

3. 3. Types de Structure

3. 3. 1. Structure fragmentaire : (éléments sableux et silteux liés en agrégats par un ciment argilo-humique, sol perméable assurant une bonne aération). Les agrégats permettent à la fois une rétention de l'eau et des échanges chimiques avec la solution du sol et les racines. C'est la structure la plus intéressante pour l'agriculture.

3. 3. 2. Structure particulière : (éléments sableux de taille variable sans liaison, sol filtrant). Les particules de terre sont trop grandes et il n'y a pas d'agrégation entre elles (la plage de sable). Sa capacité d'infiltration est très élevée mais sa capacité de rétention très réduite, le sol est donc incultivable.

3. 3. 3. Structure compacte : (éléments sableux noyés dans une masse d'argile, sol asphyxiant). À l'opposé de la structure particulière, les particules sont très fines (grande proportion d'argiles) et s'agglomèrent, elle limite fortement l'infiltration de l'eau dans le sol qui s'engorge, on le dit saturé en eau. Ce sol s'appauvrit en oxygène et devient difficilement pénétrable par les racines.

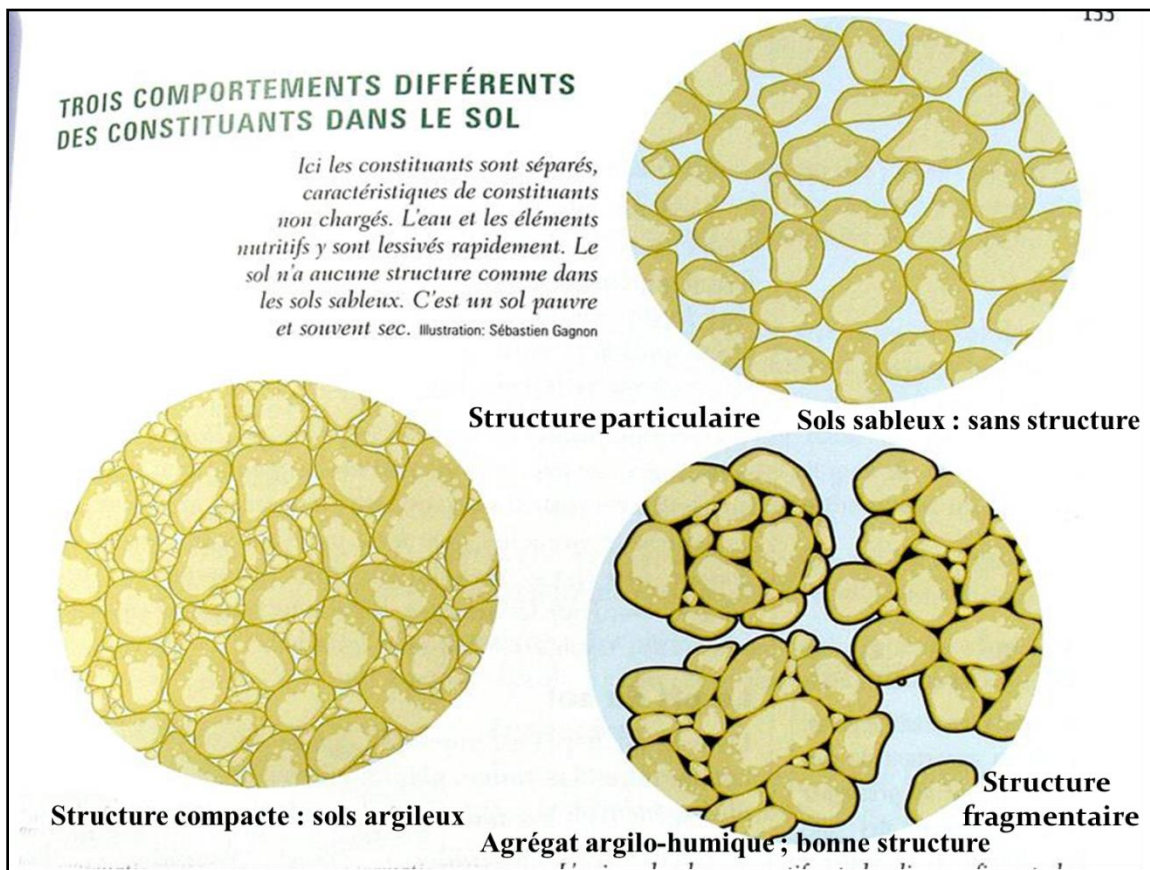


Figure 12. Les trois comportements différents des constituants dans le sol.

3. 4. Caractérisation morphologique de la structure

Trois critères sont pris en considération :

1. **LE TYPE** de structure, relatif à la forme générale des agrégats structurés;

2. **LA TAILLE** (ou classe), relative aux dimensions des agrégats;
3. **LA NETTETE** (ou degré de développement), relative aux proportions d'agrégats structurés dans la masse du sol.

3. 5. Effet de la structure

1. Porosité du sol, c'est-à-dire, le volume non occupé par les constituants solides du sol. On distingue les PORES CAPILLAIRES des PORES NON CAPILLAIRES. La porosité du sol est d'importance primordiale pour la circulation de l'eau et de l'air, influençant les possibilités d'activités biologiques (racines, microflore, faune).
2. Résistance de l'érosion: la structure facilite l'infiltration des eaux de pluie et réduit le ruissellement en surface.
3. Contacts sol-racines.
4. Echanges thermiques entre le sol et l'atmosphère.
5. Quelques moyens de conservation de la structure.
 - Maintien sous couverture végétale.
 - Maintien des réserves humiques et calciques.
 - Eviter le travail du sol ou le passage d'engins lourds en conditions hydriques inadéquates.

4. Les états de l'eau dans le sol

En simplifiant, car il n'existe pas vraiment de coupure rigoureuse entre les différents états de l'eau dans le sol, pas plus qu'il n'existe de limite physique rigoureuse entre micro et macro porosité, au regard de ces liaisons de l'eau et du sol, trois types d'eau, définis par leur mobilité, peuvent se distinguer :

- **L'eau gravitaire ou eau libre**, qui circule librement dans la macroporosité du sol, se déplace essentiellement vers le bas sous l'effet de la gravité, jusqu'à rencontrer un niveau imperméable ou déjà saturé.
- **L'eau de rétention capillaire ou l'eau utilisable par la plante** occupe la porosité capillaire ou microporosité ; les forces de tension superficielle l'emportent sur celles de la gravité, mais l'eau capillaire peut se déplacer dans les pores et interstices (« par capillarité »). Elle peut être extraite en grande partie par l'extraction racinaire : c'est la fraction de l'eau de rétention capillaire mobilisable qui constitue la réserve hydrique dans lesquelles puise la végétation en l'absence de précipitations pour assurer son alimentation en eau.
- **L'eau liée ou adsorbée forme** (l'eau inutilisable par la plante), autour des grains. d'épaisseur (on l'appelle aussi eau pelliculaire), rigoureusement immobile, de densité élevée (~ 1,5) et ne gelant pas. C'est une eau uniquement hygroscopique (l'épaisseur de

cette pellicule est en équilibre avec le degré hygrométrique de l'air dans le sol, diminuant rapidement dès que l'humidité relative est inférieure à 100 %), hors d'atteinte de la succion racinaire. Un sol qui ne contient plus que de l'eau liée provoque un manque d'eau irréversible pour les plantes qui s'y alimentaient : on appelle cet état hydrique le point de flétrissement, il correspond, sous nos bioclimats, à un $pF \sim 4,2$. L'eau hygroscopique ne participe pas de façon «habituelle» au cycle de l'eau, et peut donc être négligée dans les calculs de bilans (mais on doit en tenir compte dans l'estimation des réserves hydriques par des méthodes d'étuvage).

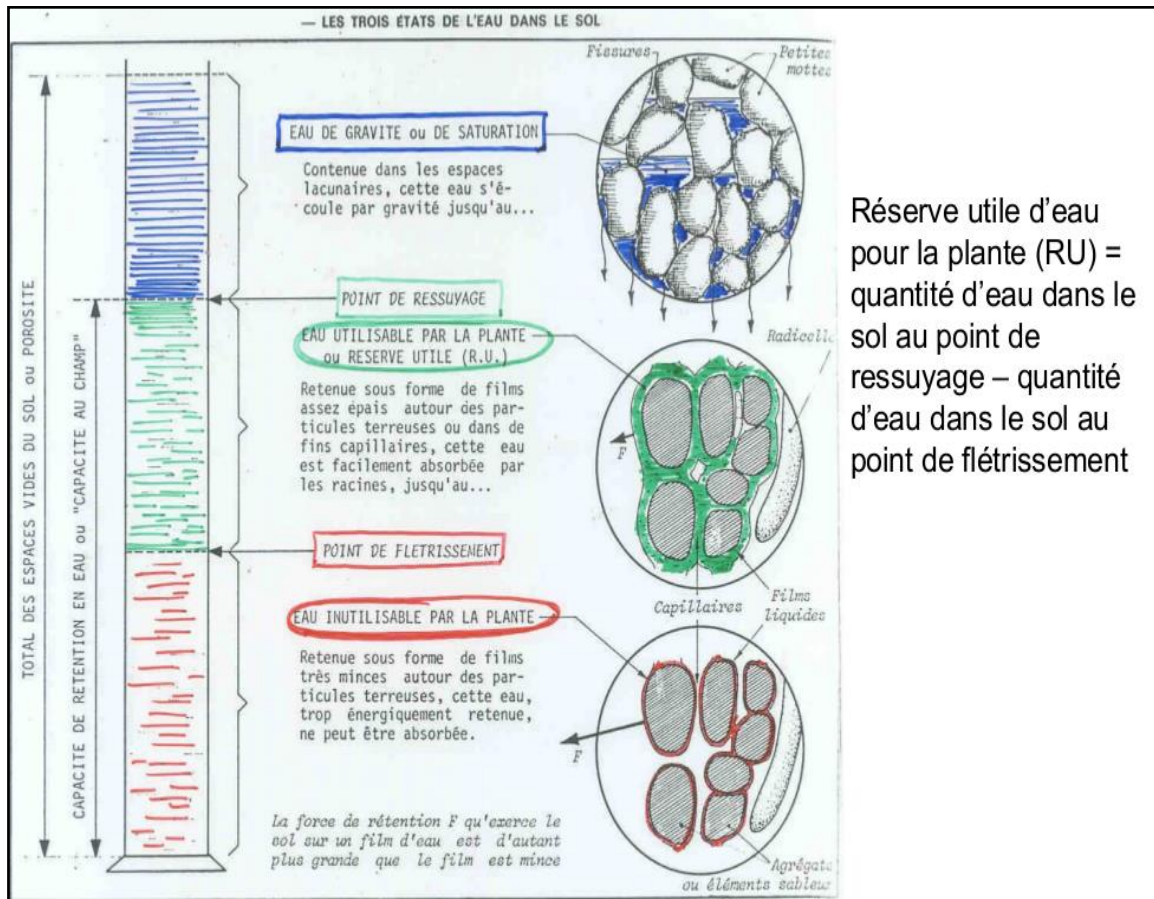


Figure 13. Les trois états de l'eau dans le sol.

5. L'aération du sol

Pour palier aux conditions atmosphériques. Des précipitations excessives suivies d'une période plus sèche, entraînent une compaction des sols à forte teneur en limon ou argile. Une croûte imperméable se forme parfois en surface et cette situation peut entraîner une formation de mousse et même une accumulation de chaume en surface. Les sols très compacts provoquent petit à petit, une situation d'anaérobie (manque d'oxygène), et une application d'engrais ou de pesticide ne donnera pas les résultats escomptés, puisque de telles conditions feront en sorte que l'engrais sera moins disponible pour les racines et certains pesticides seront désactivés. L'aération a pour but de briser cette couche compacte dans la zone des racines, et du même coup, d'oxygéner le sol pour permettre un épanouissement de ces dernières. Elle encourage l'activité des micro-organismes du sol qui accélèrent le processus de

décomposition de certains éléments fertilisants, les rendant ainsi sous une forme assimilable par la plante.

5. 1. Les avantages de l'aération du sol

En plus de réduire la compaction d'un sol, l'aération :

- Diminue la compaction du sol et en améliore la structure;
- Augmente les échanges d'oxygène et des autres gaz entre le sol et l'atmosphère;
- Accroît l'absorption de l'eau et en réduit le lessivage en augmentant son infiltration et sa rétention dans le sol;
- Aide à une meilleure absorption des éléments nutritifs par les plantes;
- Favorise l'enracinement du gazon;
- Diminue le stress durant les périodes de chaleur;
- Encourage la décomposition du chaume.

5. 2. Période idéale pour aérer

On peut penser que si l'aération est si bénéfique à une végétation, on peut la pratiquer à presque n'importe quel temps de l'année, en excluant bien sûr l'hiver. Mais il faut faire attention. Si une aération coïncide avec une sécheresse au mois de juillet, le sol étant plus aéré en surface, il aura tendance à se dessécher plus rapidement et le gazon jaunira. Normalement, on parle du printemps et du début de l'automne comme étant les deux périodes les plus propices à l'aération.

CHAPITRE III. LES ECOULEMENTS (NOTIONS HYDRODYNAMIQUES)

1. Introduction

Les écoulements représentent une partie essentielle du cycle hydrologique. On a déjà vu que l'eau précipitée sur un bassin versant va se répartir en eau interceptée, évaporée, infiltrée et écoulee. La quantité d'eau collectée puis transportée par la rivière résultera des précipitations directes à la surface même du cours d'eau et des écoulements de surface et souterrain parvenant à son exutoire. La proportion entre ces deux types d'écoulements est définie par la quantité d'eau infiltrée dans le sol. Les différents processus d'infiltration et d'écoulements participant à la génération de crue sont représentés de manière schématique dans la figure 14.

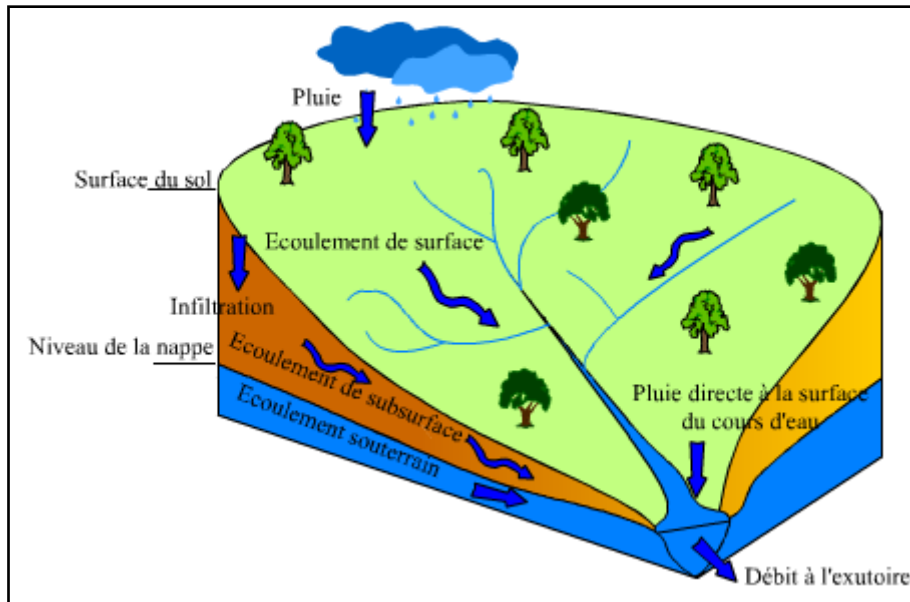


Figure 14. Processus d'infiltration dans le sol et multiplicités des écoulements

2. Généralités sur les écoulements

On distingue dans un premier temps deux grands types d'écoulements, à savoir : les **écoulements « rapides »** et par opposition, les **écoulements souterrains** qualifiés de « *lents* » qui représentent la part infiltrée de l'eau de pluie transitant lentement dans les nappes vers les exutoires. Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en écoulement de surface et écoulement de subsurface :

- **L'écoulement de surface** ou ruissellement est constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, soient prépondérants.
- **L'écoulement de subsurface** ou écoulement hypodermique comprend la contribution des horizons de surface partiellement ou totalement saturés en eau ou celle des nappes perchées temporairement au-dessus des horizons argileux. Ces éléments de subsurface ont une capacité de vidange plus lente que l'écoulement superficiel, mais plus rapide que l'écoulement différé des nappes profondes.

La figure 15 illustre ces différents types d'écoulements :

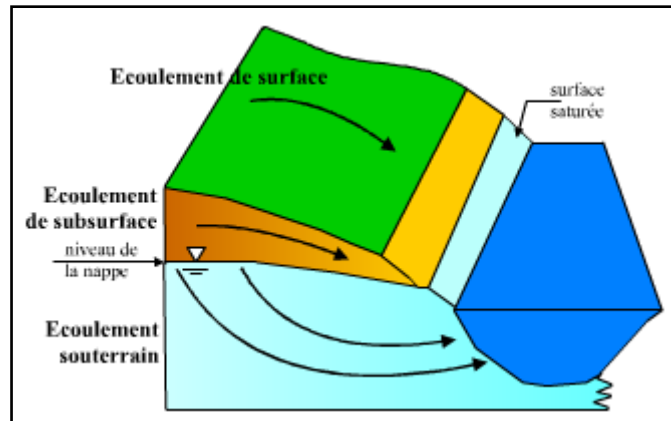


Figure 15. Les différents types d'écoulements.

A cet ensemble de processus peut encore s'ajouter l'écoulement dû à la fonte des neiges.

Les différentes composantes de l'écoulement dans le cas simple d'une averse uniforme dans le temps et dans l'espace, sont également représentées schématiquement dans la figure 16 suivante.

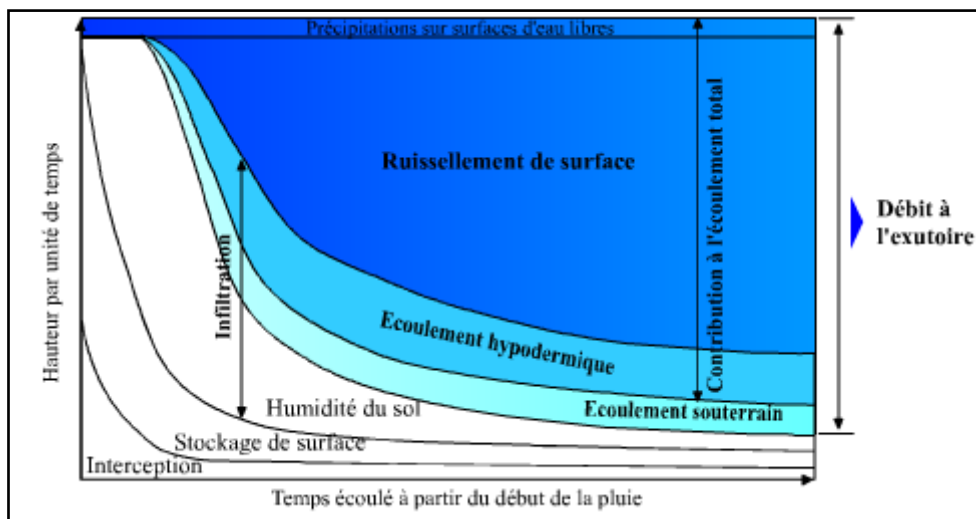


Figure 16. Répartition de la hauteur de précipitations au cours d'une averse d'intensité constante (d'après Réménieras, 1976).

Ces processus qui se produisent à des vitesses très différentes, mobilisent des eaux d'âge, d'origine et de cheminement très distincts, et permettent d'expliquer la plupart des comportements hydrologiques rencontrés sur les bassins versants, depuis les crues de « ruissellement pur » jusqu'aux crues où la contribution à l'écoulement final est essentiellement hypodermique ou phréatique.

Les éléments les plus importants dans la génération des crues sont finalement les écoulements de surface et de subsurface et les précipitations directes à la surface du cours d'eau, l'écoulement souterrain n'entrant que pour une faible part dans la composition du débit de crue (Figure 17).

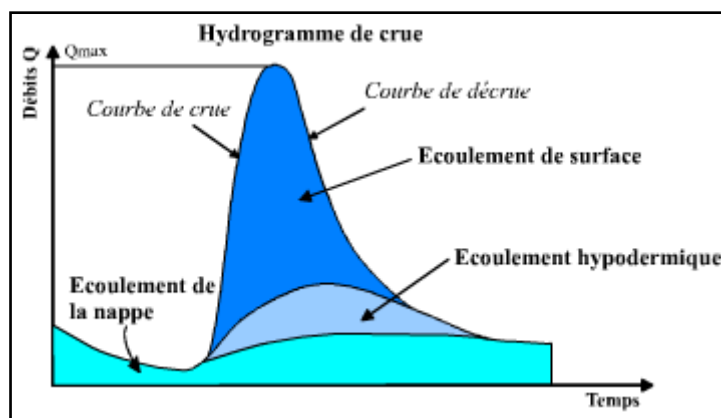


Figure 17. Découpage de différentes phase d'un hydrogramme de crue.

Rappelons que l'écoulement de surface ne peut pas être mesuré directement sur un versant, sauf dans le cas de très petites parcelles expérimentales équipées à cet effet. Généralement, on mesure indirectement cette composante des écoulements par l'évaluation des débits dans le réseau hydrographique.

2. 1. L'écoulement de surface

Après interception éventuelle par la végétation, il y a partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol :

- en eau qui s'infiltré et qui contribue, par un écoulement plus lent à travers les couches de sol, à la recharge de la nappe et au débit de base,
- et en ruissellement de surface dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol (elle-même variable, entre autre selon l'humidité du sol). Cet écoulement de surface, où l'excès d'eau s'écoule par gravité le long des pentes, forme l'essentiel de l'écoulement rapide de crue.

L'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol (écoulement Hortonien) est considéré comme pertinent pour expliquer la réponse hydrologique des bassins en climats semi-arides ainsi que lors de conditions de fortes intensités pluviométriques. Il est généralement admis que même des sols naturels présentant une conductivité hydraulique élevée en climats tempérés et humides peuvent avoir une capacité d'infiltration inférieure aux intensités maximales des précipitations enregistrées.

Cependant des crues sont fréquemment observées pour des pluies d'intensité inférieure à la capacité d'infiltration des sols. Dans ce cas, d'autres processus tel que **l'écoulement sur des surfaces saturées** en eau, permettent d'expliquer la formation des écoulements. Des zones de sol peuvent être saturées soit par contribution de l'eau de subsurface restituée par **exfiltration** (d'une nappe perchée par exemple), soit par contribution directe des précipitations tombant sur ces surfaces saturées.

Il existe ainsi deux modes principaux d'écoulement de surface qui peuvent se combiner (cf. chapitre 10) :

- l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration (écoulement Hortonien),
- l'écoulement sur surfaces saturées.

2. 2. L'écoulement de subsurface

Une partie des précipitations infiltrée chemine quasi horizontalement dans les couches supérieures du sol pour réapparaître à l'air libre, à la rencontre d'un chenal d'écoulement. Cette eau qui peut contribuer rapidement au gonflement de la crue est désignée sous le terme d'**écoulement de subsurface** (aussi appelé, dans le passé, écoulement hypodermique ou retardé). L'importance de la fraction du débit total qui emprunte la voie subsuperficielle dépend essentiellement de la structure du sol. La présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur favorise ce genre d'écoulement. Les caractéristiques du sol déterminent l'importance de l'écoulement hypodermique qui peut être important. Cet écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et à allonger la durée de l'hydrogramme.

2. 3. L'écoulement souterrain

Lorsque la zone d'aération du sol contient une humidité suffisante pour permettre la percolation profonde de l'eau, une fraction des précipitations atteint la *nappe phréatique*. L'importance de cet apport dépend de la structure et de la géologie du sous-sol ainsi que du volume d'eau précipité. L'eau va transiter à travers l'aquifère à une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau. Cet écoulement, en provenance de la nappe phréatique, est appelé écoulement de base ou écoulement souterrain. A cause des faibles vitesses de l'eau dans le sous-sol, l'écoulement de base n'intervient que pour une faible part dans l'écoulement de crue. De plus, il ne peut pas être toujours relié au même événement pluvieux que l'écoulement de surface et provient généralement des pluies antécédentes. L'écoulement de base assure en générale le débit des rivières en l'absence de précipitations et soutient les débits d'étiage (l'écoulement souterrain des régions karstiques fait exception à cette règle).

2. 4. Ecoulement dû à la fonte des neiges

L'écoulement par fonte de neige ou de glace domine en règle générale l'hydrologie des régions de montagne ainsi que celles des glaciers ou celles des climats tempérés froids. Le processus de fonte des neiges provoque la remontée des nappes ainsi que la saturation du sol. Selon les cas, il peut contribuer de manière significative à l'écoulement des eaux de surface. Une crue provoquée par la fonte des neiges dépendra : de l'équivalent en eau de la couverture neigeuse ; du taux et du régime de fonte et finalement des caractéristiques de la neige.

3. Bilan annuel des écoulements

L'écoulement total E_t représente la quantité d'eau qui s'écoule chaque année à l'exutoire d'un bassin versant considéré. L'écoulement est la somme des différents termes : écoulement superficiel E_s , écoulement hypodermique E_h et écoulement de base (ou écoulement souterrain) E_b qui résulte de la vidange des nappes. L'écoulement totale s'exprime ainsi :

$$E_t = E_s + E_k + E_p$$

Le bilan hydrologique d'un bassin versant est également caractérisé par trois coefficients essentiels :

- le **coefficient d'écoulement total** C_{et} , défini par le rapport entre les quantités d'eau écoulées et les quantités d'eau précipitées P :

$$C_{et} = \frac{E_t}{P}$$

- le **coefficient d'écoulement de surface** C_{es} , obtenu en calculant le rapport entre les quantités d'eau écoulées rapidement et les quantités d'eau précipitées :

$$C_{es} = \frac{E_s + E_k}{P}$$

- le **coefficient de ruissellement** C_r est défini par le rapport entre la quantité d'eau ruisselée (i.e. écoulée) à la surface du sol et celles des précipitations :

$$C_r = \frac{E_s}{P}$$

4. La mesure des débits

On appelle hydrométrie l'ensemble des techniques de mesures des différents paramètres caractérisant les écoulements dans les cours d'eau naturels ou artificiels et dans les conduites. Les deux variables principales qui caractérisent l'écoulement sont :

- La **cote de la surface d'eau libre**, notée H et exprimée en mètre. Sa mesure concerne la **limnimétrie**.
- Le **débit du cours d'eau**, noté Q et exprimé en m^3/s ou l/s , représentant le volume total d'eau qui s'écoule à travers une section droite du cours d'eau pendant l'unité de temps considérée. Sa mesure est du ressort de la **débitmétrie**.

Le niveau d'eau dans un canal est facilement observable, mais n'est représentatif que de la section d'observation et peut être soumis à des modifications dans le temps. Seule la variable débit reflète physiquement le comportement du bassin versant, et peut être interprétée dans le temps et l'espace. Généralement, on ne dispose pas d'une mesure directe et continue des débits mais d'un enregistrement des variations de la hauteur d'eau en une section donnée (station hydrométrique). On passe alors de la courbe des hauteurs d'eau en fonction du temps $H=f(t)$ (appelée limnigramme) à celle des débits $Q=f(t)$ (appelée hydrogramme) par l'établissement d'une **courbe de tarage** $Q=f(H)$ (Figure 18).

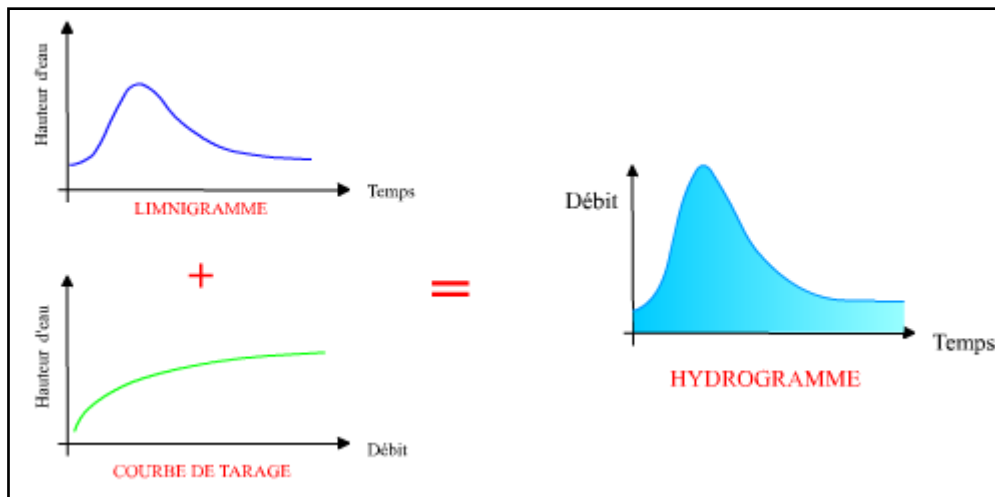


Figure 18. Passage d'un limnigramme à un hydrogramme par l'intermédiaire de la courbe de tarage.

La détermination de la courbe de tarage est généralement effectuée au moyen de campagnes de mesures de débits épisodiques, dont la fréquence est un élément essentiel de la qualité et de la précision des données ainsi obtenues. Le nombre de points nécessaire à l'établissement d'une courbe de tarage est de 10 minimum, répartis entre les basses et les hautes eaux. On appelle jaugeage l'ensemble des opérations destinées à mesurer le débit d'une rivière.

Il est nécessaire de procéder régulièrement à des vérifications de la courbe de tarage au cours du temps, pour tenir compte d'éventuelles déficiences de l'appareil de mesure ou modifications de la section du cours d'eau (voir figure 19).

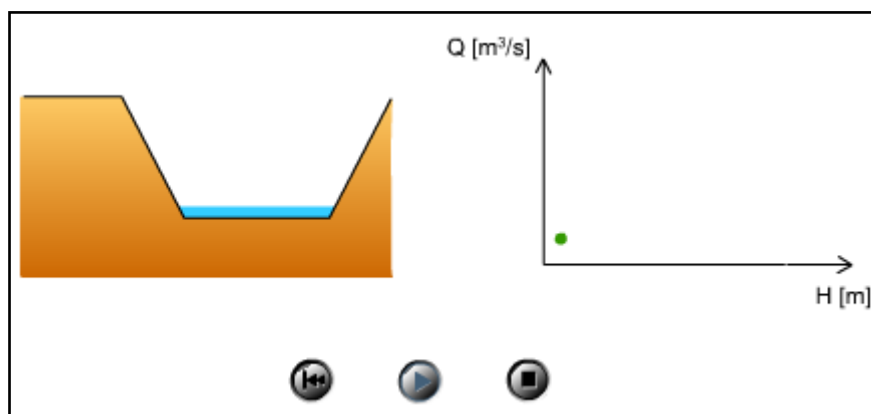


Figure 19. Courbe de tarage pour différentes sections d'un même cours d'eau.

4. 1. La mesure des hauteurs d'eau

La mesure des hauteurs d'eau (la limnimétrie) ou de la variation d'un plan d'eau s'effectue généralement de manière discontinue par la lecture d'une règle graduée (échelle limnimétrique) fixée sur un support. Pour connaître en continu les variations d'un plan d'eau, on utilise des limnigraphes qui fournissent sur un support un enregistrement continu des variations du niveau d'eau dans la rivière en fonction du temps (enregistrement graphique sur bande papier, enregistrement magnétique sur cassette, etc.).

4. 1. 1. Le limnimètre

Le limnimètre est l'élément de base des dispositifs de lecture et d'enregistrement du niveau de l'eau : il est constitué le plus souvent par une **échelle limnimétrique** (Figure 20) qui est une règle ou une tige graduée en métal (éventuellement en bois ou en pierre), placée verticalement ou inclinée, et permettant la lecture directe de la hauteur d'eau à la station. Si l'échelle est inclinée, la graduation est corrigée en fonction de l'angle d'inclinaison avec la verticale. La lecture de l'échelle limnimétrique se fait généralement au demi-centimètre près. Le zéro de l'échelle limnimétrique doit être placé au-dessous des plus basses eaux possibles dans les conditions de creusement maximum du lit dans la section de contrôle, et ce pour ne pas avoir de cotes négatives.



Figure 20. Echelles limnimétriques inclinée et verticale.

4. 1. 2. Le limnigraphe à flotteur

Le limnigraphe à flotteur est un appareil qui maintient un flotteur à la surface de l'eau grâce à un contrepoids, par l'intermédiaire d'un câble et d'une poulie. Le flotteur suit les fluctuations du niveau d'eau, qui sont reportées sur un graphe solidaire d'un tambour rotatif (à raison d'un tour par 24h ou par semaine ou par mois). La précision de la mesure est de 5 mm environ (Figure 21).

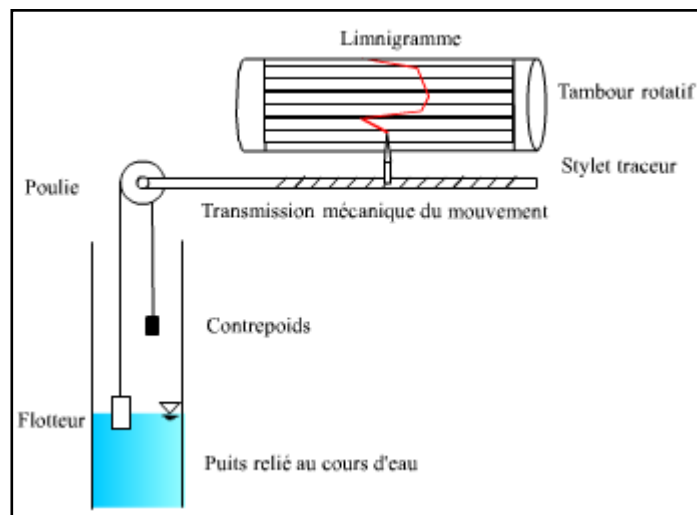


Figure 21. Schéma du limnigraphe à flotteur.

4. 1. 3. Le limnigraphe "bulle à bulle"

Le limnigraphe à pression ou "bulle à bulle", mesure les variations de pression causées par les changements de niveau d'eau. Cet appareil comprend une bonbonne de gaz comprimé, un dispositif de contrôle de pression et un tube immergé relié à la bonbonne. Un débit d'air constant sous pression est envoyé au fond de la rivière. Par un manomètre à mercure, on mesure la pression de l'air dans le tube qui est proportionnelle à la hauteur d'eau au-dessus de la prise installée dans la rivière (figure 22).



Figure 22. Limnigraphe pneumatique.

4. 2. La mesure des débits selon des différentes méthodes

Pour mesurer le débit d'un écoulement naturel (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe quatre grandes catégories de méthodes.

4. 2. 1. Les méthodes "volumétriques" (ou jaugeage capacitif) permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée. Compte tenu des aspects pratiques inhérents à la méthode de mesure (taille du récipient nécessaire, incertitude sur la mesure du temps, aménagement spécifique éventuel), cette méthode n'est généralement pratiquée que pour des débits très faibles, quelques l/s au plus.

4. 2. 1. Les méthodes "d'exploration du champ de vitesse" consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée. Ces techniques nécessitent un matériel spécifique (moulinet, perche, saumon, courantmètre...) et un personnel formé à son utilisation. Parmi les nombreuses méthodes d'exploration du champ de vitesse, les jaugeages au moulinet et au flotteur sont présentés ci-dessous, ainsi que le principe de fonctionnement des capteurs électromagnétiques.

4. 2. 1. Les méthodes "hydrauliques" tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...). Ces méthodes obéissent aux lois de l'hydraulique.

4. 2. 1. Les méthodes "physico-chimiques" prennent en compte les variations, lors de l'écoulement, de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous). Ces méthodes consistent généralement à injecter dans le cours d'eau un corps en solution, et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. Ce sont les méthodes dites «par **dilution**» ou encore «**chimique**».

Toutes ces méthodes de mesures des débits nécessitent généralement un régime d'écoulement en régime fluvial, sauf les jaugeages chimiques, qui sont appropriés en cas d'écoulement torrentiel.