

## Chapitre 2 : Le complexe physique du bassin versant

### Plan

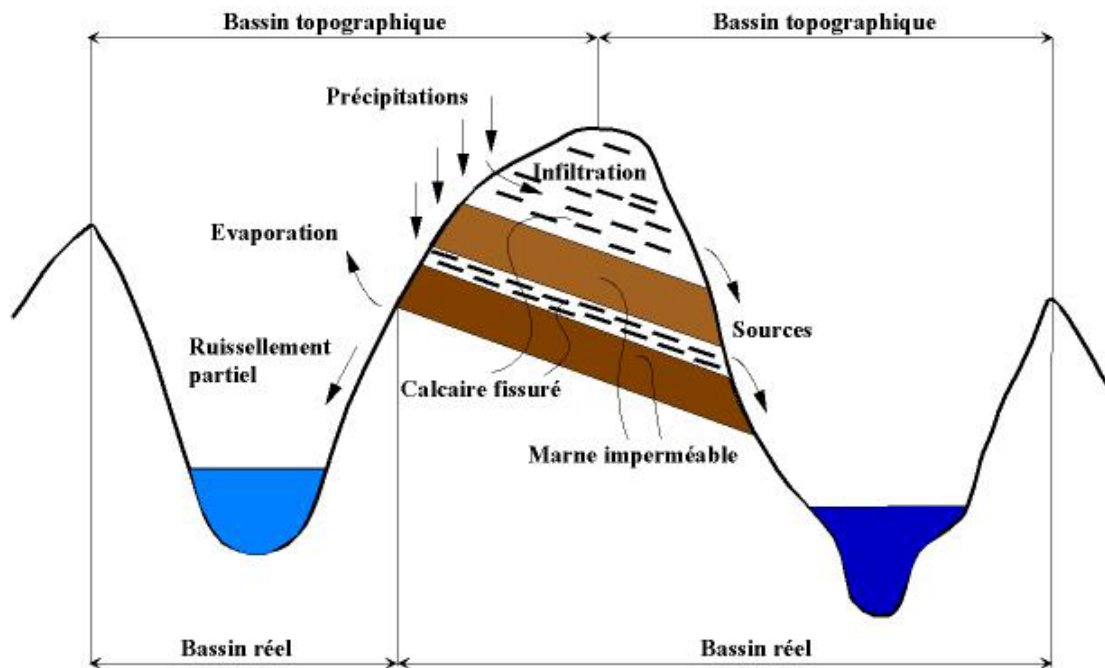
1. Définition et délimitation du bassin versant
2. Le comportement hydrologique
3. Caractéristiques physiographiques d'un bassin versant
  - 3.1. Les caractéristiques de forme et de relief
  - 3.2. Les caractéristiques du réseau hydrographique
  - 3.3. Les caractéristiques du sol et de son utilisation

### 1. Définition et délimitation du bassin versant

Considérons une section d'une rivière, on définit le bassin versant de cette rivière pour la section considérée comme la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents amont. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit traverser la section normale considérée pour poursuivre son trajet vers l'aval. Le bassin versant qui peut être considéré comme un " système " est une surface élémentaire 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.

Le bassin versant sera donc limité par des lignes de partage des eaux. S'il n'y a pas d'écoulement souterrains, en général, la ligne de partage correspond à la ligne de crêtes ; le cheminement de l'eau n'est déterminé que par la topographie. On parle alors de *bassin versant topographique*. Le bassin versant hydrologique est alors confondu avec le bassin versant topographique que l'on peut déterminer à partir d'une carte topographique. Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique.

Toutefois, la délimitation topographique nécessaire à la détermination en surface du bassin versant naturel n'est pas suffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines (fig.1). il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infilte puis sorte du bassin par le sous sol (ou inversement). Le bassin versant est alors différent du bassin versant délimité strictement par la topographie. La géologie du bassin est prise en considération pour sa délimitation. On parle dans ce cas de **bassin versant réel ou bassin versant hydrogéologique**.



**Figure 1 - Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique (D'après Roche - Hydrologie de surface, Ed. Gauthier-Villars, Paris 1963).**

Cette différence entre bassins réel et topographique est tout particulièrement importante en région karstique. 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, et notamment la surface drainée, peuvent être modifiées par la présence d'apports latéraux artificiels (réseaux d'eaux usées ou potables, drainages, routes, pompages ou dérivations artificielles modifiant le bilan hydrologique).

## 2. Le comportement hydrologique

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant (système hydrologique) s'effectue le plus souvent par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin face à une sollicitation (la précipitation). Cette réaction est mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système. La représentation graphique de l'évolution du débit  $Q$  en fonction du temps  $t$  constitue **un hydrogramme** de crue. La réaction du bassin versant peut également être représentée par **un limnigramme** qui n'est autre que la représentation de la hauteur d'eau mesurée en fonction du temps.

La réaction hydrologique d'un bassin versant à une sollicitation particulière est caractérisée par sa vitesse (temps de montée  $t_m$ , défini comme le temps qui s'écoule entre l'arrivée de la crue et le maximum de l'hydrogramme) et son intensité (débit de pointe  $Q_{max}$ , volume maximum  $V_{max}$ , etc.). Ces deux caractéristiques sont fonction du type et de l'intensité de la précipitation qui le sollicite mais aussi d'une variable caractérisant l'état du bassin versant : le **temps de concentration** des eaux sur le bassin.

La figure 2 présente un exemple d'hydrogramme de crue résultant d'un hyétogramme donné. Le hyétogramme est la courbe représentant l'intensité de la pluie en fonction du temps.

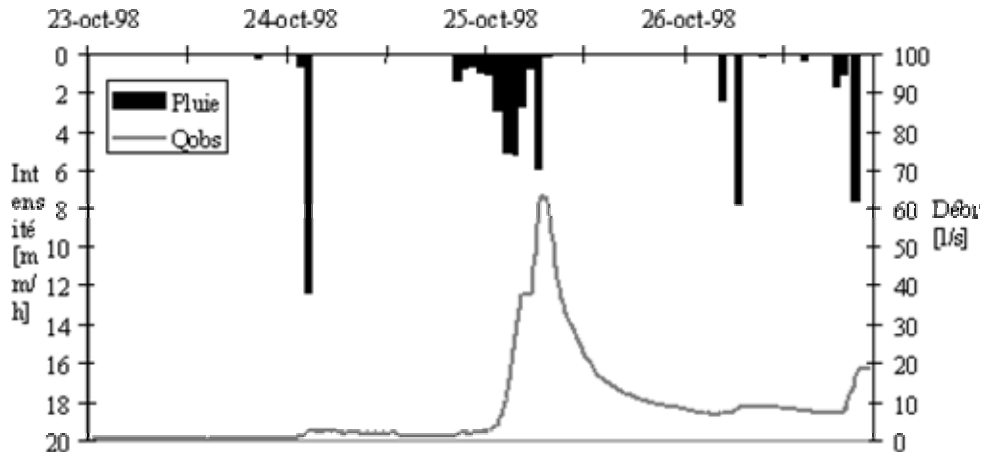


Figure 2- Exemple de réaction hydrologique pour un bassin versant .

Le temps de concentration  $t_c$  des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

Il est composé de trois termes différents :

- $t_h$  : Temps d'*humectation*. Temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.
- $t_r$  : Temps de *ruissellement* ou *d'écoulement*. Temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).
- $t_a$  : Temps d'*acheminement*. Temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration  $t_c$  est donc égal au maximum de la somme de ces trois termes, soit :

$$t_c = \max\left(\sum (t_h + t_r + t_a)\right)$$

Théoriquement on estime que  $t_c$  est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou estimé à l'aide de formules empiriques.

### 3. Caractéristiques physiographiques d'un bassin versant

Un bassin versant est caractérisé par des paramètres physiographiques qui peuvent être groupés en trois classes :

- les caractéristiques de forme et de relief
- les caractéristiques du réseau de drainage
- les caractéristiques du sol et de son utilisation.

Ces caractéristiques influencent le temps et la forme de la réponse du bassin vis à vis d'un événement pluvieux.

### 3.1. Les caractéristiques de forme et de relief :

#### a- La forme

La forme du bassin versant conditionne son comportement hydrologique (ruissellement). Elle peut être décrite par plusieurs indices qui caractérisent le milieu et permettent de comparer les bassins versants entre eux. Deux indices peuvent être cités :

**L'indice de Gravelius :** Il est définie comme étant le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même superficie. Il est appelé aussi coefficient de compacité.

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

P : périmètre du bassin (km) mesuré au curvimètre ;

A : aire du bassin (km<sup>2</sup>) mesurée au planimètre ou par les techniques de digitalisation.

Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

**L'indice de compacité de Horton :** il exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal.

$$K_H = \frac{A}{L^2}$$

A : aire du bassin (Km<sup>2</sup>)

L : longueur du cours d'eau principal (km)

L'indice est inférieur à 1 si la forme du bassin est allongée et supérieur à un si sa forme est ramassée.

#### b- Le relief

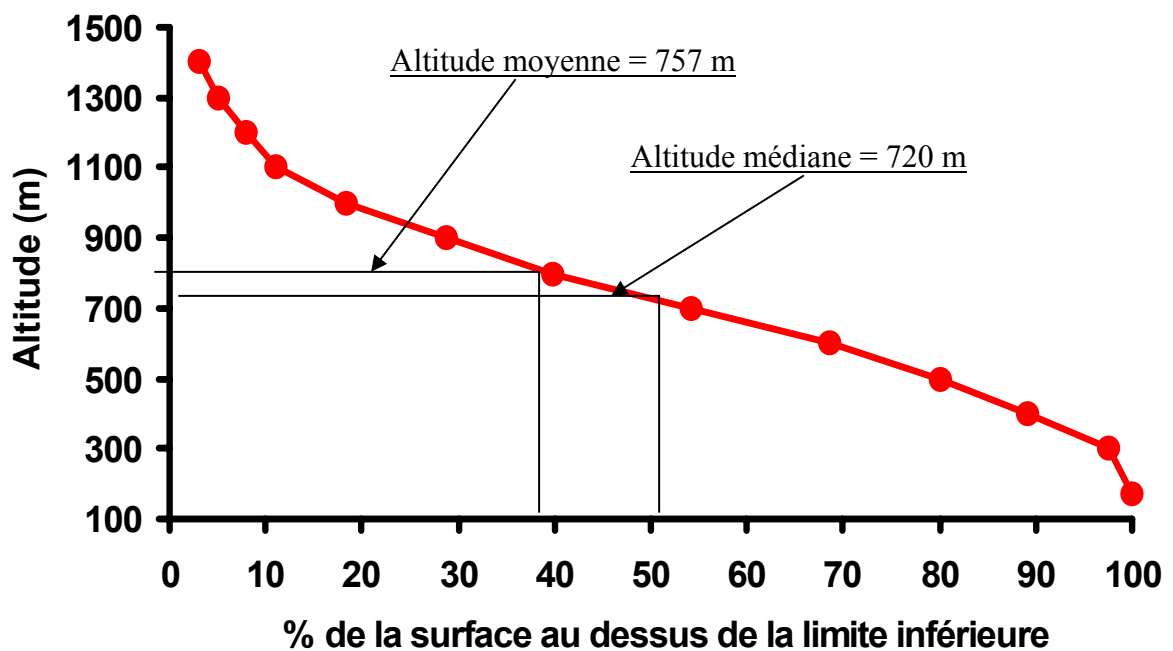
Le relief a une influence évidente sur les paramètres hydrométéorologiques (température, précipitation). IL est déterminé par les indices suivants :

##### - La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte 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.

**Tableau 1 : Répartition par tranche d'altitude de la surface du bassin du Loukkos**

Tranches d'altitudes	Surface km 2	Pourcentage	% de la surface au-dessus de la limite inférieure de la tranche d'altitude
170 - 300	500	2.41	100
300 - 400	1750	8.43	97.6
400 - 500	1900	9.16	89.16
500 - 600	2400	11.57	80.00
600 - 700	3000	14.46	68.6
700 - 800	2970	14.31	54.1
800 - 900	2270	10.94	39.8
900 - 1000	2180	10.51	28.8
1000 - 1100	1500	7.23	18.3
1100 - 1200	640	3.08	11.1
1200 - 1300	610	2.94	8
1300 - 1400	410	1.94	5
1400 - 1800	610	2.99	3



**Figure 3: Exemple de courbe hypsométrique (Loukkos)**

### - Les altitudes caractéristiques

De nombreux paramètres hydrométéorologiques (températures, précipitation) varient en fonction de l'altitude.

L'altitude maximale : C'est l'altitude la plus forte relevée au cours de la limitation du bassin (point culminant).

L'altitude minimale : Se situe à l'exutoire du bassin.

L'altitude moyenne : Elle se définit comme l'ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique et correspond au rapport de l'aire sous la courbe à la surface du bassin. Elle peut être estimée à partir de la relation suivante :

$$E = \frac{1}{A} \sum_i a_i \frac{(h_i + h_{i+1})}{2}$$

E : altitude moyenne en m ;

A : aire du bassin en km<sup>2</sup> ;

a<sub>i</sub> : aire comprise entre deux courbes de niveau consécutives i et i+1 (km<sup>2</sup>) ;

h<sub>i</sub> : altitude de la courbe de niveau i (m).

L'altitude médiane : Elle correspond au point d'abscisse 50% sur la courbe hypsométrique.

### - La pente moyenne du bassin

La pente moyenne est une caractéristique importante dans le ruissellement. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct et donc sur le temps de concentration  $t_c$ . Elle influence directement le débit de pointe lors d'une averse. La pente moyenne peut être estimée à partir **de la courbe hypsométrique**.

$$S = \frac{2E}{L}$$

E : altitude moyenne du bassin (m)

L : longueur du cours d'eau principal (km)

S est exprimée en %.

### - Le rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent permet de comparer le comportement hydrologique des bassins versants entre eux. Il s'agit d'une transformation géométrique qui assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même surface. Les courbes de niveau deviennent ainsi des droites parallèles aux petits côtés du rectangle. L'exutoire se situe à l'un de ses petits côtés.

Si  $L$  et  $l$  représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, alors :

Le périmètre du rectangle équivalent vaut :  $P = 2.(L + l)$

la surface :  $A = Ll$

le coefficient de compacité :  $K_G = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$

En combinant ces trois relations, on obtient :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \quad \text{si } K_G \geq 1.12$$

si  $K_G \leq 1.12$ , le bassin a une forme circulaire et la transformation géométrique en rectangle équivalent n'est plus réalisable, le bassin sera assimilé à un carré.

### - Les indices de pente d'un bassin

Le calcul de la pente moyenne du bassin tient compte de la dénivellation et de la longueur L, mais non de la position relative des différentes courbes de niveau. Le temps et l'amplitude du ruissellement dans les bassins sont très influencés par la répartition de la superficie en fonction du relief. C'est pour cela que les hydrologues calculent d'autres indices de pentes pour mieux analyser le ruissellement dans un bassin donné.

**Indice de pente global :** l'indice de pente classique consiste à rapporter l'altitude entre les deux points extrêmes à la longueur du bassin définie par la longueur du rectangle équivalent. Soit :

$$I = \frac{(H_{\max} - H_{\min})}{L_{eq}}$$

Cependant et pour éviter les valeurs extrêmes, L'IRD a proposé la définition d'un indice de pente global :

$$I_g = \frac{(H_5 - H_{95})}{L_{eq}}$$

$H_5$  : altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin ;  
 $H_{95}$  : altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin.

**Indice de pente de Roche :** il se calcule par la formule :

$$I_r = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}}} \sum_i^n \sqrt{a_i d_i}$$

$a_i$  : pourcentage de la superficie totale comprise entre 2 tranches d'altitude  $h_i$  et  $h_{i+1}$

$d_i$  : dénivelée entre deux altitudes successives  $d_i = h_{i+1} - h_i$

$n$  : nombre de courbe de niveau.

L'indice de pente de roche est donc la somme des racines carrées des pentes moyennes de chaque élément partiel compris entre deux courbes de niveau, pondéré par la surface partielle qui lui est associée.

### 3.2. Les caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique (ou réseau de drainage) se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. L'intensité et la répartition du ruissellement sont fonction de la longueur et de la densité du réseau hydrographique. Ce dernier peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux.

**La géologie** : par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. La structure de la roche, sa forme, les failles, les plissements, forcent le courant à changer de direction.

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

**La pente du terrain**, 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.

**La présence humaine** : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

Afin de caractériser le réseau hydrographique, il est souvent utile de reporter son tracé en plan sur une carte à une échelle adéquate. L'utilisation de photographies analogiques ou numériques est utile à cette identification. Divers paramètres descriptifs sont utilisés pour définir le réseau hydrographique :

#### a- Ordre du cours d'eau :

Le réseau de drainage se compose d'un cours d'eau principal et d'une série de tributaires alimentant le cours d'eau principal. Ce sont les affluents secondaires, tertiaires...

L'ordre d'un cours d'eau est une classification qui reflète la ramification du réseau. Il existe plusieurs types de classifications des tronçons des cours d'eau, dont la classification de Strahler (1957) qui est la plus utilisée. Cette classification permet de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage d'un bassin de l'amont vers l'aval. Elle se base sur les règles suivantes :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.



- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.

- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre  $x$  est d'ordre  $x+1$ .

L'ordre des cours d'eau est donc une classification qui reflète la ramification du cours d'eau.

Pour déterminer l'ordre des cours d'eau il faut disposer d'un tracé en plan du réseau de drainage.

Un bassin versant a l'ordre du plus élevé de ses cours d'eau, soit l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire.

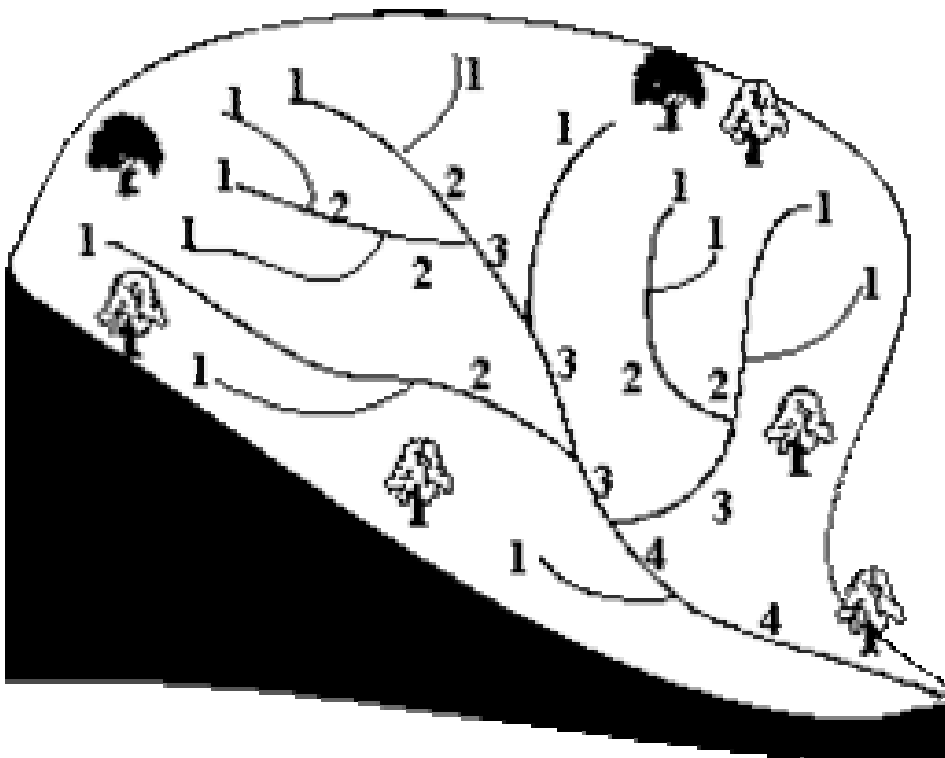


Figure 4 : réseau de drainage d'un bassin versant d'ordre 4 :

#### b- Le Degré de développement du réseau

##### - La densité de drainage

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A}$$

$D_d$  : densité de drainage [ $\text{km}/\text{km}^2$ ] ;

$L_i$  : longueur totale de tous les cours d'eau d'ordre  $i$  [ $\text{km}$ ] ;

$A$  : surface du bassin versant [ $\text{km}^2$ ].

En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé ; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage,  $C=1/D_d$ , s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ». Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau).

### - La densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{A}$$

$F$  : densité hydrographique [ $\text{km}^{-2}$ ] ;

$N_i$  : nombre de cours d'eau ;

$A$  : superficie du bassin [ $\text{km}^2$ ].

Il existe une relation assez stable entre la densité de drainage  $D_d$  et la densité hydrographique  $F$ , de la forme :

$$F = aD_d^2$$

Où  $a$  est un coefficient d'ajustement.

En somme, les régions à haute densité de drainage et à haute densité hydrographique présentent en général une roche mère imperméable, un couvert végétal restreint et un relief montagneux. L'opposé, c'est-à-dire faible densité de drainage et faible densité hydrographique, se rencontre en région à substratum très perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué.

### - Le rapport de confluence

Le rapport de confluence est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage. C'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre.

$$R_c = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_i}{N_{i+1}}$$

$N_i$  : le nombre de tronçons de cours d'eau d'ordre  $i$

$n$  : l'ordre total.

Le rapport de confluence est plus élevé pour un bassin de forme plus allongée.

### - Profil en long et profil en travers du cours d'eau :

Le profil en long est représenté par une coupe longitudinale du cours d'eau suivant l'axe de l'écoulement. Sur un diagramme réduit à une échelle convenable on reporte les points (xi, hi) avec xi la distance d'un point i à l'exutoire et hi l'altitude du fond du lit au point i.

les pentes de l'écoulement ainsi que la pente moyenne du cours d'eau principal sont déterminées à partir de son profil en long.

Dans la représentation du profil en long, des ruptures de pentes peuvent être mises en relief. Ce sont des accidents topographiques. Leur connaissance est particulièrement importante pour l'établissement des aménagements hydrauliques.

Le profil en travers représente un levé de la section transversale de l'écoulement en un point donné du cours d'eau. Les profils en travers des rivières permettent de mettre en relief l'existence d'un lit mineur d'écoulement et d'un lit majeur correspondant au champ d'inondation.

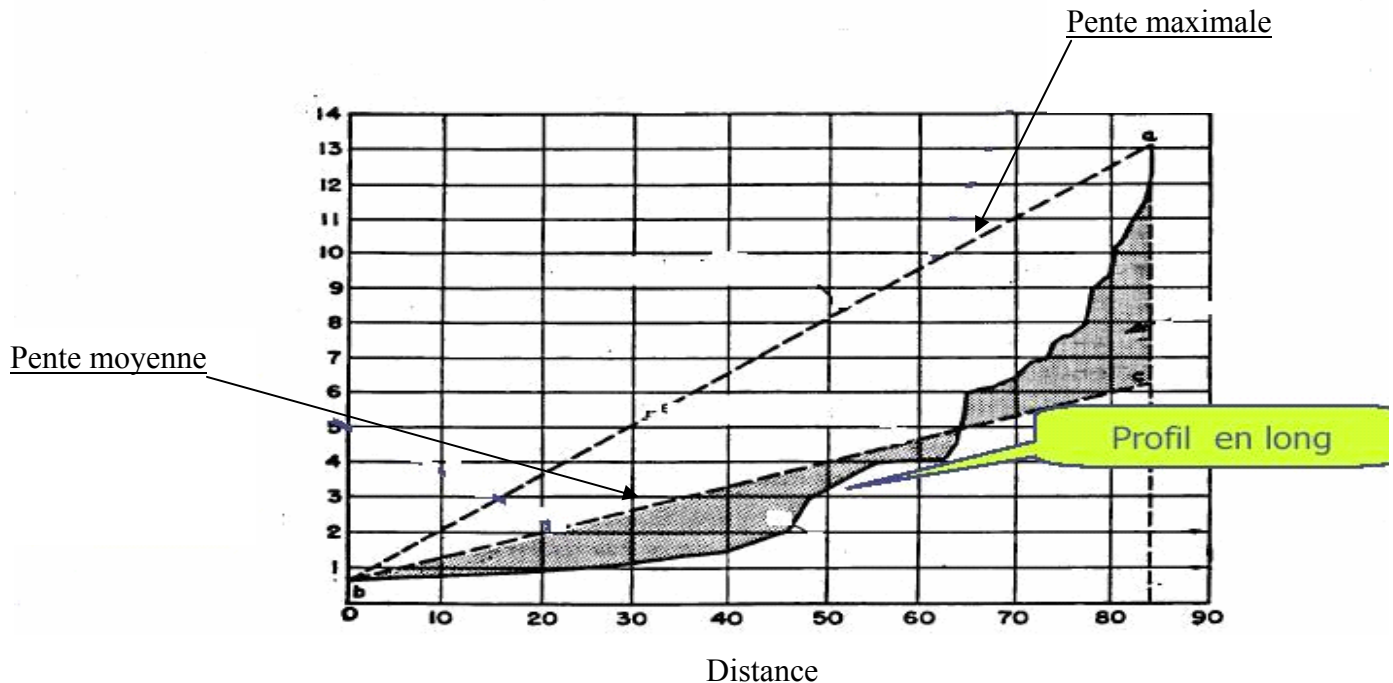


Figure 5 : Exemple de profil en long

### - La pente moyenne du cours d'eau principal

Elle détermine la vitesse avec laquelle l'eau va s'écouler et se rend donc à l'exutoire. Parmi les méthodes utilisées pour le calcul de la pente moyenne, on cite :

- Calcul du rapport entre la dénivellation maximale du cours d'eau et sa longueur total

$$P_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

$H_{max}$  et  $H_{min}$  sont respectivement les altitudes extrêmes relevées sur le cours d'eau.

L longueur du cours d'eau

- Méthode de Taylor et Schwartz : elle se base sur une pondération des pentes individuelles des différents segments du cours d'eau :

$$P_{moy} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{P_i}}{n} \right)^2$$

P= pente moyenne du cours d'eau principale

$p_i$  = pente moyenne d'ordre i

n = ordre du bassin

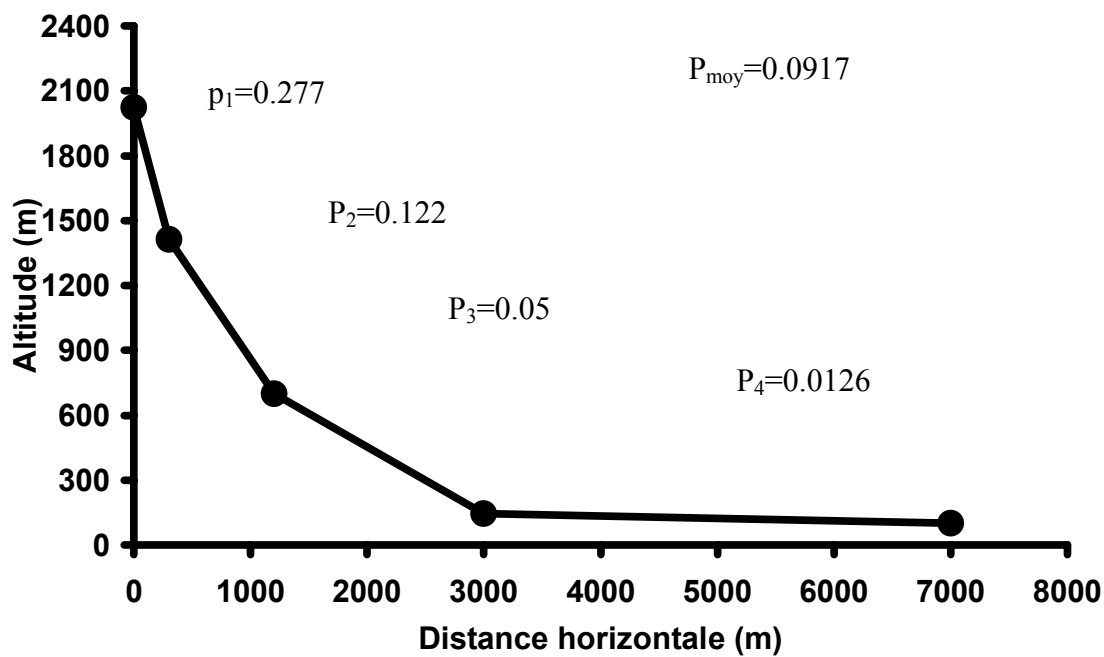


Figure 6 : Profil en long montrant la différence des pentes moyennes pour chaque segment de différent ordre (1 à 4)

### - Longueurs caractéristiques d'un bassin versant :

Un bassin versant est caractérisé par deux longueurs :

- la longueur du cours d'eau principal (L)
- la longueur du bassin versant depuis le centre de gravité jusqu'à l'exutoire (LCA)

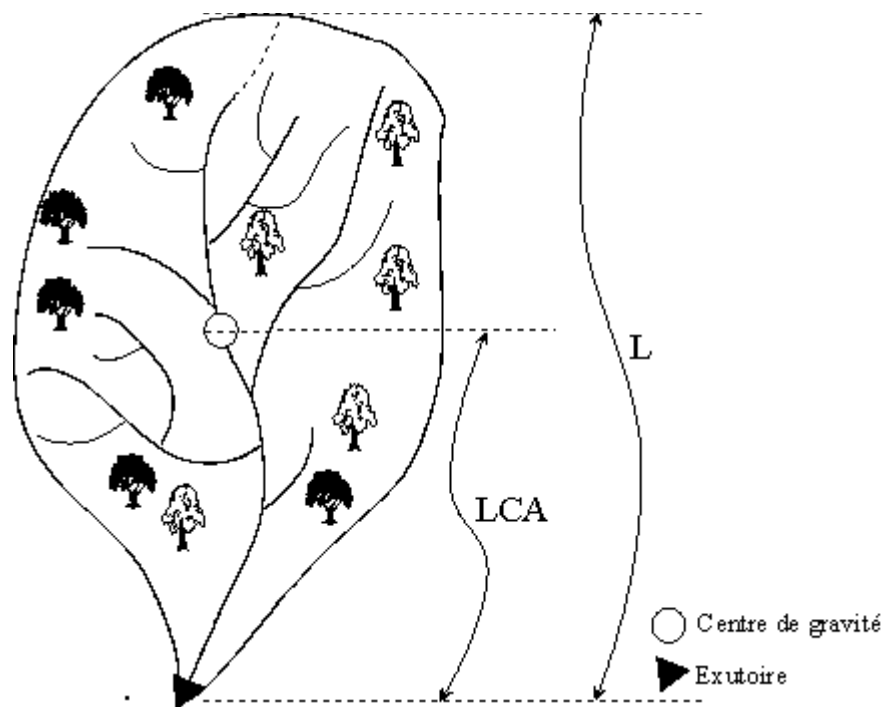


Figure 7 : Longueurs caractéristiques d'un bassin versant

### 3.3. Les caractéristiques du sol et de son occupation :

Le type de sol, le couvert végétal et l'occupation des terres jouent un rôle très important dans la réponse hydrologique d'un bassin versant à une sollicitation donnée (précipitation).

#### a- La nature du sol :

La nature du sol a une influence sur le régime d'écoulement. En effet, le taux d'infiltration, le taux d'humidité, la capacité de rétention, les pertes initiales, le coefficient de ruissellement ( $C_r$ ) sont fonction du type de sol et de son épaisseur. Les terrains perméables tels que les sables favorisent l'infiltration au détriment du ruissellement. La perméabilité des sols représente donc un facteur modérateur des crues.

#### b- Le couvert végétal

Le couvert végétal retient selon sa densité, sa nature et l'importance de la précipitation, une partie de l'eau atmosphérique. Cette eau interceptée est soustraite à l'écoulement de surface.

Les forêts par exemple jouent un rôle régulateur des crues et diminuent l'érosion. Elle limitent le ruissellement en offrant une plus grande rugosité à l'écoulement des eaux.

### **c- L'occupation des terres**

Elle est liée à l'activité humaine agricole ou urbaine. Selon la nature de l'intervention, l'homme peut limiter l'érosion (en plantant des arbres, des haies...) ou au contraire favoriser le ruissellement (en imperméabilisant des surfaces par exemples).