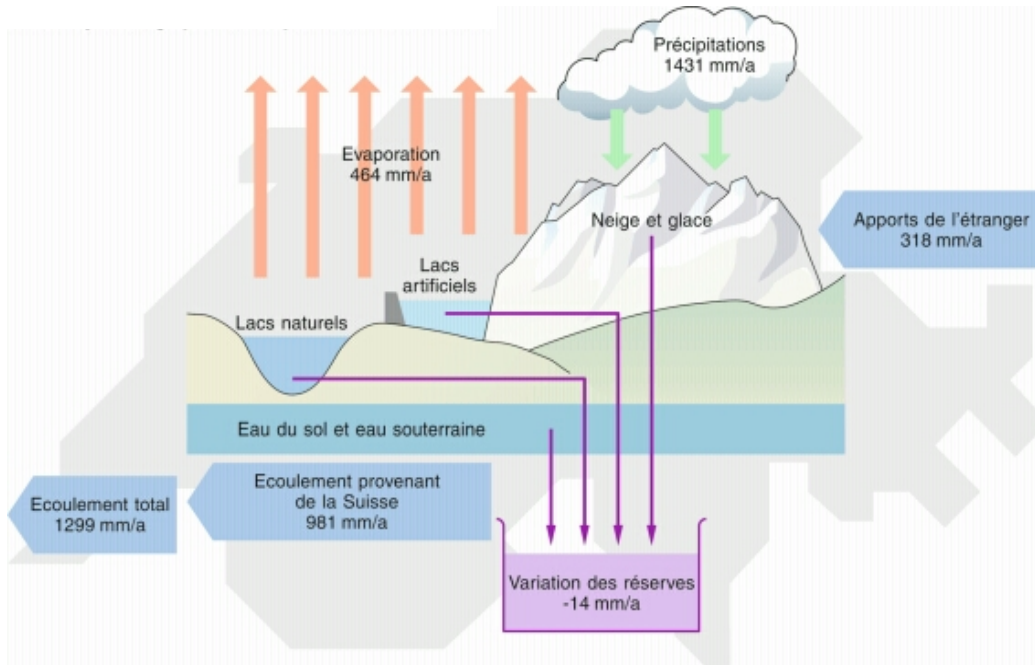
Au niveau de l'espace, il est d'usage de travailler à l'échelle d'un bassin versant, mais il est possible de raisonner à un autre niveau (zone administrative, entité régionale, etc.).

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Bilan hydrologique



L'équation du **bilan hydrique** se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donnés :

$$P+S=R+E+(S\pm\Delta S)$$

P : précipitations (liquide et solide) [mm],

S : ressources (accumulation) de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm],

R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm],

E : évaporation (y compris évapotranspiration) [mm],

S + ΔS : ressources accumulées à la fin de la période [mm].

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

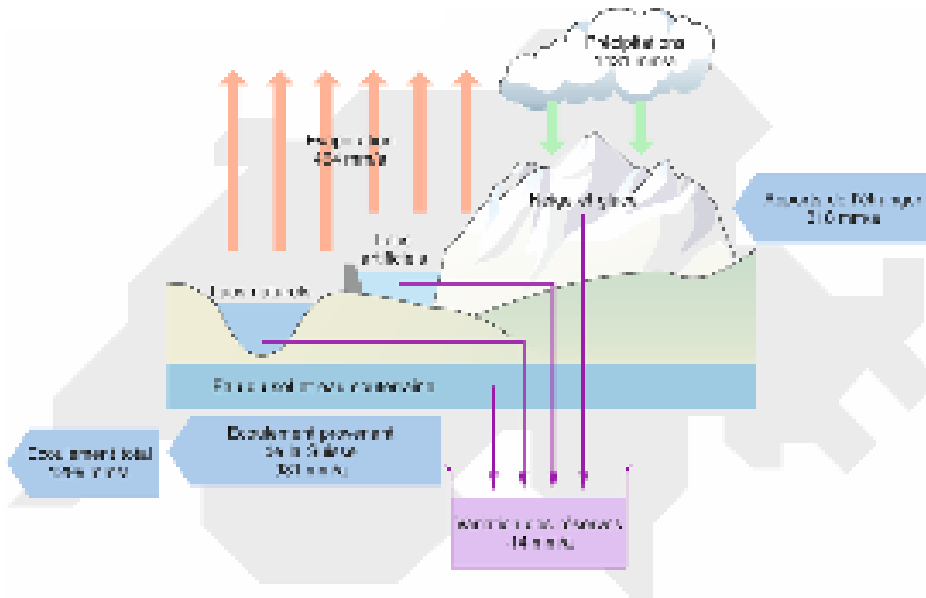
Année universitaire 2017-2018

جامعة ابن زهر
UNIVERSITÉ IBN ZOHR

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Bilan hydrologique



Si le bassin versant naturel est relativement imperméable, la variation de stock sur une période donnée peut être considérée comme nulle ($DS=0$). Dès lors, on peut introduire le déficit d'écoulement D dans l'équation qui s'écrit :

$$I - O = D$$

I : volume entrant [mm] ou [m³],
 O : volume sortant [mm] ou [m³],
 D : Déficit

Ce **déficit d'écoulement** représente essentiellement les pertes dues à l'évaporation. Il peut être estimé à l'aide de mesures ou de méthodes de calcul.

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Bilan hydrologique

A titre illustratif, les formules de Turc et Coutagne sont les suivantes :

Formule de Turc

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle

T : température moyenne annuelle [°C].

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

Formule de Coutagne

$$D = P - m \cdot P^2$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle [mm],

m = $1/(0.8 + 0.16 T)$: coefficient régional (m=0.42 pour la France).

La connaissance du déficit d'écoulement permet d'évaluer le comportement du système ou la fiabilité des données sensées le décrire, par comparaison entre les valeurs du déficit calculées directement et les valeurs estimées dans un bassin versant plus grand.

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

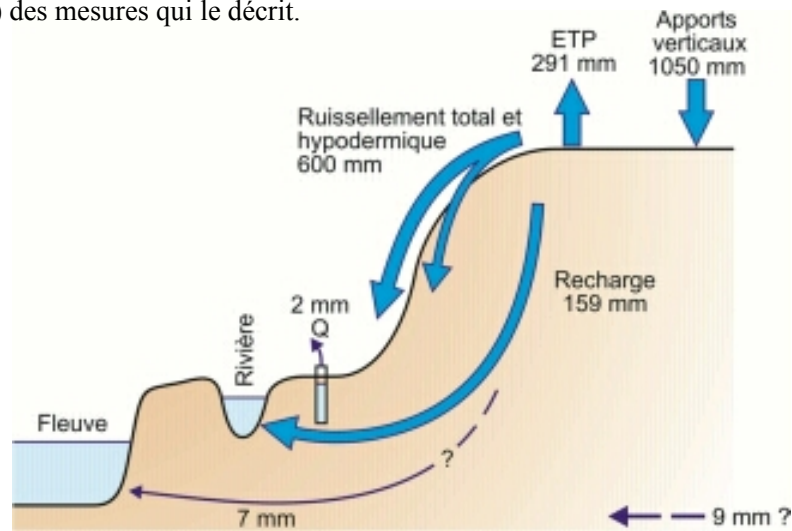
Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie

Bilan hydrologique

L'application de la méthode du bilan hydrique est limitée par la difficulté de quantifier les variables. Effectivement, les processus hydrologiques sont difficiles à observer directement sur le terrain et donc à mesurer.

Notons que les erreurs de mesure éventuelles se répercutent directement sur les valeurs calculées de l'évaporation. Devant ces imprécisions, on suggère l'emploi de cette méthode dans le cas d'un avant-projet par exemple, pour vérifier l'état du système et surtout la validité (la fiabilité) des mesures qui le décrit.



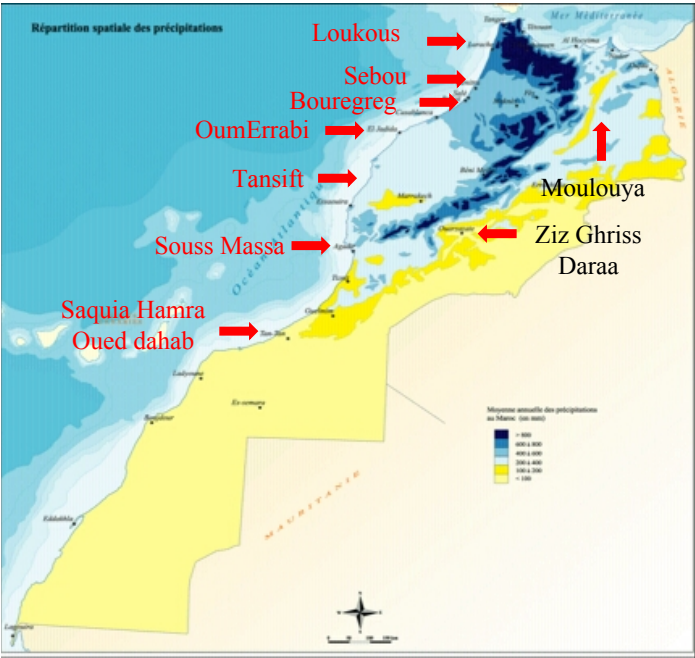
Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018

Cycle de l'eau et ses composantes et notions d'hydrologie



Les grands bassins versants du Maroc



Le Maroc est doté d'un réseau hydrographique relativement développé. Les bassins versants respectifs sont répartis en six zones :

Zone méditerranéenne	Zone atlantique
bassin versant de l'oued Kert	bassin versant de l'oued Sebou
bassin versant de l'oued Nekor	bassin versant de l'oued Oum Rbiâ
bassin versant de l'oued Martil	bassin versant de l'oued Loukos
bassin versant de l'oued Laou	bassin versant de l'oued BouRegreg
	bassin versant de l'oued Tensift
Zone orientale	Zone atlasique orientale
bassin versant de l'oued Moulouya	Bassin versant de l'oued Ziz
bassin versant de l'oued Kiss	Bassin versant de l'oued Guir
bassin versant de l'oued Isly	Bassin versant de l'oued Draâ
Zone sud atlasique occidentale	Zone saharienne
bassin versant de l'oued Souss	Bassin versant de Seguia El Hamra
bassin versant de l'oued Massa	

Prof. Ilham Kölling-Bouimetarhan

Année universitaire 2017-2018