

Quelques éléments d'hydrodynamique des cours d'eau

L'hydrosphère et les systèmes de la Terre

Cours

Les cours d'eau interviennent sur les processus géologiques :

- en participant à l'érosion,
- en participant au transport d'éléments dissous ou de particules solides éventuellement jusqu'aux océans
- en tant que lieux de sédimentation d'alluvions.

Ces différents rôles sont variables selon les cours d'eau et les différentes parties de leur cours. Il est donc important de connaître quelques éléments d'hydrologie pour comprendre le rôle géologique des cours d'eau et pour concevoir des projets d'aménagements hydrauliques.

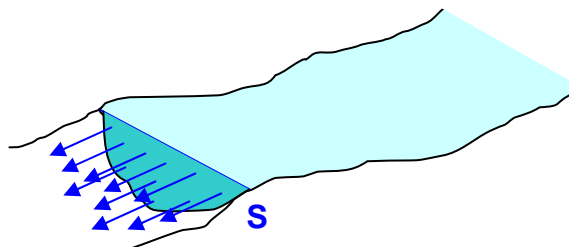
I – Le débit liquide des cours d'eau

A- La mesure du débit liquide d'un cours d'eau

Vous êtes vous jamais demandé, en vous penchant au dessus du parapet d'un pont enjambant une rivière tumultueuse, quel volume d'eau s'écoule sous le pont à chaque seconde ? Cette mesure, c'est le débit, défini comme le volume d'eau (V) qui traverse la section (S) du cours d'eau pendant une unité de temps (t)

$$Q = V / t$$

Le débit s'exprime donc, par exemple, en $m^3 \cdot s^{-1}$ ou encore en km^3/an .



Ce débit est variable (voir plus loin), mais dépend de la surface du **bassin versant** (S_B , en km^2) qui est une constante. Pour comparer des fleuves aux bassins versants de superficies différentes, on divise le débit par la surface du bassin pour obtenir le **débit spécifique**, exprimé par exemple en $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$:

$$Q_{sp} = Q / S_B$$

Si, dans cette formule du débit spécifique, on exprime le rapport volume / surface sous la forme d'une hauteur, on obtient la **lame d'eau écoulée** ou **écoulement (Ec)**, exprimée par exemple en mm/an. Il s'agit en fait de la même grandeur, on se contente de changer d'unités et de point de vue.

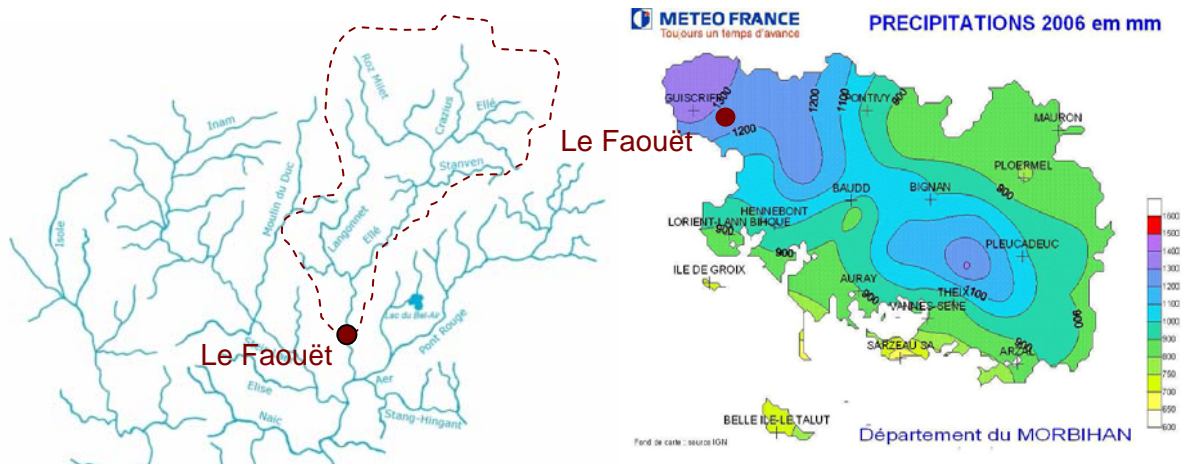
La lame d'eau écoulée est également nommée **pluie efficace** : elle correspond à la part des précipitations qui atteint effectivement le cours d'eau. On peut donc la comparer à la lame d'eau précipitée, notée P, et elle aussi exprimée en mm. La différence correspond à l'eau perdue par évapotranspiration (ETR), et éventuellement à l'eau qui recharge les nappes souterraines (ΔR), si l'on n'est pas à l'équilibre. On a donc le **bilan hydrologique** :

$$P = Ec + ETR + \Delta R$$

Si on néglige le terme de la recharge des nappes ΔR , on voit que l'on peut estimer l'évapotranspiration dans le bassin versant, en faisant simplement la différence de la lame d'eau précipitée et de la lame d'eau écoulée, $P - E_c$. L'évapotranspiration est en effet un phénomène très difficile à mesurer directement.

Application : hydrologie de la rivière bretonne Ellé, dans son cours amont.

- Le bassin versant de l'Ellé, en amont de la ville du Faouët, a une superficie de 142 km^2
- Le débit moyen de l'Ellé au Faouët (moyenne sur plusieurs années) est de $2,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Le cumul annuel des précipitations sur le bassin versant de l'Ellé est de 1200 mm .



Le débit spécifique de l'Ellé au Faouët est donc de :

$$Q_{sp} = 2740/142 = 19,3 \text{ litre} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2} \text{ ou encore } 19,3 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

La lame d'eau écoulée annuelle vaut par conséquent :

$$E_c \text{ annuel} = 19,3 \cdot 10^{-6} \times 3600 \times 24 \times 365,25 = 609 \text{ mm / an}$$

Le bassin versant de l'Ellé perd donc chaque année, par évapotranspiration, un maximum de

$$ETR = 1200 - 608 = 592 \text{ mm / an} \quad \text{soit la moitié de l'eau précipitée !}$$

La lame d'eau écoulée correspond à l'eau qui ruisselle en surface jusqu'à la rivière, et à celle qui s'est infiltrée et chemine sous la surface pour finir par rejoindre également la rivière. Dans les bassins versants où la majorité de l'eau ruisselle au lieu de s'infiltrer, la lame d'eau écoulée donne une valeur supérieure au ruissellement. Cette méthode d'estimation indirecte est intéressante car le ruissellement est très difficile à évaluer directement ; or il est le principal agent responsable de l'érosion mécanique des versants, fournissant la quasi-totalité des matières en suspension exportées par les grands fleuves du monde vers les océans.

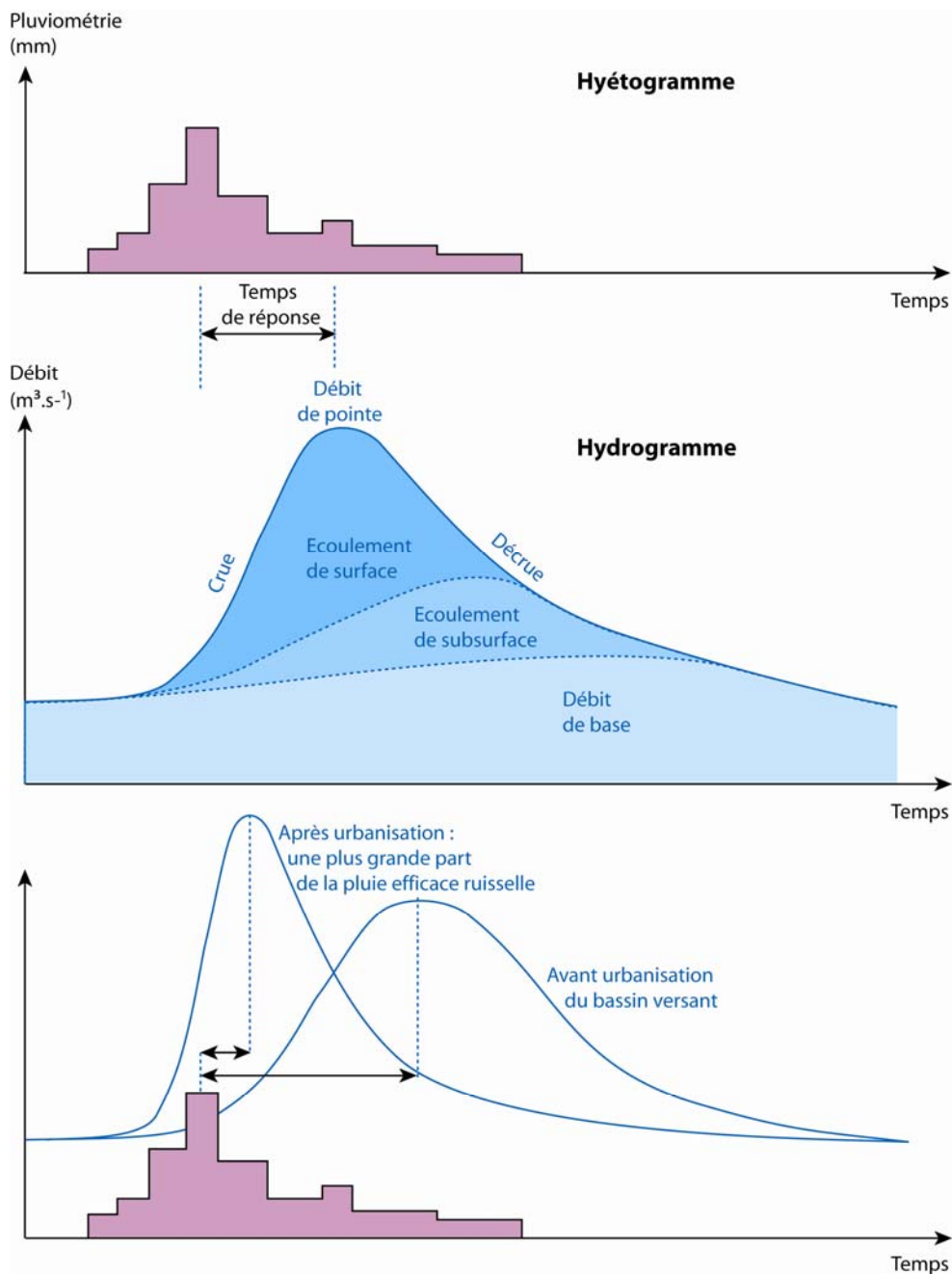
B- Fluctuations du débit d'un cours d'eau

La courbe montrant l'évolution du débit en fonction du temps est nommée **hydrogramme**. Cette courbe présente souvent des variations importantes. Le débit moyen de la Seine est de $275 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mais il peut tomber à $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en période d'**étiage** (plus bas niveau), et s'élever à $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en période de **crue**, quand la rivière sort de son lit (mineur) (voir la fiche « Morphologie des cours d'eau »). Ces fluctuations intègrent les variations des principaux facteurs qui ont affecté le bassin versant :

- précipitations,
- température et intensité de l'évaporation,
- température et fonte des neiges
- cycle des végétaux et intensité de l'évapotranspiration

Les crues sont dues par exemple à des précipitations particulièrement abondantes, mais pas forcément sous forme d'averses, ou bien à la fonte des neiges ou des glaces.

Comment le débit d'un cours d'eau évolue-t-il après de fortes pluies sur son bassin versant ? La crue n'est bien sûr pas immédiate, il faut le temps que l'eau chemine : une partie de l'eau précipitée ruisselle rapidement jusqu'à la rivière, et provoque une augmentation précoce du débit. Dans un bassin versant aux surfaces largement bétonnées et asphaltées, où le ruissellement prédomine, c'est donc peu après l'orage que l'on enregistre un maximum du débit, sous la forme d'un pic de grande amplitude mais de faible durée. Le débit maximum atteint est le **débit de pointe**, et le délai qui le sépare du maximum de pluviométrie est le **temps de réponse**. Dans un bassin versant plus naturel, au contraire, le temps de réponse est plus long : le débit de pointe, moins élevé, peut être enregistré plusieurs jours après l'orage, lorsque l'eau infiltrée, accumulée par les terrains qui agissent comme des éponges, chemine lentement sous la surface jusqu'à la rivière. La durée de la crue sera plus importante, mais son intensité plus faible. La taille du bassin versant influe également : plus sa superficie est importante, plus le temps de réponse est en général important.



C- Le débit liquide est en relation avec la vitesse du courant

On voit que la vitesse v du courant (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) est liée au débit Q (volume par unité de temps, en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) par la relation :

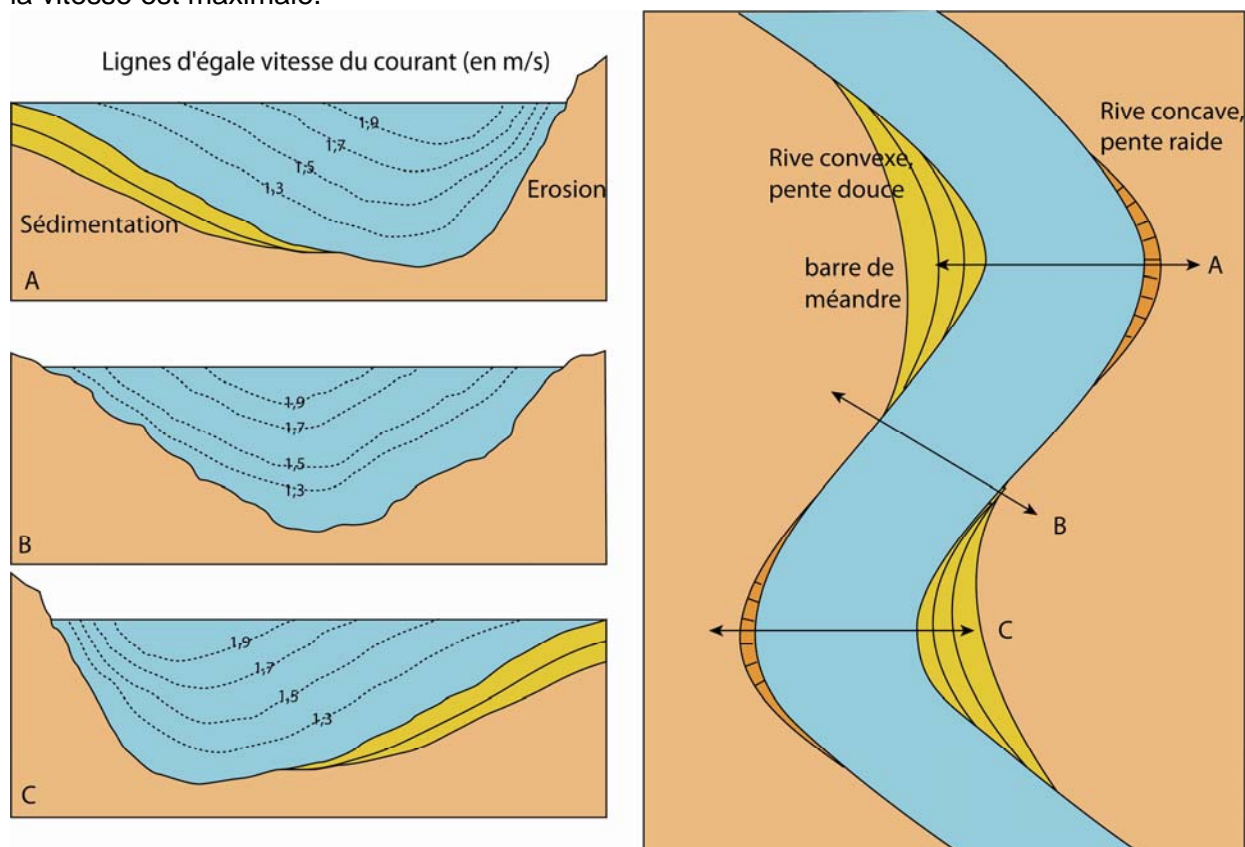
$$v = Q / S$$

avec S la section (en m^2), comme plus haut.

Si la section est constante (par exemple, si le cours d'eau s'écoule dans une canalisation), quand le débit augmente, la vitesse augmente aussi. En période de crue, par définition, le niveau de l'eau s'élève (la rivière sort de son lit), mais cela augmente généralement peu la section ; par conséquent, la vitesse augmente avec le débit.

Par ailleurs, le long d'un cours d'eau, la section varie. Si la section diminue (rétrécissement de la vallée), le débit restant à peu près constant, la vitesse du courant augmente, et la pression diminue (effet Venturi) ; cette chute de pression provoque le départ de gaz, lequel peut provoquer, par implosion, l'arrachement de roches aux parois (phénomène de cavitation). Au contraire, quand la vallée s'élargit, la vitesse diminue. La vitesse du courant est aussi tributaire de la pente du lit

Enfin, la vitesse n'est pas la même sur toute la section du cours d'eau : sur le fond et les parois (frottements), la vitesse est minimale, elle est maximale sous la surface. De plus, au niveau des **méandres**, la vitesse est inégale entre les deux berges : le long de la rive concave la vitesse est maximale.



D- Le débit liquide conditionne la charge en substances dissoutes

La charge en éléments dissous T_d (la masse d'éléments dissous exportée par unité de temps) dépend de la concentration des substances $[c]$ et du débit liquide du cours d'eau.

$$T_d = [c] Q$$

La quantité d'éléments dissous transportés varie beaucoup moins que la charge solide en suspension. En revanche, la concentration en éléments dissous est largement influencée

par la variation de débit : en temps de crue, le débit augmente et la concentration diminue. La raison est que l'eau des précipitations rejoint plus vite la rivière en période de crue (ruissellement prépondérant, sur des sols déjà saturés), et a donc moins de temps pour dissoudre les minéraux des roches exposées.

Les conditions saisonnières conduisent aussi à des variations : baisse de la solubilité l'hiver avec les basses températures.

II – Le débit solide des cours d'eau

A- Le débit solide ou charge d'un cours d'eau

C'est la quantité de matériel solide (M_s) qui traverse la section par unité de temps.

$$T_s = M_s / t$$

Par exemple, le Rhône a un débit solide de 40 kg par seconde, soit 4000 tonnes par jour. On nomme **capacité** la charge maximale que peut porter un cours d'eau en un point donné par unité de surface et de temps. On nomme **compétence** la masse maximale d'un élément solide que le cours d'eau peut transporter, compatible avec sa vitesse. Par exemple, en amont du Puy, la Loire est encore un torrent aux eaux rapides et peut transporter des galets, ce qu'elle ne fait plus à Nantes !

B- Le débit solide et la dynamique de l'écoulement

Le débit solide dépend du débit liquide, en relation avec la vitesse du courant. Hjulström, par ses études expérimentales, a montré la relation entre vitesse du courant, taille des particules et possibilités d'érosion, de transport et de sédimentation (*voir la fiche « origine des roches sédimentaires »*).

Les particules peuvent être transportées :

- par flottaison, si leur densité est inférieure à celle de l'eau ;
- en suspension, surtout dans la partie supérieure du cours d'eau, plus rapide ;
- par roulement, saltation (« sauts ») ou traction sur le fond, où le courant est moins rapide.

Cependant, nous avons vu que la vitesse n'est pas identique, non seulement sur la section, mais aussi le long du profil (variations de pente et de largeur du lit). Par ailleurs, des obstacles sur le trajet de l'eau (blocs, piles des ponts) peuvent modifier le type d'écoulement : l'**écoulement laminaire** (lignes de courants parallèles à la surface limite libre) devient **turbulent**, avec des tourbillons qui favorisent la mise en suspension de particules.

Les cours d'eau représentent donc une voie de circulation, non seulement de l'eau, mais aussi des particules qu'elle porte. Au niveau mondial, le transport solide serait largement supérieur (3,5 fois plus important) au transport sous forme soluble. La charge solide varie beaucoup géographiquement. La comparaison des grands fleuves mondiaux montre le contrôle par le climat, le relief et la nature des roches : le maximum de transport est observé dans les zones équatoriales, élevées (proximité de l'Himalaya), ou encore à bassin versant dans les loess, très facilement érodables (Fleuve jaune en Chine).

Les activités humaines, en particulier la construction de barrages qui provoquent une diminution du débit et de la charge transportée, modifient considérablement le transport des particules.

C. Pomerol et al., *Elements de géologie*, ed. Dunod 2011

