

EXTRAIT DU PROCES VERBAL DE LA REUNION DU CONSEIL SCIENTIFIQUE  
DE L'INSTITUT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

24 Février 2022

L'an deux mille vingt deux, le vingt quatre février à 10h se sont réunis les membres du Conseil Scientifique de l'Institut des Sciences et de la Technologie dont les noms suivent:

- **M. HOUARI Ahmed** : *Président du Conseil Scientifique ST* ;
- **M. ZENASNI Hocine** : *Directeur de l'Institut des Sciences et de la Technologie* ;
- **Mme. BELARBI Halima** : *Cheffe du département d'hydraulique* ;
- **M. BELMOKHTAR Azzedine** : *Directeur-Adjoint des Etudes de l'Institut des Sciences et de la Technologie* ;
- **Mme AINSEBA Nabila** : *Directrice-Adjointe des Relations Extérieures de l'Institut des Sciences et de la Technologie* ;
- **Mme. BEKRI Yamina** : *Responsable de domaine ST*
- **Mme. SARI Aouatef** : *Représentante du corps Maître de Conférences au Conseil Scientifique de l'Institut* ;
- **Mme. BENMANSOUR Khadidja** : *Représentante du corps Maître de Conférences au Conseil Scientifique de l'Institut* ;
- **M. KAZI-TANI Hychem** : *Représentant du corps Maître de Conférences au Conseil Scientifique de l'Institut* ;
- **Mme. GHERISSI Radia** : *Représentante du corps Maître de Conférences au Conseil Scientifique de l'Institut* ;
- **M. ZEGNOUNI Aymen** : *Représentant du corps Maître-Assistant au Conseil Scientifique de l'Institut* ;
- **M. GAOUR Imad** : *Représentant du corps Maître-Assistant au Conseil Scientifique de l'Institut* ;

**Etaient absents :**

- **Mme. SETTOUTI Nadéra** : *Représentante du corps Maître de Conférences au Conseil Scientifique de l'Institut (excusée)* ;
- **Mme. NEHARI Meriem** : *Responsable de la bibliothèque ST (excusée)* ;



**Ordre du jour:**

L'ordre du jour préétabli est le suivant:

1. Validation des canevas de licences académiques et professionnelles ;
2. Dépôt des photocopiés pédagogiques pour expertise;
3. Confirmation des rapports d'expertise des photocopiés pédagogiques
4. Divers.

**3. Confirmation des rapports d'expertise des photocopiés pédagogiques :**

Quatre (04) photocopiés pédagogiques déposés auparavant auprès du Conseil Scientifique pour expertise ont reçu tous des **rapports favorables pour leur publication**. Après examen des rapports d'expertise par le Conseil Scientifique, ce dernier a **confirmé les avis favorables accordés par les experts pour chaque photocopié expertisé**. La fiche signalétique des photocopiés en question est la suivante :

N°	Intitulé	Spécialité	Auteur
1	Travaux Pratiques : Traitement et Epuration des eaux	Hydraulique Urbaine	Dr. REKKAB Afaf
2	Travaux Pratiques : résistance des matériaux	Mécanique	Dr. FODIL Med Amine
3	Aménagement Hydraulique	Hydraulique Urbaine	Dr. REZAGUI Djihed
4	Mécanique du point : cours et exercices corrigés	Physique	Dr. SARI Aoutef

*L'ensemble des enseignants (es) ont été remerciés (es) pour leur présence et leur contribution. La séance fut levée à 12h30*

**Signé :**

Président du Conseil Scientifique IST

Dr. Souari Achmed  
Président du Conseil Scientifique  
المعهد الجامعي للتكنولوجيا  
الجلس العلمي  
للمعهد

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

المركز الجامعي مغنية  
Centre Universitaire – Maghnia-  
معهد العلوم و التكنولوجيا

Institut des Sciences et de la Technologie  
Département d'Hydraulique



Polycopié

Cours : Aménagements hydrauliques

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Destiné aux étudiants de 3ème Année Licence Hydraulique



Présenté par : Dr. REZAGUI Djihad

Année Universitaire : 2020/2021

## Table des matières

<i>Chapitre 1. Objectifs des aménagements hydrauliques</i> .....	<i>1</i>
I.1. Introduction .....	1
I.2. Définitions .....	1
I.3. Les objectifs des aménagements hydrauliques .....	2
I.4. Classifications des aménagements .....	2
I.5. Changement de l'aménagement avec le temps .....	5
I.6. Hauteur du barrage .....	6
<i>Chapitre 2. Hydrographie</i> .....	<i>7</i>
II.1. Le réseau hydrographique .....	7
II.2. Qu'est-ce qu'un cours d'eau ? .....	7
II.3. Les différents types des cours d'eau .....	8
II.4. Vue transversale du cours d'eau .....	9
II.4.1. Lit .....	9
II.4.2. Aval et amont .....	10
II.4.3. Rive gauche et rive droite .....	10
II.4.4. La berge .....	11
II.5. Les caractéristiques des cours d'eau .....	11
<i>Chapitre 3. Ouvrages de protection contre l'érosion</i> .....	<i>16</i>
1. Définitions .....	16
2. Les facteurs de l'érosion .....	17
2.1. Facteurs climatiques .....	17
2.2. Facteurs Topographiques .....	18
2.3. Facteurs géologique et pédologiques .....	18
2.4. Couvert végétal .....	19
3. Conséquence d'érosion .....	19
3.1. Milieux naturels .....	19
3.2. Pertes agronomiques .....	19
3.3. Dégâts sur biens publics et privés .....	19
3.5. L'augmentation des crues des rivières .....	19
4. Protection contre les érosions du lit .....	19
5. Stabilisation des lits contre l'érosion .....	20
6. Protection des rives (berges) .....	22
5. Lutte contre l'érosion .....	37

Conclusion .....	38
<b>Chapitre 4. Ecoulement à travers les déversoirs.....</b>	<b>39</b>
IV.1. Introduction .....	39
IV.2. Définition.....	39
IV.3. Différents types de déversoir .....	40
IV.3.1 Selon les dimensions des seuils .....	43
IV.3.2. Selon la forme de l'ouverture .....	44
IV.3.3 Selon les contractions .....	45
IV.4. Equations des déversoirs.....	47
IV.4.1. Equations des déversoirs à paroi mince.....	47
IV.4.2. Equations des déversoirs à seuil épais .....	57
<b>Chapitre 5. Ouvrages de protection contre les crues.....</b>	<b>60</b>
V.1. Introduction.....	60
V.2. Définition .....	60
V.3. Éléments descriptifs d'une crue.....	61
V.4. Principaux paramètres nécessaires pour évaluer la catastrophe .....	61
V.5. Mécanismes de l'inondation .....	62
V.6. Type d'inondations .....	62
V.6.1 Les inondations par crues torrentielles .....	62
V.6.2 Les inondations par débordement directe .....	63
V.6.3 Les inondations par accumulation d'eau ruisselée .....	63
V.6.4 Les inondations par rupture d'un ouvrage artificiel hydraulique .....	63
V.6.5 Les inondations par submersion marine.....	64
V.7. Procédés de protection des agglomérations contre les inondations .....	64
V.8. Principes régissant la protection moderne contre les crues.....	65
V.9. Conclusion .....	66
Références bibliographiques .....	

## ***Chapitre 1. Objectifs des aménagements hydrauliques***

### **I.1. Introduction**

Dans le temps passé l'aménagement hydraulique était traité comme une solution à un problème spécifique et ponctuel. Il s'est avéré que des aménagements répondant à certains problèmes particuliers conduisaient souvent à des situations conflictuelles, du fait que leur impact économique était loin de l'optimum et, dans certains cas, franchement désastreux.

Au profil des années et à l'heure actuelle les tendances les plus évidentes en matière d'aménagement des ressources en eau est l'élargissement progressif de leurs objectifs. Concernant par exemple l'irrigation ou la production hydroélectrique. Avec l'augmentation du nombre de projets et l'accroissement de leur taille.

### **I.2. Définitions**

- Un aménagement hydraulique est le résultat d'une modification de l'organisation de l'espace qui joue un rôle majeur dans la dynamique économique.
- Les aménagements hydrauliques sont ce qui touchent le secteur hydraulique et concernent en particulier les ressources en eau de surface.
- Un aménagement hydraulique est une construction d'ouvrages hydrauliques, dans un espace environnemental (comprenant l'eau, le sol et la flore et la faune) qui permettent de mobiliser et exploiter la source d'eau (en surface ou souterraine) ou la restaurer et la protéger, si elle existe déjà.
- Avec le temps, les projets d'aménagement hydraulique s'imposent de plus en plus, notamment suite en deux raisons suivantes :
  - 1) Le changement climatique qui a induit des situations météorologiques externes aggravées, d'où les cours d'eau sont sujets à des travaux importants d'aménagement).
  - 2) L'espace laissé aux réseaux hydrographique a fortement diminué, en raison de l'installation des populations et leurs infrastructures à proximité des cours d'eau d'où débordement des rivières.
- Un ouvrage hydraulique est un ouvrage permettant la gestion d'un écoulement. Ce peut être un simple dispositif permettant à un cours d'eau de s'écouler sous une voie ferrée ou routière ou un ouvrage plus complexe ayant un autre but.

Selon leur fonction, des types d'ouvrages peuvent être distingués : seuil hydraulique, prise

d'eau, ouvrages d'adduction ou de stockage : réservoir d'eau, barrage, écrêteur de crue; d'exploitation ; de soutien d'étiage ; de fuite ; de restitution de protection : digue, etc.

### **I.3. Les objectifs des aménagements hydrauliques**

Un aménagement hydraulique participe à la protection d'une zone protégée contre les inondations ou les submersions, mais comprend des ouvrages qui ne protègent pas directement la zone protégée parcequ'ils sont situés en amont de cette zone (parfois à plusieurs dizaines de kilomètres) : il s'agit principalement d'ouvrages hydrauliques de rétention d'une partie des crues, comme les barrages, ou les digues de protection contre les inondations ou contre les submersions.

Ce sont aussi tous les infrastructures hydrotechniques qui permettent d'entretenir et gérer ressource en eau pour son utilisation rationnelle. Assurent également :

- La restauration du site de la ressource et facilitent l'écoulement de l'eau et les dérivations.
- La mobilisation des eaux souterraines et de surface.
- Le transfert de l'eau d'une zone vers une autre
- Le transport et distribution de l'eau.
- Le control et gestion des volumes d'eaux transités et écoulés.

La maîtrise et la régularisation des ressources en eau répondent à des objectifs très variés :

- 1)-L'alimentation en eau des villes et des industries,
- 2)-l'irrigation,
- 3)-l'amélioration de la navigation
- 4)- la production d'énergie hydroélectrique,
- 5)-l'atténuation des crues,
- 6)- le drainage des terres.

### **I.4. Classifications des aménagements**

La pollution est un obstacle à l'utilisation de l'eau à des fins municipales, agricoles et industrielles et diminue sérieusement sa valeur qualitative sur le plan des loisirs et de l'esthétique pour les lacs et les cours d'eau : la maîtrise de la qualité de l'eau est donc un objectif important dans nombre de projets d'aménagement.

Dans les projets modernes d'aménagement des eaux, on s'efforce de satisfaire en

même temps plusieurs de ces objectifs, car de tels aménagements à buts multiples tendent justement vers une meilleure justification socio-économique.

#### **I.4.1. Selon le site d'étude**

Un système de classification des aménagements hydrauliques se distingue d'une part :

A)- les aménagements simples (un seul site) : qui se limitent à un seul site pour répondre à des demandes sur une surface limitée.

B)- des aménagements complexes (plusieurs sites) : qui porte sur plusieurs sites, donc un espace plus grand pour réaliser un schéma à plus large vue.

#### **I.4.2. Selon la désignation**

A) Aménagement a but unique et multiple

1)-aménagement a but unique, projet limite a un seul but, sont conçus pour répondre à des demandes sur une surface limitée ;

2)- l'aménagement à but multiple comportant plusieurs but et plusieurs sites sont plus largement répartis dans l'espace.

Les deux notions étant évidemment distinctes.

Le Tableau ci-dessous, présente les relations qu'on peut établir entre les objectifs des aménagements, leur destination et les dispositions structurales qu'on met en général en œuvre pour les satisfaire. Le tableau montre que les mêmes dispositions structurales peuvent répondre en même temps à différents objectifs et illustre les idées sous-jacentes à tout aménagement à buts multiples.



Tableau 1.1. Les aménagements hydrauliques, objectifs et les dispositifs structuraux

Thème	Objectifs	Dispositifs structuraux
Contrôle des crues	Prévention ou réduction des dommages causés par les crues, protection des vies humaines et du développement économique	Barrages, réservoirs, endiguements, murs de protection, amélioration des Chenaux, déchargeurs, stations de pompage, systèmes d'alerte, dérivations et autres dispositifs permettant de retarder l'écoulement
Production hydroélectrique	Fourniture d'électricité pour le développement économique et l'élévation du niveau de vie	Barrages, réservoirs d'accumulation, usines hydroélectriques
Approvisionnement municipal et industriel	Fourniture d'eau pour les usages municipaux et industriels	Barrages, réservoirs, puits, conduites, usines de pompage, prises d'eau, usines de traitement des eaux, désalinisation de l'eau, réseaux de distribution
Irrigation	Accroissement et régularisation de la production agricole	Barrages, réservoirs, puits, canaux, stations de pompage, contrôle de l'enherbement et dessableurs, réseaux de distribution
Drainage	Accroissement et régularisation de la production agricole, aménagement urbain, protection de la santé	Digues, drains en terre cuite, stations de pompage, collecteurs
Navigation	Transport des marchandises et des passagers	Barrages, canaux, écluses, améliorations du lit, travaux portuaire
Contrôle de la qualité de l'eau	Protection ou amélioration de l'approvisionnement en eau pour des usages municipaux, industriels et agricoles, protection de la pêche, et de la Vie aquatique, développement de la pêche commerciale	Installations de traitement des eaux, Réservoirs pour le soutien des basses eaux, réseaux de drainage des eaux usées

Loisirs	Mise en valeur des possibilités de loisirs et de sport	Réservoirs, installations pour les loisirs, ouvrages pour le contrôle de la pollution
Amélioration des conditions d'existence des poissons et de la faune aquatique	Améliorations du gîte des poissons et de la faune aquatique, réduction ou prévention des pertes en poissons et en faune aquatique, conséquences des activités humaines, dispositions pour l'expansion de la pêche commerciale	Aleviniers, échelles et grilles à poissons, réservoirs, ouvrages pour le contrôle de la pollution
Contrôle du transport solide	Réduction et contrôle de la charge en suspension dans les cours d'eau et protection des réservoirs	Dessableurs, travaux en rivière et revêtement, stabilisation des rives, construction de barrages spéciaux

### I.5. Changement de l'aménagement avec le temps

Il est tout à fait courant que les buts d'un aménagement hydraulique changent avec le temps. C'est ainsi qu'un réservoir (barrage, retenue) unique peut être réalisé en tant que premier élément d'un plan futur envisagé à l'échelle du bassin et soit exploité en conséquence. Quand on complète le système par d'autres réservoirs, l'exploitation du premier peut se trouver modifiée pour tenir compte de l'ensemble et ses buts initiaux changés. L'éventualité d'avoir à modifier de temps en temps les règles d'exploitation, et même de changer d'objectifs, est un des traits caractéristiques de tout aménagement des ressources en eau.

Dans l'aménagement hydraulique il y a deux dispositifs que l'on qualifie de

- 1) - dispositif structurant (barrages, structures de loisirs dans le barrage)
- 2)- dispositif non structurant (aménagement des bassins versants occupation des plaines inondables)

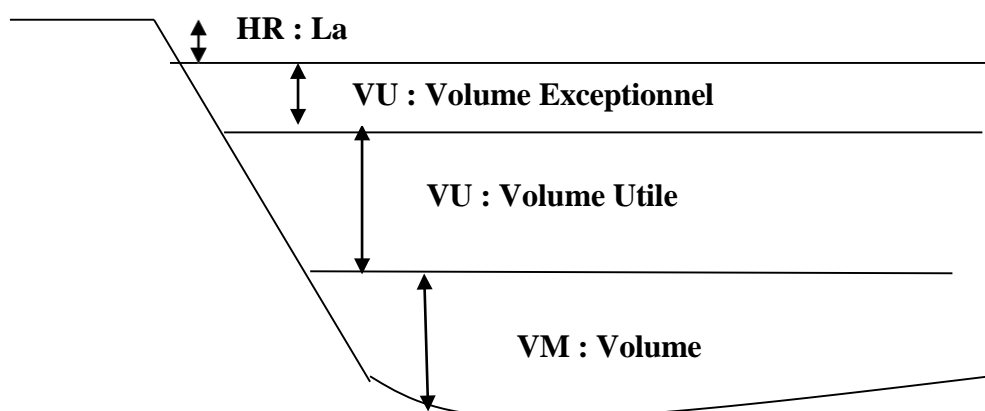
De nombreux objectifs visés par l'aménagement des eaux peuvent aussi être atteints, au moins partiellement, par des dispositifs que l'on qualifie de non-structuraux. C'est ainsi que l'ensemble des mesures concernant les bassins versants et destinées à sauvegarder et à améliorer la qualité des eaux, tâche essentielle et permanente, sont pour une grande part non-structurales. Une planification intégrée des ressources en eaux, pour des aménagements concernant la mise en valeur du sol ou visant d'autres buts, est particulièrement importante à cet égard. Un autre exemple de disposition non-structurale est la réglementation concernant

l'occupation d'une plaine inondable et la mise en place de règlements d'assurances contre les crues afin d'atténuer les effets des dommages qu'elles peuvent causer.

La planification des ressources en eaux exige donc que l'on fasse le tour de toutes les possibilités d'aménagements, structuraux ou non, offertes aux planifications. La répugnance à envisager des alternatives non-structurales en aménagement des eaux est imputable pour une grande part à des facteurs institutionnels. Malheureusement, les institutions responsables de la planification et de la prise de décision en matière d'aménagement des eaux ont souvent des caractéristiques qui ne les portent guère à encourager et à appuyer la recherche et la mise en lumière des solutions non-structurales.

### I.6. Hauteur du barrage

Les différentes tranches composant une retenue : Volume mort, volume utile, volume exceptionnel, la revanche.



*Figure I.1. Hauteurs du barrage*

**NMR** : niveau du volume mort ; il correspond du volume des sédiments (volume occupé par les dépôts dans la retenue) ;

**NNR** : niveau normal de la retenue ; c'est le niveau du volume utile, il est destiné à l'exploitation (consommation domestique, irrigation,..etc.). c'est un volume renouvelable.

**NPHE** : niveau de plus haute eau ; c'est le volume forcé ou le volume de laminage des crues.

**HR** : hauteur de la revanche, c'est la hauteur d'eau au vent (les vagues).

## Chapitre 2. Hydrographie

### II.1. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturel ou artificiel (permanant ou temporaire) qui participent à l'écoulement des bassins versants.

Le réseau hydrographique est due à quatre (04) facteurs :

- 1) Géologie : la structure su roche ;
- 2) Le climat : le réseau hydrographique est due à des régions montagneuse très humide ;
- 3) La pente du terrain ;
- 4) La présence humaine (drainage de la terre agricole, barrage, etc...) ;

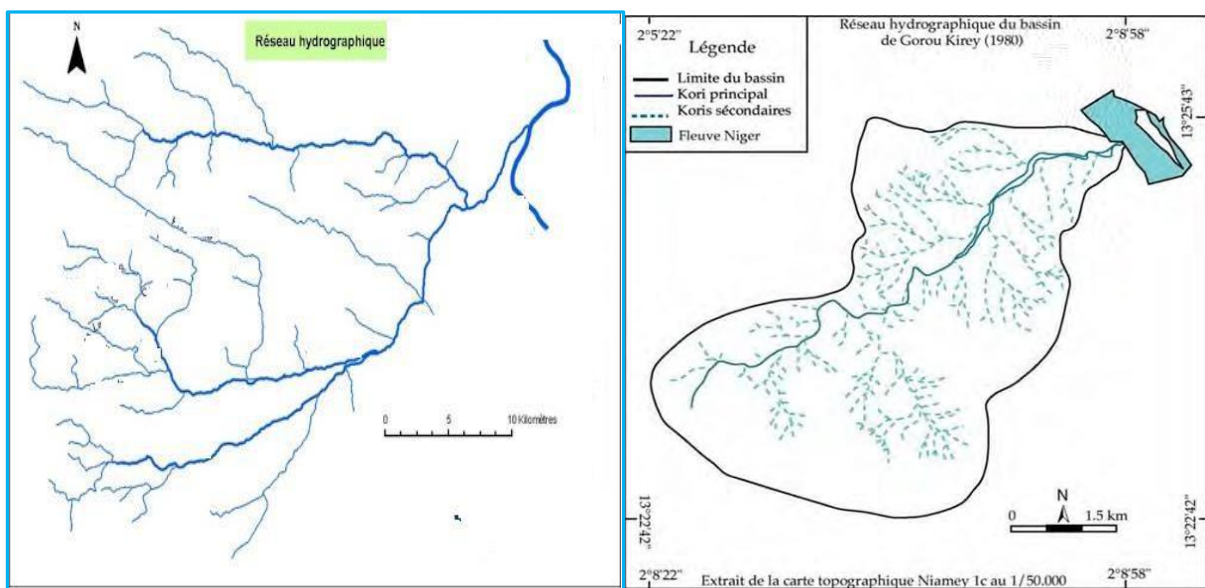


Figure II.1. Réseau hydrographique

### II.2. Qu'est-ce qu'un cours d'eau ?

C'est le chemin creusé par le passage habituel des eaux de ruissellement, que leur écoulement soit permanent ou seulement sporadique (irrégulier). Ce chemin creusé se trouve naturellement dans les points bas d'une région, un fond de vallée.

Tout chenal dans lequel s'écoule un flux d'eau continu ou temporaire. Il est un terme général pour désigner un fleuve, une rivière, un ruisseau, un torrent, un oued.

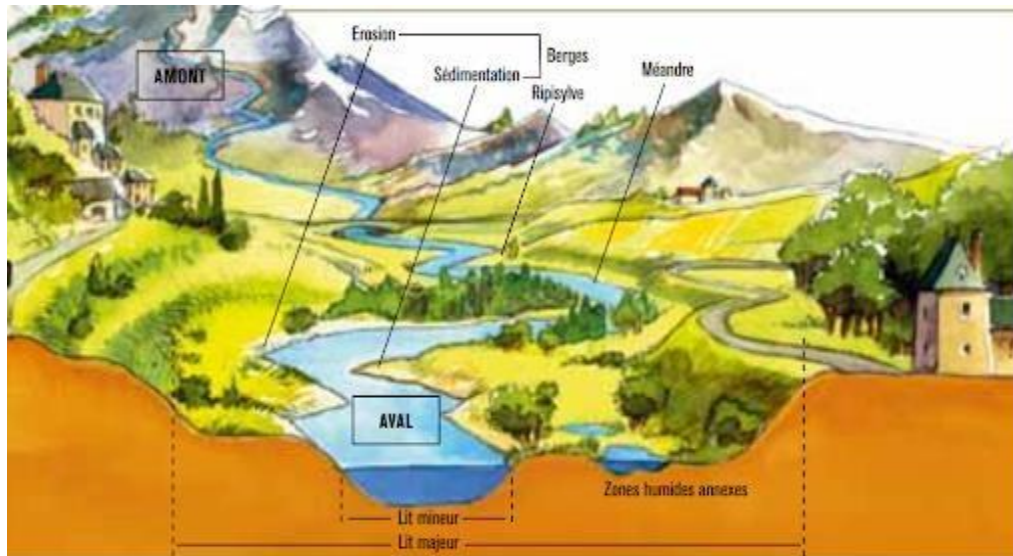


Figure II.2. Rivière et son bassin versant

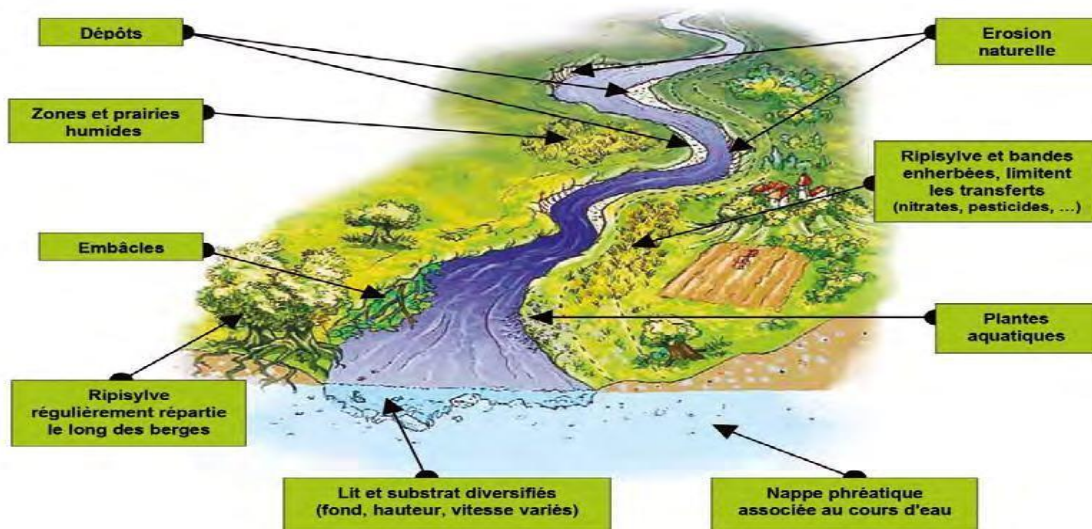


Figure II.3. cours d'eau

### II.3. Les différents types des cours d'eau

- a. **Le ru** : petit cours d'eau, souvent en tête de bassin, démarrage de l'écoulement.
- b. **Les ruisseaux** : petits cours d'eau de faible largeur et de faible longueur (longueur limitée) alimentée par des sources d'eau naturelles, souvent affluent d'un étang, d'un lac ou d'une rivière. Les ruisseaux se trouvent à la tête des bassins versants.
- c. **Le canal** : conduit naturel ou artificiel permettant le passage d'un fluide. Les canaux suivent en général de longues lignes droites.
- d. **Les torrents** : cours d'eau situés généralement en montagne ou sur des terrains accidentés, au débit rapide et irrégulier.
- e. **Les rivières** : cours d'eau moyennement importants, dont l'écoulement est continu ou

intermittent, elles se jettent dans d'autres rivières, lac, ou dans des fleuves.

**f. Les fleuves :** cours d'eau généralement importants long et au débit élevé, comptant de nombreux affluents, se jetant dans l'océan ou la mer.

**g. Oued :** terme d'origine arabe désignant un cours d'eau temporaire dans les régions arides ou semi--arides. Son écoulement dépend des précipitations et il peut rester à sec pendant de très longues périodes.

**h. Torrent :** cours d'eau au débit rapide et régulier. Les torrents se retrouvent sur des terrains accidentés ou en montagne.

**i- Émissaire :** canal d'évacuation des eaux de drainage (Drains).

#### II.4. Vue transversale du cours d'eau

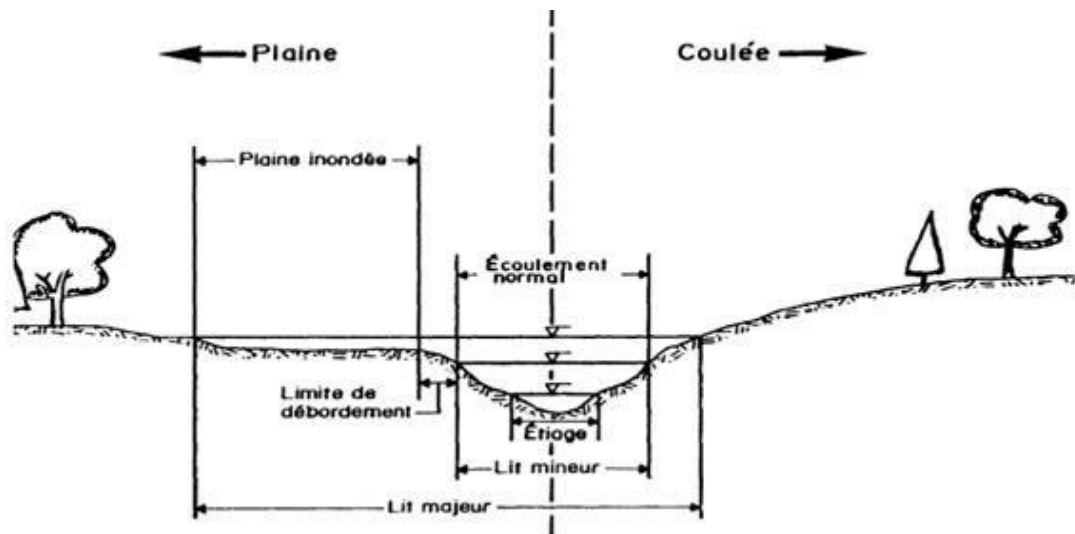


Figure II.4. Coupe transversale d'un cours d'eau.

##### II.4.1. Lit

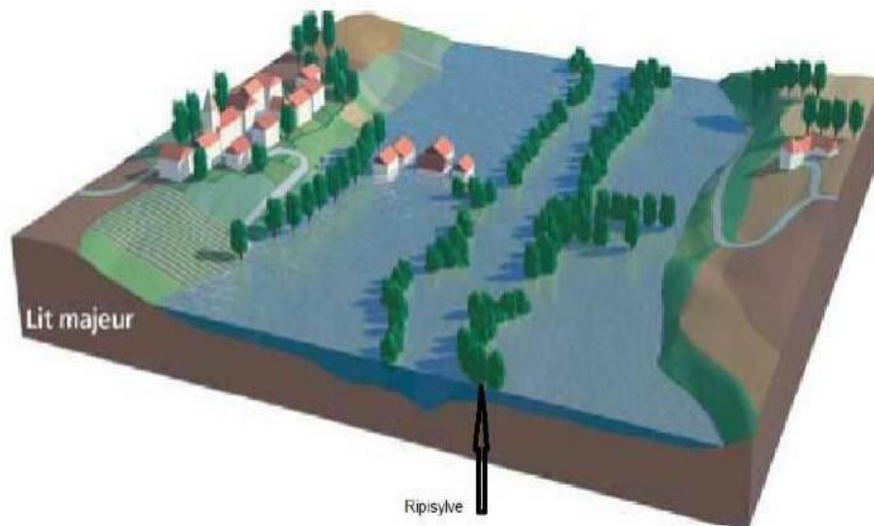
Désigne le niveau d'eau et l'espace occupé par le cours d'eau qui varie en fonction de son débit. Un cours d'eau analysée selon sa coupe transversale (figure 1.) présente une section principale occupée par les écoulements normaux (appelé **lit mineur**) et une plaine d'inondation occupée lorsque le cours d'eau est en crue (appelé **lit majeur**).

- ❖ **Lit mineur :** qui est constitué par le lit ordinaire du cours d'eau, pour le débit d'étiage ou pour les crues fréquentes (crues annuelles comprise entre un an a deux ans)



*Figure II.5. Lit mineur d'un cours d'eau (Ledoux, 2006).*

- ❖ **Lit majeur** : comprend les zones basses situées de part et d'autre du lit mineur, sur une distance qui va de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Sa limite est celle des crues exceptionnelles dont la période de retour est de l'ordre de cent ans.



*Figure II.6. Lit majeur d'un cours d'eau (Ledoux, 2006)*

#### II.4.2. Aval et amont

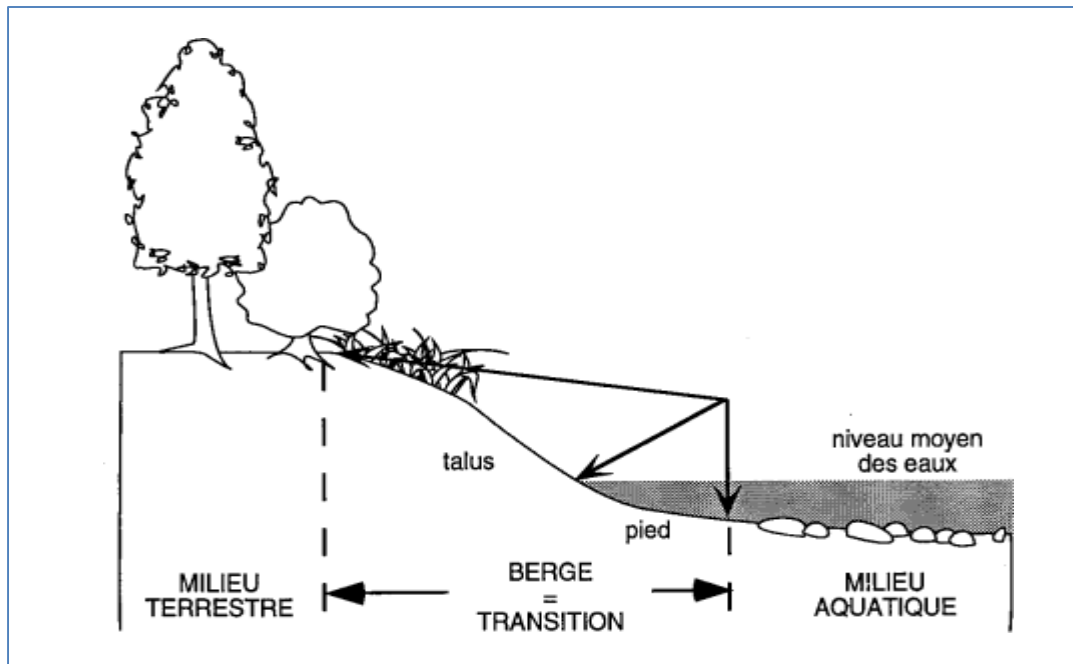
L'amont (vers la montagne) est la partie la plus élevée du cours d'eau du point de vue de l'observateur et l'aval (vers la vallée) est la partie la plus basse.

#### II.4.3. Rive gauche et rive droite

Rive d'un cours d'eau que l'on a à sa droite / à sa gauche quand on regarde vers l'aval. La rive gauche et la rive droite d'un cours d'eau sont identifiées par un observateur se déplaçant dans le sens de l'écoulement de l'eau, de l'amont vers l'aval.

#### II.4.4. La berge

La berge est la portion de terrain qui limite tout cours d'eau et elle est subdivisée en deux parties (figure suivante) :



*Figure II.7 La berge dans un cours d'eau.*

**Talus** proprement dit, qui n'est qu'occasionnellement en contact avec le courant et qui est situé au-dessus du niveau moyen des eaux.

**Pied de talus** : la zone du talus soumise à l'action quasi permanente du courant et qui est située sous le niveau moyen des eaux ;

### II.5. Les caractéristiques des cours d'eau

#### II.5.1. Topologie (structure du réseau et ordre des cours d'eau)

Par topologie, on entend l'étude des propriétés géométriques se conservant après déformations continues. Par extension, la topologie étudie les notions de voisinage et de limite. Appliquée à l'hydrologie, la topologie s'avère utile dans la description du réseau hydrographique notamment en proposant une classification de ceux-ci. À titre d'exemple, on trouve les types dendritiques, en treillis, en parallèle, rectangulaire, à méandre, anastomosé, centripète, etc.

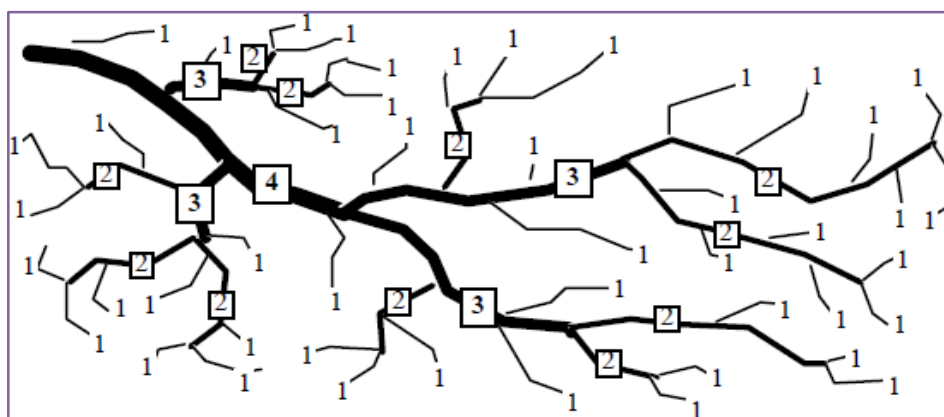
La classification est facilitée par un système de numérotation des tronçons de cours d'eau (rivière principale et affluents). L'ordre des cours d'eau est donc une classification qui reflète la ramification du cours d'eau. La codification des cours d'eau est également utilisée pour la codification des stations de mesures, permettant ainsi un traitement automatisé des



données.

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 est augmenté de un.



*Figure.II.8. Classification du réseau hydrographique selon le système de Strahler (1957).*

- Un bassin versant à l'ordre du plus élevé de ses cours d'eau, soit l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire. Il existe d'autres classifications de ce type comme celle de Horton (1945) qui est parfois utilisée dans le même but.

**II.5.2. Longueur des cours d'eau principales :** C'est la distance entre l'exutoire et le débit du cours d'eau. Un bassin versant se caractérise principalement par les deux longueurs suivantes, illustrées sur la figure ci-dessous.

- ❖ La longueur d'un bassin versant (LCA) est la distance curviligne mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à un point représentant la projection du centre de gravité du bassin sur un plan.
- ❖ La longueur du cours d'eau principal (L) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de

même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

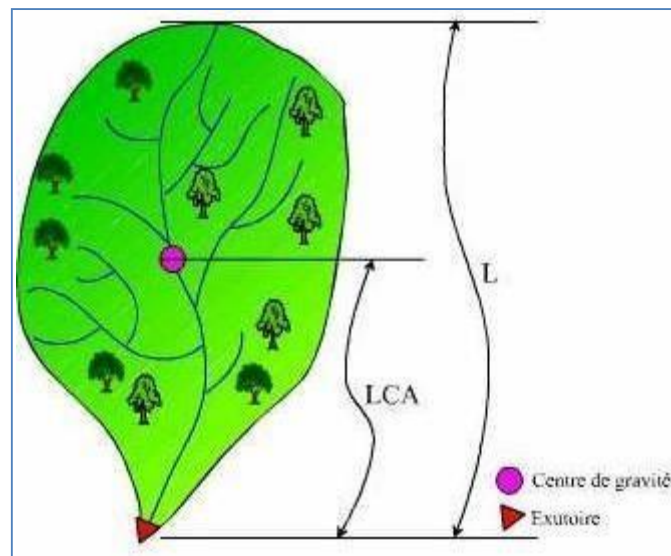


Figure.II.9. Longueurs caractéristiques d'un bassin versant.

LCA : longueur du bassin versant ;

L : longueur du cours d'eau principal

**II.5.3. La pente des cours d'eau :** la pente moyenne détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire. Une pente très forte favorise et accélère l'écoulement superficiel. Tandis qu'une pente douce (lente) donne le temps à l'eau pour s'infiltrer.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} \quad (m/Km)$$

Où :  $P_{moy}$  : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;

$\Delta H$  : dénivellation maximale de la rivière (L'altitude entre l'émissaire et le point le plus éloigné du bassin versant [m]).

$L$  : La distance (la longueur du cours d'eau principal).[km]

**II.5.4. Le Degré de développement du réseau :**

**II.5.4.1. La densité de drainage  $D_d$**

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

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

$D_d$  : dépend de la géologie et de la topographie du bassin versant [km/km<sup>2</sup>].

$\sum L_i$  : c'est la somme des longueurs des cours d'eau [km].

$A$  : surface du bassin versant [km<sup>2</sup>].

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques

topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. 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 Schum, 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).

**II.5.4.2. Densité hydrographique** : elle représente le nombre des canaux d'écoulement (les cours d'eau) par unité de surface.

$$DH = \frac{\sum Ni}{A}$$

Où **D<sub>H</sub>** : densité hydrographique [km<sup>-2</sup>];  
**N<sub>i</sub>** : Nombre des cours d'eau.  
**A** : Surface du bassin versant [km<sup>2</sup>].

Il existe une relation assez stable entre la densité de drainage **D<sub>d</sub>** et la densité hydrographique **D<sub>H</sub>** de la forme :

$$DH = \alpha \times Dd^2$$

Où **α** : est un coefficient d'ajustement.

En somme, les régions à haute densité de drainage et à haute densité hydrographique (deux facteurs allant souvent de pair) 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.

#### II.5.4.3. Temps de concentration du bassin versant **t<sub>c</sub>**

C'est le temps que met la particule d'eau la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Il existe plusieurs formules. Dans le contexte algérien, il peut être notamment calculé par l'ancienne formule de Giandotti (1937) soit :

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L_{cp}}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec ;

**S**: surface du bassin versant ( $\text{Km}^2$ ) ;

**Lcp**: longueur du cours d'eau principal (Km);

**Tc** : temps de concentration exprimé en heure (heure) ;

**Hmoy** : altitude moyenne (m) ;

**Hmin**: altitude minimale (m).

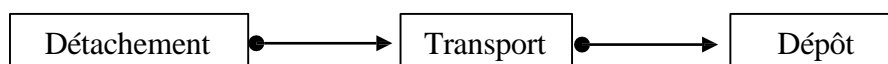
## Chapitre 3. Ouvrages de protection contre l'érosion

### 1. Définitions

L'érosion est un processus selon lequel les particules de sol sont arrachées de leur milieu (le fragment des particules de sol), transportées par un agent de transport (l'eau, l'air) et déposées en un autre milieu.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe qui menace les potentialités en eau et en sol. Elle se définit comme le détachement et le transport des particules du sol.

L'érosion hydrique du sol est le détachement, le transport et le dépôt de particules de terre par l'eau qui s'écoule. Après une averse intense et un ruissellement, le débit d'eau peut devenir concentré.



L'érosion se produit lorsque les forces d'arrachement en présence sur les particules de sol sont plus grandes que leurs forces de résistance. Le phénomène est d'autant plus important que le déséquilibre est grand. La déposition survient lorsque les forces de transport sont plus faibles que le poids des particules. Détacher

#### Les manifestations d'érosion dans un bassin versant

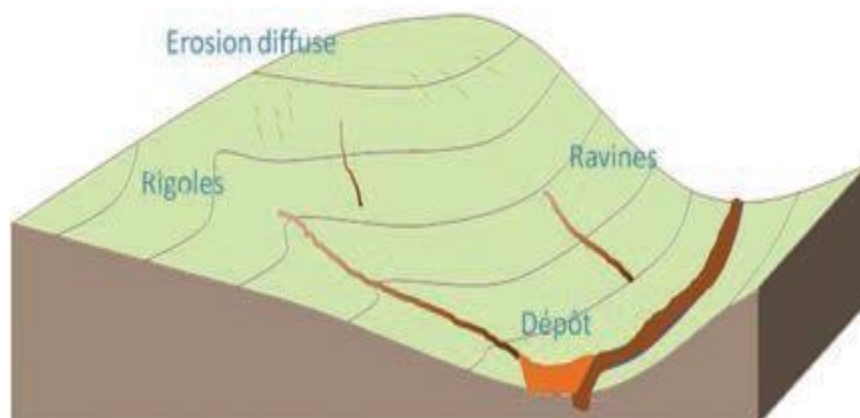
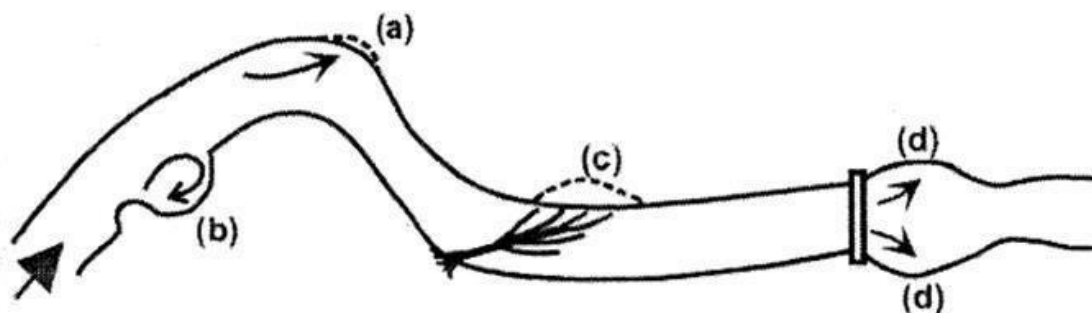


Figure III.1. Les manifestations d'érosion dans un bassin versant

La figure suivante illustre bien comment les obstacles peuvent favoriser l'érosion de la berge. Ainsi un arbre abattu peut provoquer l'érosion de la berge opposée d'une petite rivière, par courant réfléchi. Le tourbillon provoqué par le tronc d'un arbre en place peut éroder la berge. À l'aval d'un seuil, les tourbillons tendent à éroder les deux berges aval. Un rétrécissement créé par une souche avancée crée un courant de retour qui peut amorcer une encoche d'érosion (Degoutte, 2006).



*Figure III.2. Exemples de zones sensibles à l'érosion ;*

*Dans une courbe (a); par courant de retour (b); par courant réfléchi dû à un arbre tombé (c); par dissipation d'énergie à l'aval d'un seuil (d).*

Lorsque les berges sont cohérentes, l'érosion par le courant peut conduire à la création de zones en surplomb. Cette possibilité est facilitée si les berges sont stratifiées avec à leur base des matériaux grossiers (graviers ou sables) et des limons à leur sommet. À terme, ces surplombs sont instables et s'effondrent brutalement sous leur propre poids. L'effondrement est une conséquence directe de l'érosion de la berge.

L'érosion est à la base un phénomène naturel influencé notamment par le climat, la topographie, le type de substrat ainsi que la couverture végétale. Ce phénomène peut toutefois être aggravé par certains facteurs de nature anthropique. Ainsi les pratiques culturales inadaptées à proximité des cours d'eau, le déboisement et/ou la régression du couvert végétal, la circulation de véhicules sur les berges et dans les cours d'eau, le passage de bateaux ou autres embarcations nautiques, l'urbanisation et le ruissellement urbain ainsi que les interventions en rivières (barrages, digues, etc.) sont tous des éléments qui peuvent accentuer l'érosion dans un cours d'eau.

## 2. Les facteurs de l'érosion

### 2.1. Facteurs climatiques

Des influences climatiques constituent une partie d'altération. La pluie et l'écoulement sont deux phénomènes hydrologiques qui ont le plus d'importance pour l'érosion des sols :

**La pluie** : agent essentiel de l'érosion. Le potentiel érosif de la pluie (érosivité) déterminé par :

- les caractéristiques d'un événement pluvieux : intensité et durée ;
- la pluviométrie globale : saisonnalité.

**Le ruissellement** : Potentiel érosif du ruissellement (érosivité) déterminé par :

- énergie cinétique et vitesse de l'eau,
- concentration du ruissellement lié à la topographie du terrain.

## 2.2. Facteurs Topographiques

Elles sont la pente du bassin versant, le relief et la densité de drainage.

**Le relief** : influence inévitablement la vitesse de ruissellement des eaux sur une parcelle.

Plus cette vitesse sera élevée, plus l'arrachement des particules de terre sera important.

D'après les études, les risques d'érosion des sols en fonction de la pente sont évalués de la façon suivante :

**Entre 0 et 1%** : ruissellement des eaux mais sans érosion

**Entre 1 et 3%** : érosion diffuse et formation de rigoles

**Entre 3 et 5%** : érosion forte avec ravinement

**Plus de 5%** : érosion très forte avec ravinement profond.

Ces chiffres sont bien sûr à relativiser en fonction du type de sol.

## 2.3. Facteurs géologique et pédologiques

Ce sont les facteurs géologiques relatifs aux roches de surface qui sont important en matière d'érosion. Dans certaines régions, toutes les formations géologiques peuvent être recouvertes d'alluvions ou des roches altérés qui sont des matériaux sensibles à l'érosion. Parmi les facteurs pédologiques le sol.

Les sols limoneux ou affinés de manière excessive sont plus propices au phénomène d'érosion: ces sols sont en effet plus favorables au phénomène de battance. En effet, sous l'impact des gouttes de pluie, les mottes de terre de ces sols éclatent et se désagrègent en fines particules : c'est l'effet splash. Ces particules très fines de terre ont alors tendance à se compacter à la surface du sol pour former une croûte : c'est la croûte de battance qui réduit l'infiltration de l'eau et favorise le ruissellement. Elle a également des conséquences agronomiques car elle empêche la bonne germination, la levée des graines et la croissance des plantes.

La matière organique améliore la structure du sol, et de ce fait diminue l'effet splash\* des gouttes de pluie et freine la formation d'une croûte de battance\*. Ainsi, l'épandage d'effluents agricoles comme le fumier permet d'enrichir le sol en matière organique. Par contre le retournement des prairies permanentes diminue fortement la teneur en matière organique du sol.

## 2.4. Couvert végétal

Le couvert végétal limite l'impact des gouttes de pluie, donc limite l'érosion, il diminue l'énergie de pluie, il favorise l'infiltration et s'oppose à toutes les formes d'érosion.

## 3. Conséquence d'érosion

### 3.1. Milieux naturels

L'érosion des sols a un impact sur la qualité des cours d'eau et des zones humides. Elle emporte de nombreuses particules qui peuvent être néfastes. L'érosion provoque également le colmatage des rivières et des zones marécageuses par les limons entraînant une diminution de la biodiversité.

### 3.2. Pertes agronomiques

L'érosion peut provoquer d'importantes pertes de terre, fertilisants et amendements au niveau d'une parcelle. Disparaissant définitivement de la parcelle, cette terre érodée est bien souvent la plus fertile, ce qui peut engendrer une perte des potentialités agronomiques. L'érosion peut endommager les cultures et ainsi diminuer les niveaux de rendements.

### 3.3. Dégâts sur biens publics et privés

Les eaux de ruissellement peuvent occasionner de nombreux dommages aux infrastructures. Les dégâts sont d'autant plus importants que les eaux de ruissellements sont chargées en sédiments.

### 3.4 L'érosion des sols

Qui peut se manifester par la formation de ravines et provoquer des coulées de boues sur la voirie et dans les villages.

### 3.5. L'augmentation des crues des rivières

Avec l'arrivée massive des eaux de ruissellement provenant du bassin versant.

## 4. Protection contre les érosions du lit

Diverses possibilités

- Augmentation de la résistance du lit
  - Lit artificiel (canal bétonné)
  - Pavage du lit par des blocs en pierre (couche de pavage artificiel)
  - Renforcer le lit par de gros blocs (rocher ou éléments en béton)
- Réduction de la pente du lit.
  - Fixation du lit par des traversées (seuil en bois, pierres de taille, béton)

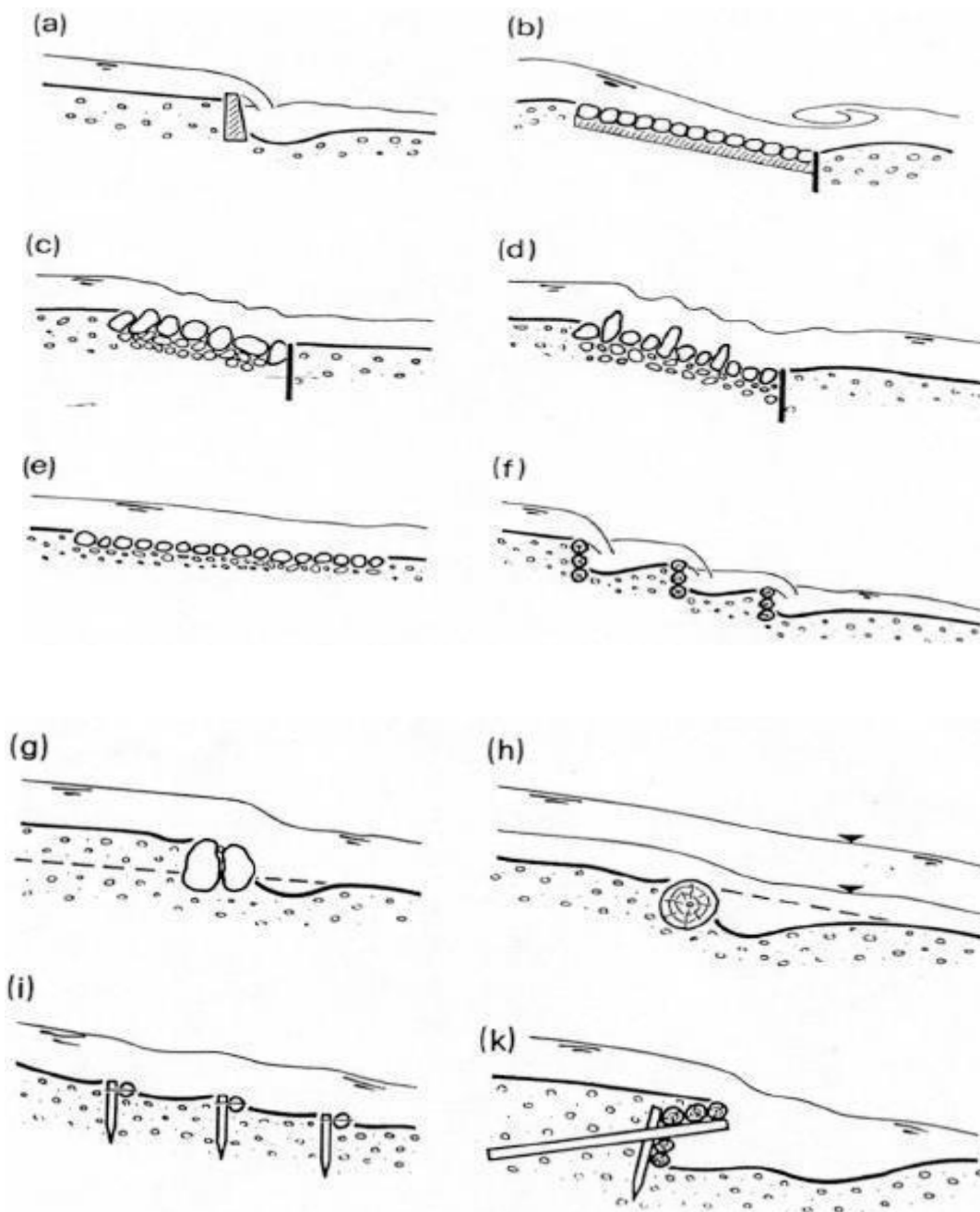


- Fixation du lit par des rampes de blocs
- Changement du tracé du cours d'eau (prolongement du talweg par des méandres, etc...)
- Elargissement du lit
  - Elargissement sur longue distances
  - Elargissement local
  - Dérivation partielle du cours d'eau dans un lit secondaire.
- Intervention sur le transport solide
  - Renversement du gravier dans le cours d'eau (localement à l'amont du tronçon érodé).

## 5. Stabilisation des lits contre l'érosion

Fixation du lit par des ouvrages transversaux :

- a) Seuil ;
- b) Coursier bétonnier ;
- c) Rampe des blocs ;
- d) Rampe des blocs à grande rugosité ;
- e) Coursier avec pavage artificiel ;
- f) Seuil en bois ;
- g) Seuil de fixation en blocs ;
- h) Seuil de fixation en bois ;
- i) Traversées ;
- j) Seuil en bois avec refuge pour poissons.



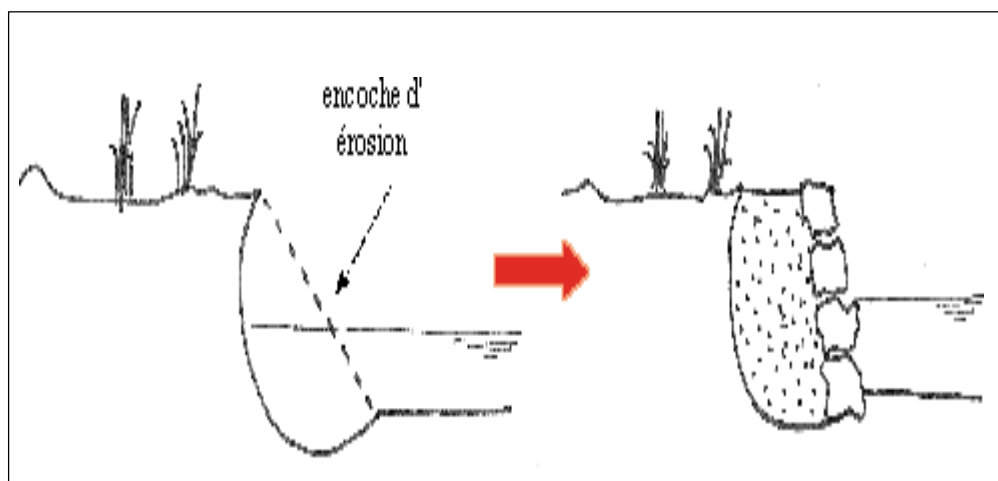
**Figure III.3.** Les ouvrages transversaux : a) Seuil b) Coursier bétonnier c) Rampe des blocs  
 a) Rampe des blocs à grande rugosité e) Coursier avec pavage artificiel f) Seuil en bois  
 g) Seuil de fixation en blocs h) Seuil de fixation en bois i) Traversées k) Seuil en bois  
 avec refuge pour poissons.

## 6. Protection des rives (berges)

Différentes techniques sont utilisées pour la protection des berges lorsque le sol est inconsistant, qui sont comme suite

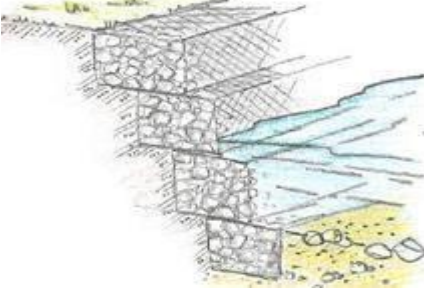
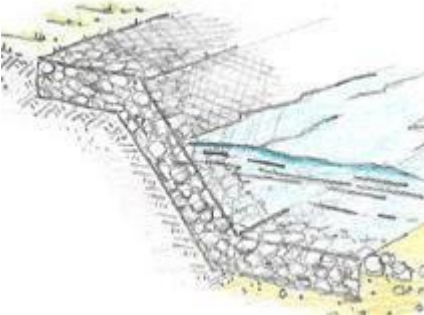
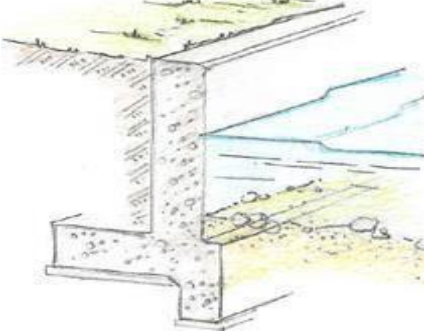
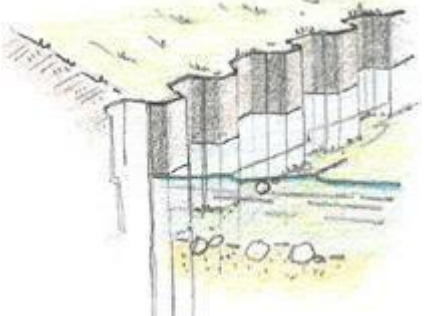
### 6.1. Techniques lourdes

Cette technique consiste à ériger le long de la berge endommagée par l'érosion un "mur" en rochers d'épaisseur variable et de combler l'espace laissé vide par un matériau meuble, par exemple de la terre, du sable ou des graviers. Entre les rochers et ce matériau on place généralement un matériau géotextile ou un film plastique pour que la terre ne s'évacue pas par ruissellement (affouillement, renard...) de la berge vers la rivière. Ce "filtre" doit laisser passer l'eau et doit retenir les fines et les cailloux. Pour que la ligne d'enrochement tienne, la première rangée de roches, sur laquelle repose tout l'ouvrage, est quasiment complètement enfouie dans au moins 60 cm de sol et constitue l'ancrage. On construit généralement l'ouvrage de sorte à ce qu'il tienne seul sans les remblais de terre ; on s'assure ainsi de sa solidité.



*Figure III.4 Protection d'une berge*

Tableau III.1. Les matériaux utilisés pour la protection des berges

<b>Gabions</b>	Enveloppes de grillage remplies de pierres, confectionnées sur leur lieu d'implantation. Leur souplesse leur permet de s'adapter à l'évolution du lit de la rivière. Leur valeur esthétique est faible mais peut être améliorée par végétalisation.	
<b>Matelas-gabions</b>	Matelas construits sur le principe des gabions d'environ 20cm d'épaisseur. Ils sont plus discrets que les gabions et se végétalisent plus facilement. Ils s'adaptent bien en cas d'évolution du lit et des berges	
<b>Murs</b>	Constitués de pierre, moellons ou bétonils remplacent la berge et font du cours d'eau un canal. A réserver pour les agglomérations, leur intégration au site est difficile et relève de l'urbanisme.	
<b>Palplanches</b>	Feuilles de métal épais préformées et emboîtables les unes dans les autres. Protection rigide à réserver à des usages précis: restauration de chaussées, consolidation d'anciennes protections, de ponts...	

Pour un même ouvrage les matériaux utilisés doivent être de qualité homogène. Les blocs de roche doivent posséder une dureté suffisante pour pouvoir être déversés en vrac et manipulés avec des engins mécaniques. Ils doivent être homogènes et propres autant que possible, ne s'altérer ni à l'air ni à l'eau et être exempts de fissures.

Les caractéristiques géométriques des blocs seront définies en fonction de la puissance érosive du cours d'eau, de la vitesse maximale, de la hauteur d'eau et de la pente du talus. De manière générale la masse moyenne des blocs est de l'ordre de la tonne. On cherche le plus souvent à avoir le plus de blocs possible de la même taille, mais on peut avoir des blocs pesant largement jusqu'à plusieurs fois la masse moyenne choisie par le maître d'œuvre. Les roches doivent être de préférence à angles marqués et de forme tétraédrique en respectant un ration compris entre 1 et 2 entre la longueur et l'épaisseur. Les caractéristiques physiques des matériaux permettent de valider la solidité de l'ouvrage. On recherche des matériaux non calcaires ayant un poids spécifique apparent sec de l'ordre de  $2500\text{kg/m}^3$ . La sensibilité au gel doit être très faible et sa résistance à la compression élevée.

C'est le maître d'œuvre qui décide des matériaux qu'il va utiliser et c'est à lui de fixer la qualité des matériaux qu'il recherche en fixant une commande la plus précise possible concernant les caractéristiques géométriques et physiques précitées.

## 6.2. Techniques douces

Ces techniques sont basées sur l'utilisation de matériaux végétaux inertes ou vivants. Le génie végétal favorise une protection naturelle des berges en conservant la végétation existante. Les buts principaux sont comme les techniques de génie civil d'offrir une solution efficace à un problème de protection des sols (érosion, glissement,...) tout en engendrant un coût de réalisation raisonnable. Cependant l'essentiel de leur intérêt repose sur les objectifs suivants:

- considérer le cours d'eau comme un complexe formé d'un lit, de berges et de rives en relation avec le bassin versant et les nappes phréatiques
- maintenir une diversité maximale d'habitats aussi bien au niveau du lit que des berges et des rives
- garder une morphologie correcte et typique au cours d'eau
- éviter une structure rocheuse des berges là où elle n'existe pas naturellement
- respecter une distribution étagée de la végétation, du pied au sommet de la berge, régie

par des conditions hydriques et hydrauliques


- intégrer l'ouvrage dans son site
- minimiser l'impact occasionné par l'implantation d'un ouvrage de stabilisation


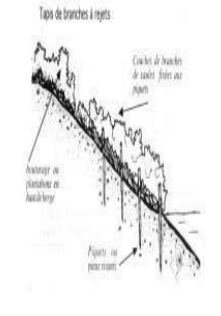
**Les protections en matériaux végétaux inertes** sont faciles à réaliser sur de petits cours d'eau lorsqu'elles sont faites avec du bois pris à proximité. Elles sont plutôt destinées à la stabilisation des pieds de berges et s'accompagnent de plantations. Le matériau principal utilisé est le saule.

**Les protections en matériaux vivants** (enherbement, végétation buissonnante ou arbustive, arbres) font partie des opérations de végétalisation les plus simples qui consistent à mettre en terre des espèces vivantes qui vont coloniser le secteur aménagé. Les essences doivent être variées, adaptées au type de sol, au degré d'humidité et de préférence existant naturellement dans le secteur. Il est préférable d'éviter les alignements monotones. L'entretien (moyens techniques et humains, accès..) doit être prévu avant même la plantation.

La protection que les plantations apportent doit s'exercer sur l'ensemble du talus et le sommet de la berge (essences ligneuses de haut port). Généralement les plantations ne s'effectuent qu'en complément à d'autres techniques.

*Tableau III.2. Les matériaux végétaux utilisés pour la protection des berges*

Type de protection	Description	Schéma
<b>Enherbement</b>	Dispersion de graines d'herbacées. Vise à limiter le ruissellement et l'érosion en surface mais aussi pour certaines herbacées à stabiliser. + Colonisation végétale de haute densité, très régulière, rapide, grandes surfaces + Garde certaines berges ouvertes et offre plus de lumière + Couverture protectrice de surface - Efficacité limitée en fonction de la pente et de la force d'arrachement du courant - Paysage monotone; nécessité de plantations d'arbres - Peut favoriser l'implantation d'essences colonisatrices non désirées	

<p><b>Arbres ou arbustes en berge</b></p>	<p>Mise en terre d'espèces généralement ligneuses élevées en pépinière en sommet de berges, d'arbustes en mi-pente et de végétaux heliophytes prélevés sur le terrain en pied de berge.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Intervention simple</li> <li>+ Possibilité d'apporter la diversité botanique</li> <li>+ Ralentissement de l'écoulement en cas de crue; dissipation d'énergie</li> <li>- Limite pour les cours d'eau à fortes contraintes hydrauliques</li> <li>- Efficacité faible dans un premier temps</li> </ul>	
<p><b>Tapis végétal</b></p>	<p>Branches de saule, munies de leurs rameaux, disposées en couches serrées de 20 à 30 cm d'épaisseur, le pied vers le bas, fixés solidement à des pieux de saule.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Stabilisation de talus</li> <li>- Nécessité de stabiliser le pied de berge</li> </ul>	

L'efficacité des techniques précitées peut être améliorée par l'apport d'autres matériaux: *les géotextiles*. Ce sont des nattes faites de matériaux de synthèse ou de fibres naturelles.



*Figure III.4. Mise en place de couches de branches et recouvrement avec un géotextile putrescible*

Les géotextiles ne sont que partiellement utilisés en génie végétal. En effet, leurs propriétés mécaniques et hydrauliques ne sont pas les seuls critères de choix mais aussi leur capacité à la

végétalisation à savoir que des tiges et des racines doivent pouvoir les traverser. La durée d'efficacité d'un géotextile en génie végétal est limitée: il doit en fait assurer ses fonctions pour la durée nécessaire au développement d'un enracinement suffisant. Il est donc courant d'utiliser des géotextiles putrescibles qui formeront de plus de l'humus. Les matériaux souvent utilisés sont: le jute, la fibre de coco, le lin, les roseaux.

### 6.3. Les épis

Ces ouvrages sont destinés à corriger les tronçons déjà affouillés. Les épis peuvent être en terre, enrochements, ou en gabions. Ils sont placés dans les anses à forte érosion, afin de favoriser le dépôt entre eux et de ce fait réaliser le comblement des espaces affouillés. Lorsque la nécessité oblige, on réalise des épis avec une combinaison de deux (parfois plus) matériaux de nature différente.

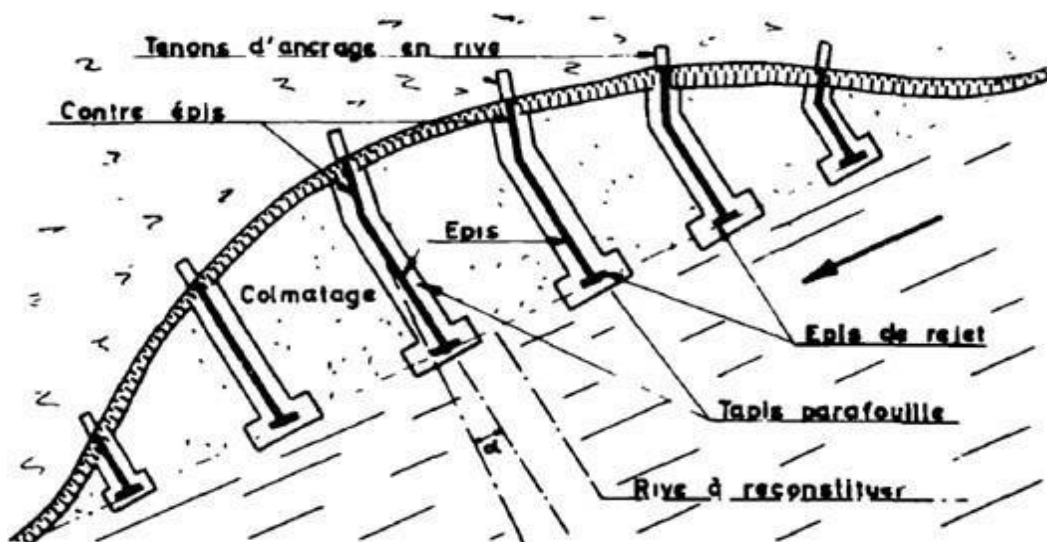


Figure III.5. Plan schématique représentant une série des épis

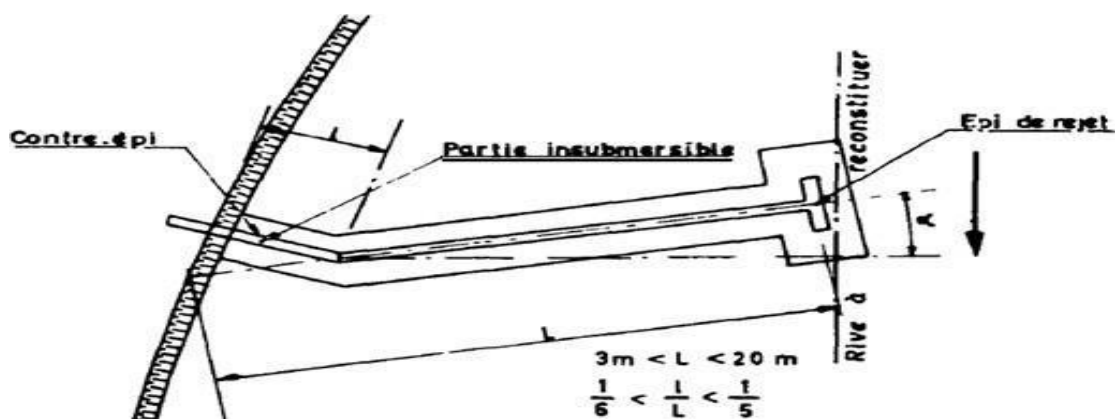


Figure III.6. Vue d'ensemble contre épi et épi de rejet





*Figure III.7.Epis*

### **Types des épis**

- Epis singuliers
- Epis en rangées
- Epis non submergés
- Epis submergés
- Epis non perméable
- Epis perméable
- Epis perpendiculaires
- Epis inclinés vers l'aval
- Epis inclinés vers l'amont
- Epis massifs (enrochement, empierrement, éléments artificiels en béton, blocs ou pierres en taille éventuellement posés sur des mortiers ou sur du béton)
- Epis en génie biologique (caissons en bois, fascines, pieux en bois)
- Epis combinés.

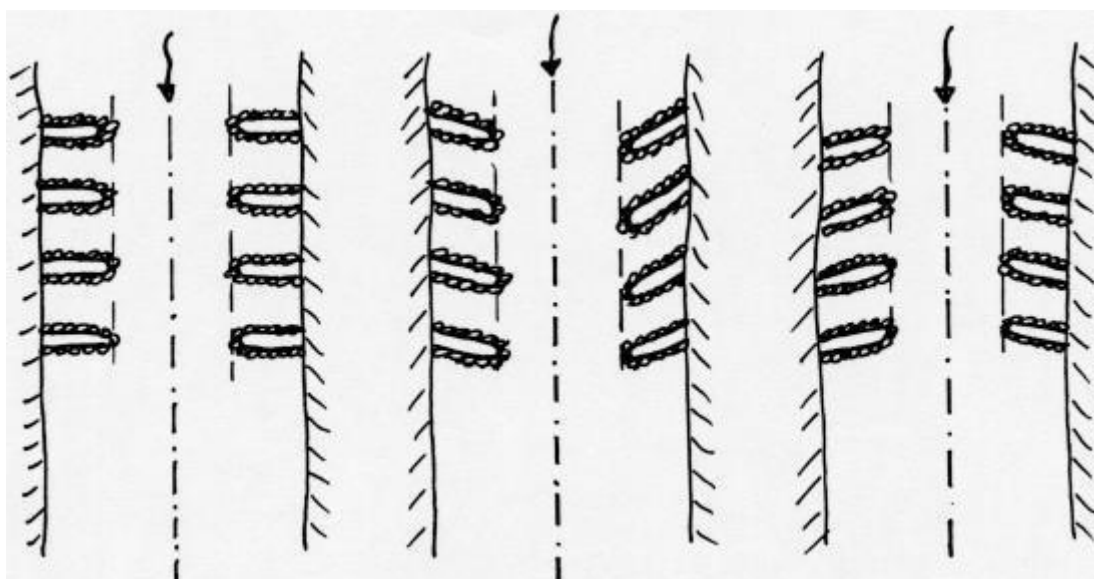


Figure.III.8. Inclinaisons des épis (perpendiculaire, vers l'aval et vers l'amont)

#### 6.4. Les murs de soutènement

Ils permettent d'éviter l'érosion des berges, et le glissement derrière celles-ci. Les murs de soutènement peuvent être en béton, béton armé, maçonnerie, ou en gabions. Lorsque la nécessité oblige, on conçoit des chutes avec une combinaison de deux (parfois plus) matériaux de nature différente. Ils sont constitués d'un rideau faisant office de parement, d'une semelle portant le rideau et ancrée dans la fondation, de barbacanes pour le drainage des eaux se trouvant derrière le mur, et parfois d'une bêche pour augmenter la stabilité de l'ouvrage.

Épaisseur : 0.6 à 1.4m Sécurité  
de renversement : 1.5  
Volume de béton par mètre de  
longueur : 12.72 m<sup>3</sup>/m

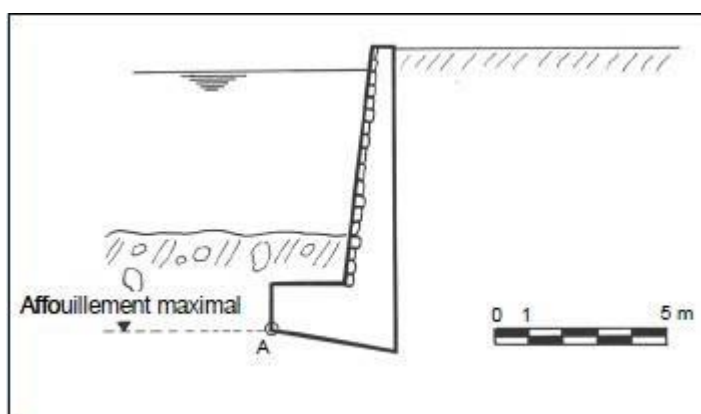


Figure III.9. Mur de soutènement en L

#### 6.5. Le revêtement des berges

Le revêtement des talus et des berges : par une protection adéquate, il évite l'apparition des affouillements, et l'érosion au niveau des berges

Les revêtements peuvent être en enrochements (fig ci-dessous), béton, béton armé, maçonnerie, ou en gabions. Lorsque la nécessité oblige, on conçoit des chutes avec une combinaison de deux (parfois plus) matériaux de nature différente. Leur épaisseur doit être suffisante pour résister à la force de traction du courant. Lorsque le revêtement est en béton, on lui associe des barbacanes de drainage.



Figure III.10. Revêtement en enrochement en construction sur un géotextile

## 7. Dimensionnement des ouvrages de protection contre l'érosion du lit

### 7.1. Dimensionnement des enrochements

- Contrainte de cisaillement maximale sur les berges :

$$r_{max} = 0.77 \rho g h_{max} J$$

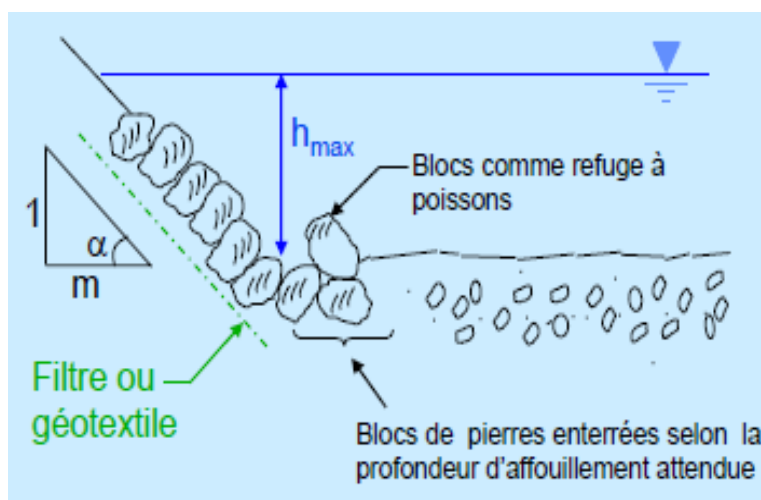


Figure.III.11. Revêtement en enrochement

- Contraintes de cisaillements adimensionnelles

$$\theta = \frac{\tau_{max}}{\rho g (s-1) d_B} = \frac{0.77 h_{max} \cdot J}{(s-1) d_B}$$

$h_{max}$  : Hauteur d'eau maximale sur les berges

J : pente de frottement.

S : densité spécifique :

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} = 2.65$$

$d_B$  : Diamètres des blocs.

- Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al :

$$n = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{16.17 h_{max} \cdot J}{(s-1) d_B}$$

n : Facteur de dimensionnement selon Stevens et al

$h_{max}$  : Hauteur d'eau maximale sur les berges

J : pente de frottement.

S : densité spécifique

$\theta$  : Contrainte de cisaillement adimensionnelle

$\theta_c$  : Contrainte de cisaillement adimensionnelle critique

$\theta_{cr} = 0.047$  En général.

$\theta_{cr} = 0.1$  Pour des rivières de montagnes avec des gros blocs dans le lit. La valeur

**16.17** devient **7.7**

$$\xi = n \cdot \frac{s_m}{\cos \alpha}, \quad s_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

$\xi$  : Facteur de dimensionnement selon Stevens et al

$\alpha$  : Angle du talus avec l'horizontale ( $\tan \alpha = 1/m$ )

$\varphi$  : Angle d'un talus d'enrochements stable sans écoulement :

Blocs < 1 t ( $\varphi = 40 - 45^\circ$ )

Blocs > 1 t ( $\varphi = 45 - 60^\circ$ )

$$S = \frac{s_m}{2} (\sqrt{\varepsilon^2 + 4} - \varepsilon)$$

S : coefficient de sécurité ( $S_{\min}=1.0/1.3$  selon conditions)

$S_m$  : coefficient de sécurité sans écoulement.

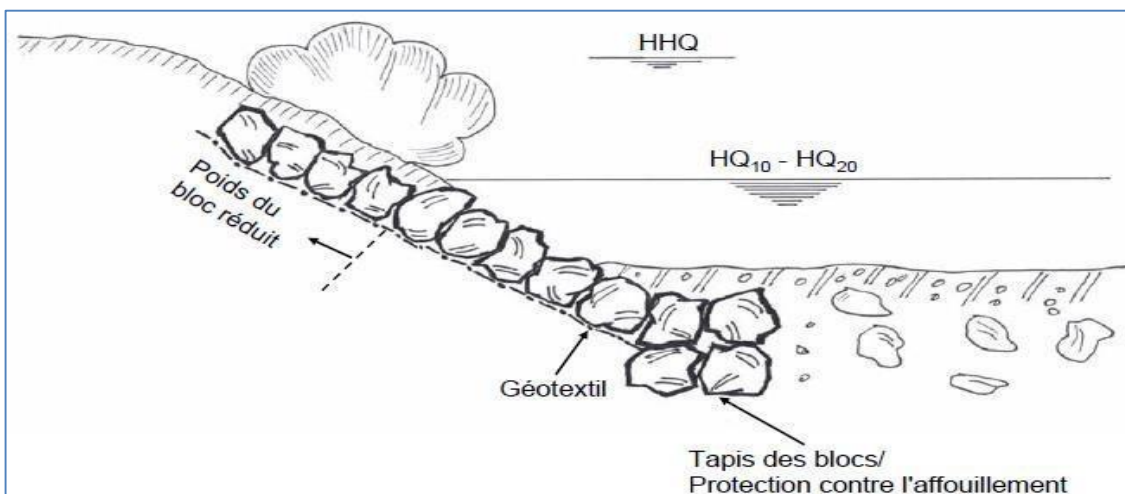


Figure III.12. Enrochement avec une seule couche

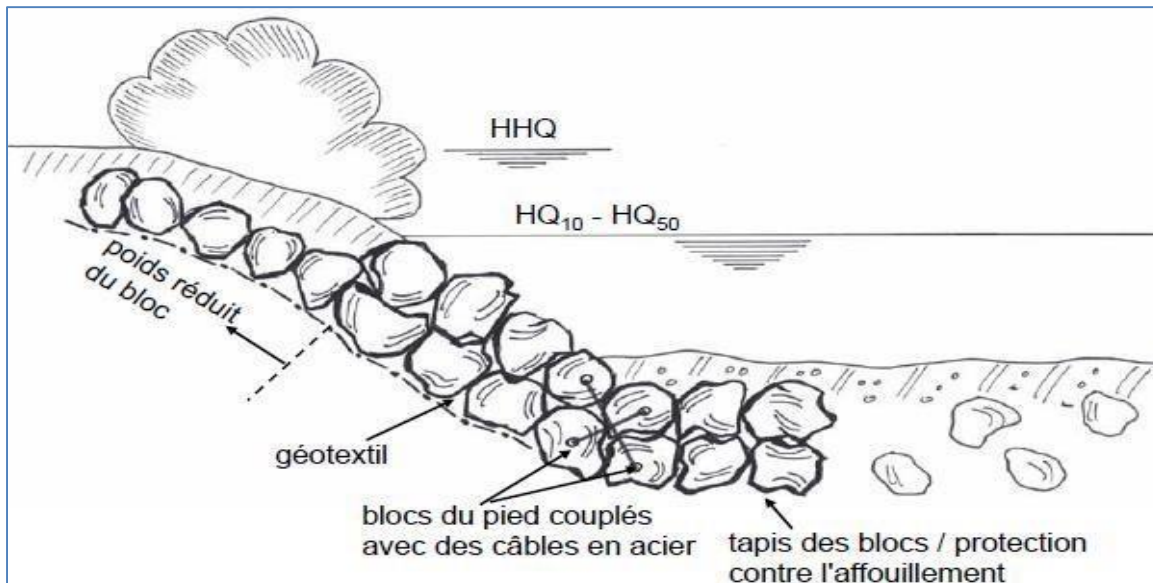


Figure III.13. Enrochement en deux couches

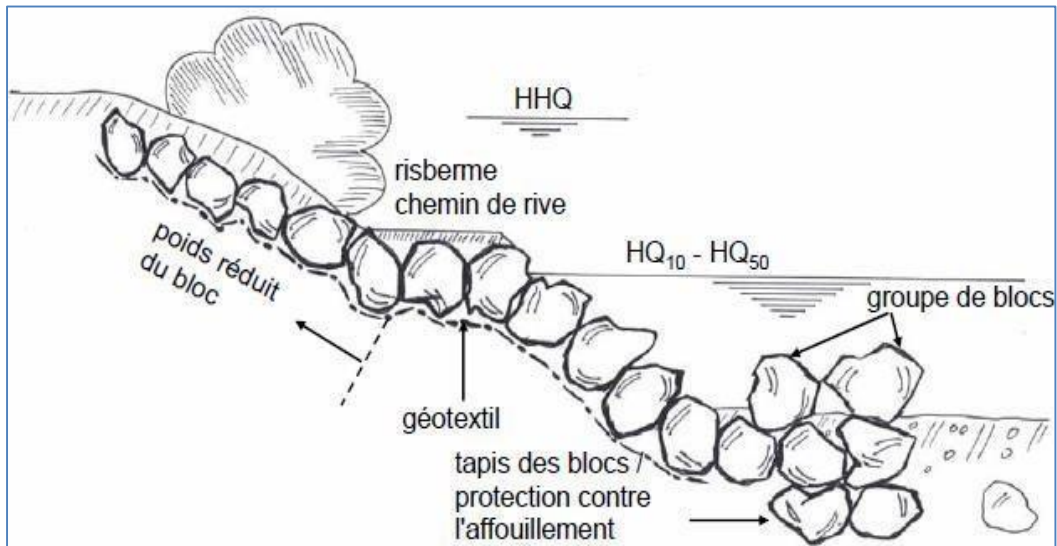


Figure III.14. Revêtement en enrochement avec risberme

## 7.2. Protection contre l'affouillement

- L'estimation des affouillements à l'extérieur des tronçons-courbes

$$S = h_m \cdot \left(\frac{R_i}{R_m}\right)^k$$

Et

$$\sin \beta = k \frac{h_m}{R_i}$$

avec

$S$  : Profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface de l'eau

$h_m$  : Profondeur d'eau moyenne

$R$  : Rayon local

$R$  : Rayon moyen

$\sin \beta$  : pente transversale locale du lit

L'exposant  $k$  selon l'approche de Kikkawa (1976) vaut :

$$K = (2.575 \cdot c - 4.078) \cdot \sqrt{\theta}$$

Avec  $\theta$  : facteur de Shields (contrainte de cisaillement adimensionnelle)

$$\theta = \frac{h_m \cdot J}{(s-1) d_m}$$

$$c = \frac{v_m}{v_*}$$

et la vitesse de cisaillement

$$v_* = \sqrt{g \cdot h_m \cdot J}$$

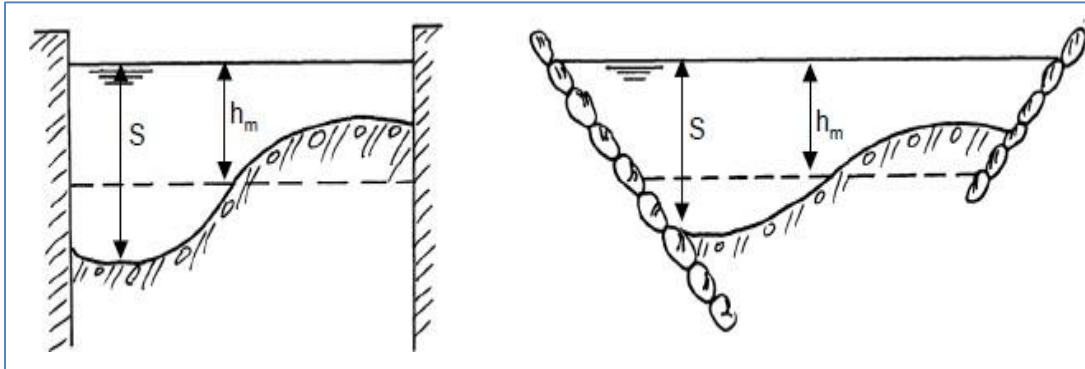


Figure III.15. Affouillement en courbe

Estimation des affouillements causés par l'écoulement meandrant

1. Profil rectangulaire :

$$S = h_m + \frac{B}{6 \cdot \left(\frac{b}{d_m}\right)^{0.15}}$$

2. Profil trapézoïdal :

$$S = h_m + \frac{B - 2n(S - h_m)}{6 \left[ \frac{B - 2n(S - h_m)}{d_m} \right]^{0.15}}$$

avec:

: Profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface de l'eau

$h_m$  : Profondeur d'eau moyenne

: Largeur du lit

$d$  : diamètre moyenne de la granulométrie du lit

: pente de talus de la rive (1/n)

### 7.3. Enrochements pour les rivières en plaine

- Dimensionnement avec démarche de Stevens et al. Avec  $\theta_{cr}=0.05$  et  $\varphi < 45^\circ$  (angle de repose du talus).
- Epaisseur minimale des enrochements en remblai.

L'épaisseur minimale de l'enrochement en remblai dépend de la granulométrie choisie :

- granulométrie avec les grains de diamètre presque uniforme

$d_{\min} = 0.9 \text{ dm}$ ,  $d_{\max} = 1.1 \text{ dm}$  : épaisseur minimale  $s=1$  à  $3 \text{ dm}$

- Granulométrie étendues avec

$D_{\min} = 0.6 \text{ dm}$ ,  $d_{\max} = 1.6 \text{ dm}$  : épaisseur minimale  $s=1.5 \text{ dm}$  ( $S > d_{\max}$ )

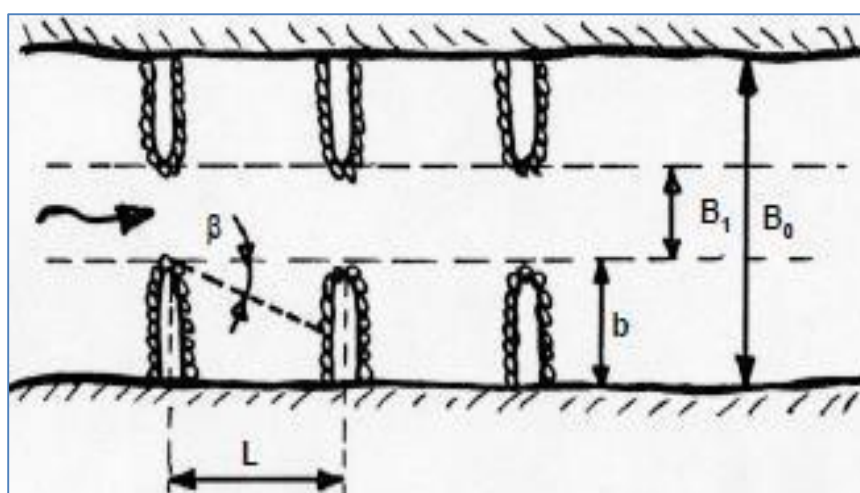
Le pied de l'énrochement doit être fondé à une profondeur suffisante pour résister aux affouillements attendus.



*Figure.III.16.Enrochement pour les rivières en plaine*

#### 7.4. Dimensionnement des épis

- Espacement et longueur des épis



*Figure.III.17.Espacement et longueur des épis*



$$L \leq 4.5 \left( \frac{B_0 - B_1}{2} \right) = 4.5 b$$

Pour  $b = (1/4) L$ , selon les conditions locales les espacements suivants sont recommandés :

- Dans la transition entre un tronçon rectiligne et une courbe :

$$L = \frac{1}{2} \text{ à } \frac{3}{4} B_1$$

- à la rive extérieure dans une courbe :

$$L = 1. B_1$$

- à la rive intérieure dans une courbe

$$L = 1.5 \text{ à } 2 B_1$$

La longueur de l'épis résulte du rétrécissement souhaité  $B_1$  de la rivière pour favoriser le transport solide.  $\beta = 6^\circ \text{ à } 9^\circ$

- **Erosion du lit due à l'effet des épis**

Erosion maximale selon Spanning :

$$\Delta Z_{max} = h_0 \left[ \left( \frac{\tau_0}{\tau_{crit}} \right)^{3/7} \left( \frac{B_0}{\lambda B_1} \right)^{6/7} - 1 \right]$$

Avec ;

$h_0$  : Profondeur d'eau dans la section sans épis ;

$r_0$  : Contrainte du cisaillement au lit dans la section sans épis ;

$B_0$ : Largeur de la section sans épis ;

$B_1$  : Largeur de la section entre les têtes des épis ;

$\lambda$  : Coefficient des épis ;

$A_u$  : section de l'écoulement au-dessus des épis ;

$A_{ges}$  : section totale de l'écoulement (sans épis).

$$\lambda_{gr} = \frac{B_0}{B_1} \left( \frac{\tau_0}{\tau_{crit}} \right)^{1/2}$$

Correspond à la limite supérieure de  $\lambda$  selon l'équation pour  $\Delta Z_{max}=0$

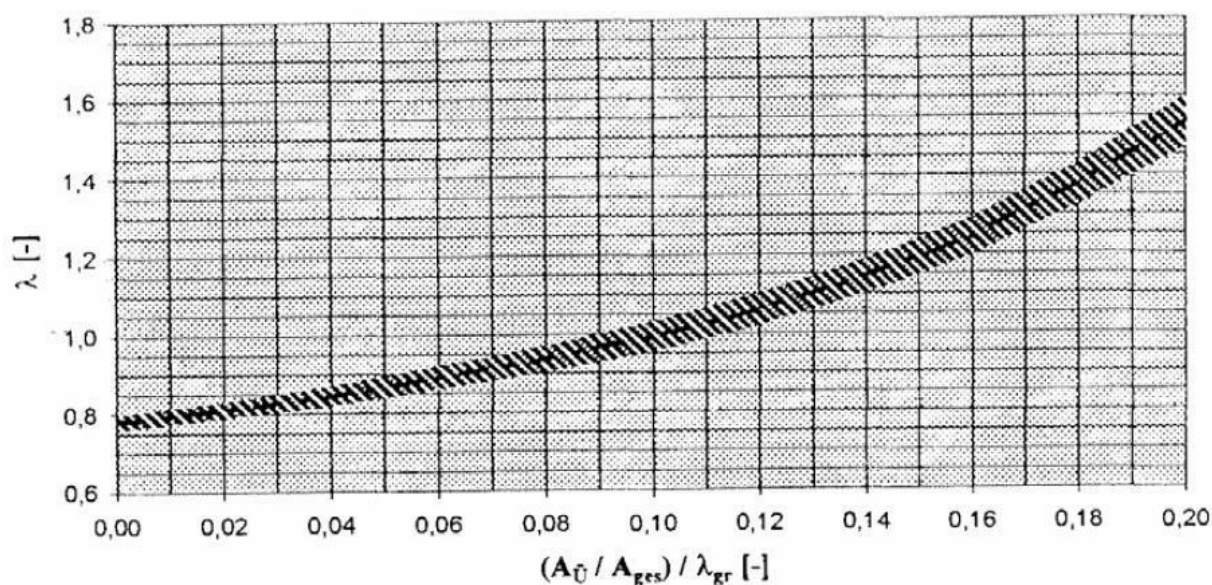


Figure III.18. Coefficient des épis en fonction de la section d'écoulement au-dessus des épis et la section totale de l'écoulement (sans épis)

## 5. Lutte contre l'érosion

La lutte contre l'érosion et le ruissellement des terres agricoles est un enjeu essentiel tant pour la préservation du sol – support vivant de notre alimentation – que pour la préservation de la qualité de nos milieux aquatiques et la protection des biens et des personnes.

- **La modification des pratiques culturales** permet souvent de réduire sensiblement les risques de ruissellement des eaux et d'érosion des sols. Par exemple la pratique du desherbinage avec implantation de ray-grass en inter-rangs offre un couvert hivernal efficace après la récolte de maïs.
- **La diminution de la taille des parcelles** limite les vitesses d'écoulement de l'eau sur les versants.
- **La préservation des prairies** notamment en fonds de vallée permet de favoriser le ralentissement des eaux de ruissellement et de filtrer les particules de terres.
- **La restauration des fossés** en bordure des axes routiers et sur les chemins ruraux permet de drainer les eaux de ruissellement. Les fossés enherbés doivent être privilégiés afin de ralentir la vitesse d'écoulement des eaux jusqu'à l'exutoire.
- **La reconquête du maillage bocager** (haies et talus) participe à la lutte contre l'érosion des sols en assurant des obstacles naturels au ruissellement des eaux et en favorisant la sédimentation des particules de terres charriées.
- **La bande enherbée** en fond de talweg ou perpendiculaire à la pente permet de ralentir les eaux de ruissellement et de piéger les sédiments.

- **Le labour perpendiculaire à la pente**, lorsqu'il est techniquement possible, ralentit le phénomène de ruissellement en empêchant la formation de chemins préférentiels d'accumulation de l'eau.
- **Les cultures intermédiaires** implantées avant une culture de printemps offrent une couverture hivernale efficace qui augmente les capacités d'infiltration du sol durant les périodes les plus pluvieuses.
- **L'absence d'habitations** en zone inondable permet de limiter les risques.
- **Les diguettes végétales (augmenter la végétation)** installées en travers des ravines déjà formées constituent des barrages filtrants et permettent le comblement de la ravine.
- **Les plantations de berges** jouent un rôle tampon aux eaux de ruissellement provenant des versants et permettent de filtrer les sédiments avant leur arrivée à la rivière.
- **Les mares** peuvent jouer, quand elles sont bien localisées sur le bassin versant, le rôle de bassin tampon naturel en stockant une partie des eaux de ruissellement. Elles peuvent ainsi avoir une double vocation hydraulique et d'abreuvement du bétail.

### Conclusion

Dans ce chapitre on a découvert que l'érosion hydrique est une cause majeure de dégradation des sols. Et que l'érosion du sol est un phénomène discontinu dans l'espace et dans le temps, que l'on peut observer à différentes échelles.

Les caractéristiques de la pluie, du ruissellement et du sol, ainsi que la présence et la qualité du couvert végétal sont les principaux facteurs de l'érosion hydrique des sols.

Les études de l'érosion permettent de comprendre les processus, de prévoir les flux et de mettre en place des stratégies de lutte contre l'érosion.

## Chapitre 4. Écoulement à travers les déversoirs

### IV.1. Introduction

Le débit est l'un des paramètres hydrauliques caractérisant les écoulements des liquides dans les canaux et conduites. La mesure du débit est souvent rencontrée dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien. Dans la pratique, les moyens de mesure des débits sont nombreux et chacun d'entre eux présente ses propres particularités, ses avantages et ses inconvénients. Suivant qu'a nature d'écoulement est en charge ou à surface libre. Les moyens de mesure se différent.

Les appareils de mesure de débit dans les canaux ouverts sont nombreux, ils présentent tous une loi *hauteur- débit unique*. Actuellement les méthodes qui permettent de mesurer le débit différent, parmi les appareils qui sont utilisés pour la mesure du débit à l'air libre, un grand nombre sont des structures hydrauliques appartenant à la famille des déversoirs et des canaux.

Ce chapitre a pour but de décrire le fonctionnement hydraulique des déversoirs à paroi mince et à paroi épaisse et de recenser l'ensemble des formules de débit notamment, afin de faciliter la compréhension de l'utilisation de ces ouvrages et de leur dimensionnement.

### IV.2. Définition

Les déversoirs comptent parmi les plus simples et les plus anciens appareils de mesure de débit. Ce sont des structures hydrauliques formant un obstacle par exemple une paroi verticale disposée en travers de l'écoulement et comportant une ouverture de forme particulière, elle peut être rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale ou même circulaire. Aussi elle peut être à paroi mince ou à paroi épaisse.

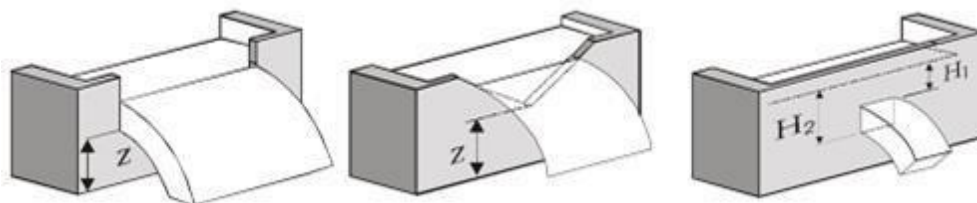


Figure IV.1. Différent types de déversoirs.

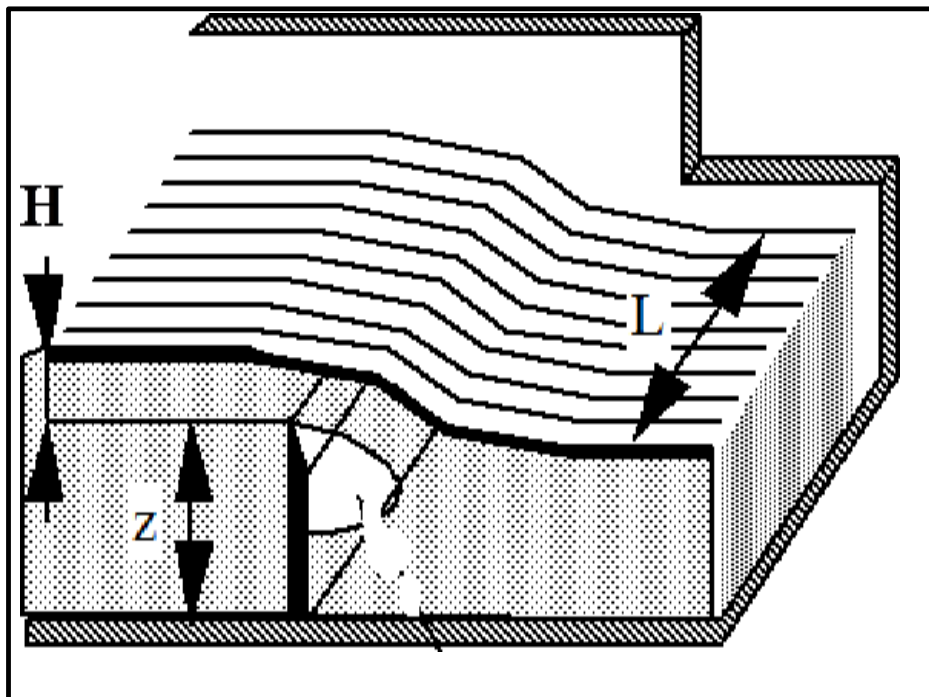
Le débit est déterminé à partir d'une simple lecture limnimétrique du plan d'eau amont au-dessus de l'arête du déversoir.

Le déversoir remplit deux tâches importantes dans le fonctionnement du seuil. D'abord il concentre l'écoulement vers le centre du cours d'eau évitant ainsi l'affouillement

des berges. Puis, s'il a été choisi judicieusement, il permet également de créer une zone de courant lent en amont du seuil, limitant la vitesse d'écoulement à une vitesse inférieure à la vitesse maximale permise. Le déversoir évite donc de devoir protéger cette partie du cours d'eau.

À cause de sa forme, Pour ce qui est de l'écoulement obtenu, le déversoir trapézoïdal limite la hauteur d'eau en amont du seuil en comparaison avec le déversoir rectangulaire car sa largeur au miroir croit avec une augmentation du débit. Quant au déversoir à section composée, il assure une bonne efficacité hydraulique à grand débit grâce à une hauteur moyenne du seuil élevée tout en permettant, même à petit débit, la migration des poissons par la section basse et étroite du déversoir.

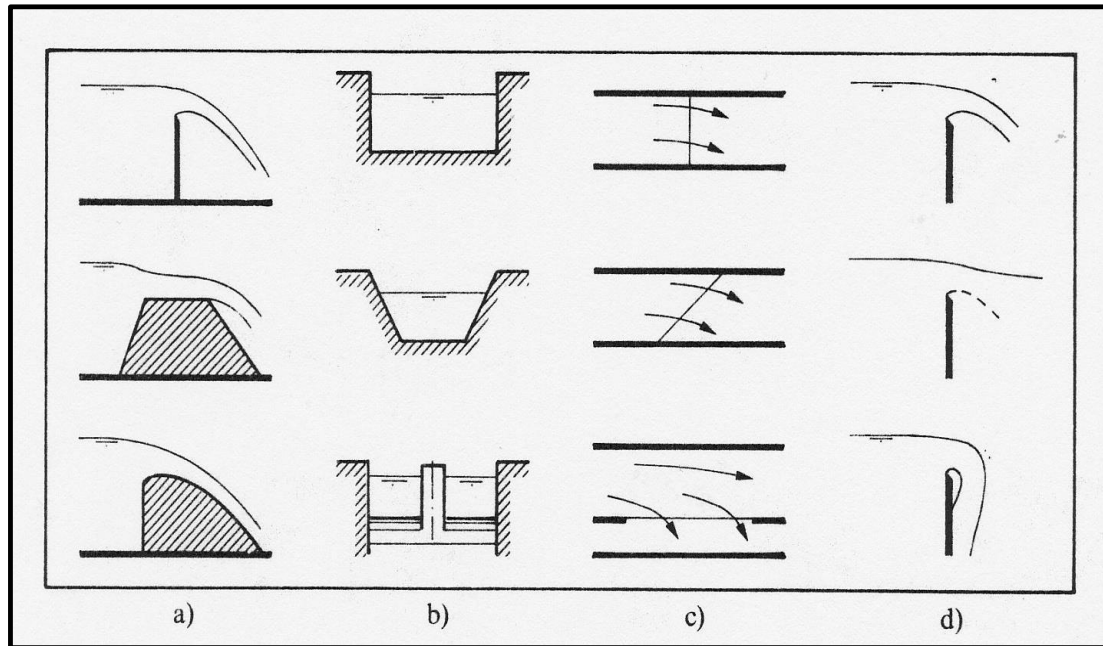
Un déversoir peut être assimilé à un orifice superficiel ouvert à sa partie supérieure et pratiqué généralement dans une paroi verticale. Le plan d'eau, à une certaine distance en amont du déversoir, peut être considéré comme horizontal ; la différence de cote  $H$  entre le plan d'eau et le seuil est la charge.



*Figure IV.2. Vue longitudinale d'un déversoir.*

### IV.3. Différents types de déversoir

Les déversoirs comportant une ouverture de forme particulière, elle peut être rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale ou même circulaire.



*Figure IV.3 Différents types de déversoir.*

- a) Coupe longitudinale (en mince paroi, à seuil épais, à crête arrondie)
- b) Coupe transversale (profil rectangulaire, trapézoïdal, rectangulaire avec pilier)
- c) Vue en plan crête perpendiculaire et oblique à l'axe, déversoir latéral
- d) Types d'écoulement (dénoyé, noyé, adhérent).

CLASSIFICATION GENERALE DES DEVERSOIRS	
CRITERE	TYPE DE DEVERSOIRS
FORME DE LA PAROI	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>paroi mince</p> <p><math>\frac{d}{h}</math> petit</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>crête arrondie</p> <p>forte courbure <math>r &lt; h</math></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>faible courbure <math>r \gg h</math></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>seuil épais</p> <p><math>3h &lt; l &lt; 8h</math></p> </div> </div>
CONTRACTION LATÉRALE	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> </div> <div style="flex: 1;"> <p>Type de contraction</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① pas de contraction <math>b=B</math></li> <li>② contraction incomplète <math>b &gt; \frac{B}{3}</math></li> <li>③ contraction complète <math>b &lt; \frac{B}{3}</math></li> <li>④ contraction partielle</li> </ul> <p style="font-size: small;"> <span style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-right: 5px;">} disposition</span> symétrique  <span style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-right: 5px;">} disposition</span> asymétrique                 </p> </div> </div>
FORME EN PLAN	<p style="text-align: center;">frontal      latéraux      polygonaux      courbes</p>
FORME EN ELEVATION	<p style="text-align: center;">rectangulaire    trapézoïdal    triangulaire    circulaire    hyperbolique    composé</p>
FORME DE LA NAPPE DEVERSANTE	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>adhérente</p> <p>stable    instable</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>déprimée</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>libre</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>ondulée</p> </div> </div>
POSITION DU NIVEAU AVAL	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>au-dessous de la crête</p> <p>déversement parfait - déversoir dénoyé</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>au-dessus de la crête</p> <p>déversement imparfait - déversoir noyé</p> </div> </div>

Figure IV.4. Classification des déversoirs.

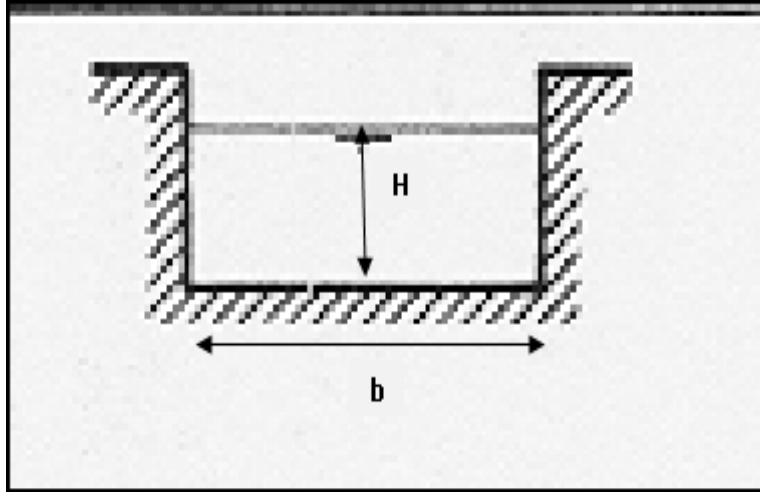




### IV.3.2. Selon la forme de l'ouverture

#### IV.3.2.1 Forme rectangulaire

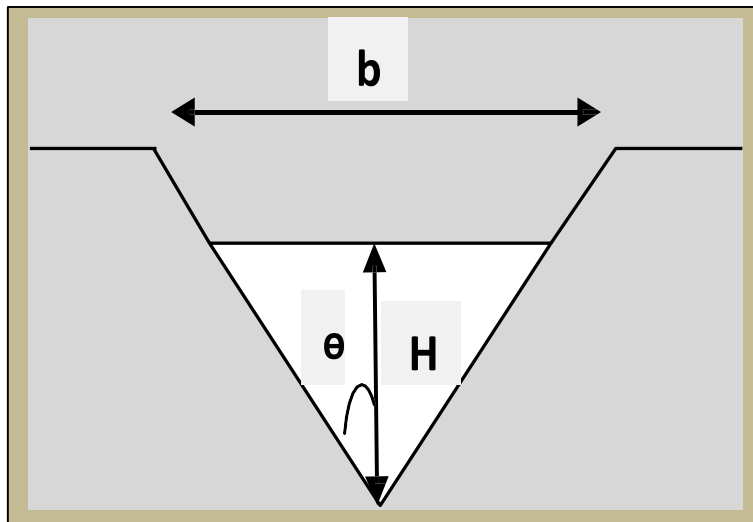
Le déversoir rectangulaire est le plus classique, qui a été le mieux étudié, de part sa géométrie simple.



*Figure IV.7. Déversoir de forme rectangulaire*

#### IV.3.2.2 Forme triangulaire

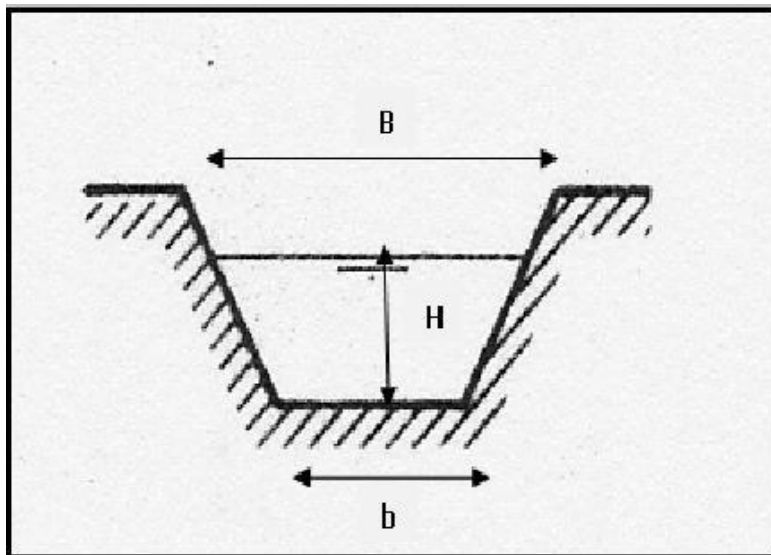
Ce déversoir à une ouverture de forme d'un triangle.



*Figure IV.8. Déversoir de forme triangulaire.*

#### IV.3.2.3 Forme trapézoïdale

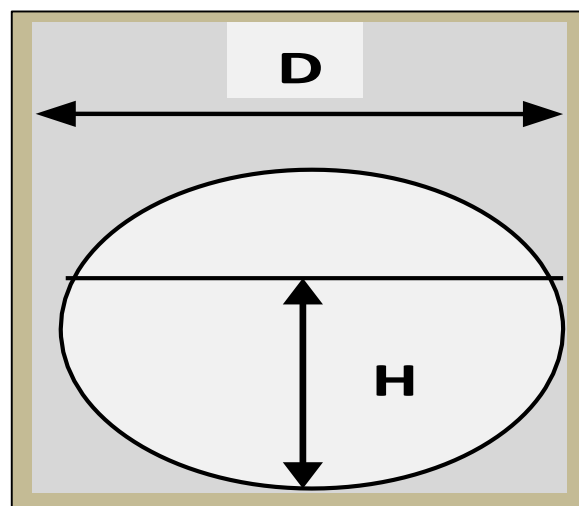
Ce déversoir à une ouverture de forme d'un trapèze.



*Figure IV.9. Déversoir de forme trapézoïdale.*

#### IV.3.2.4 Forme circulaire

Ce déversoir à une ouverture de forme d'un cercle.



*Figure IV.10. Déversoir de forme circulaire.*

#### IV.3.3 Selon les contractions

##### IV.3.3.1 Déversoirs sans contraction latéral

Un déversoir est dit « sans contraction latérale » lorsque la largeur d'écoulement sur le déversoir ( $b$ ) est égale à la largeur d'écoulement ( $B$ ) en amont du déversoir (du canal) (figure suivante).

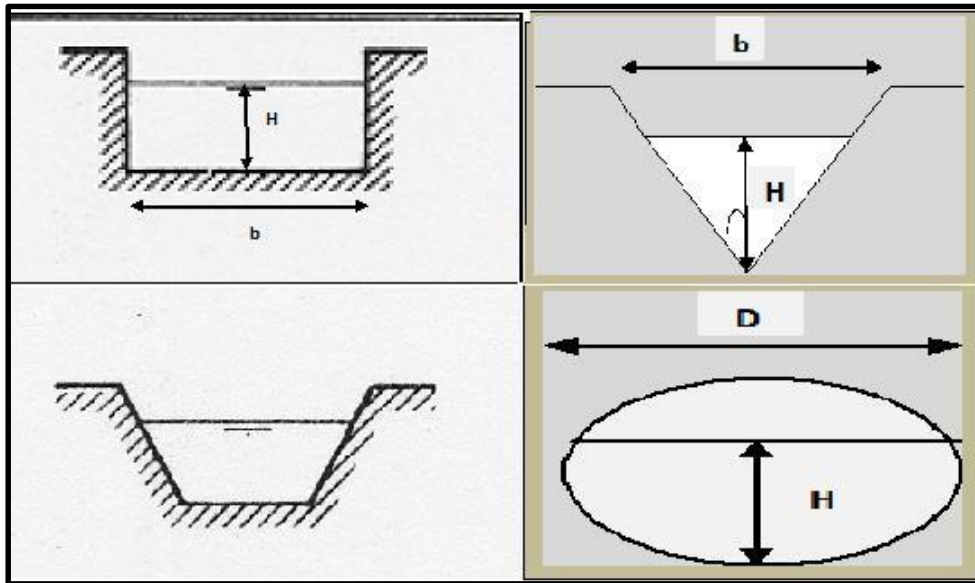


Figure IV.11. Schéma de définition et détails du déversoir en mince paroi sans contraction latérale

#### IV.3.3.2 Déversoirs avec contraction latéral

On peut dire un déversoir avec contraction latéral lorsque la largeur du seuil ( $b$ ) est différente de la largeur du canal ( $B$ ) ( $b \neq B$ ).

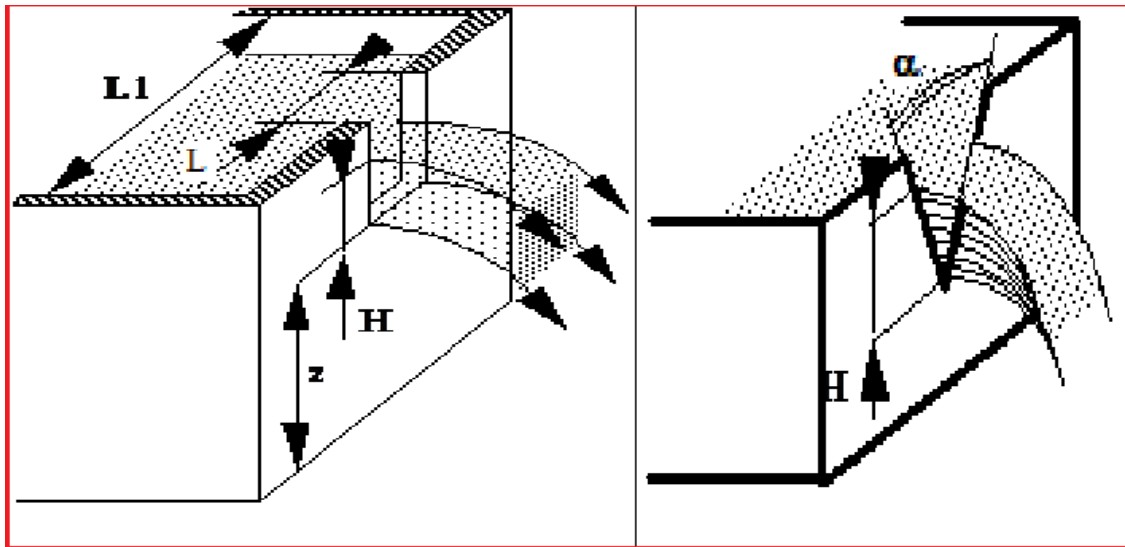


Figure IV.12. Déversoir en mince paroi avec contraction latérale

Le cas le plus généralement rencontré en pratique est le déversoir rectangulaire en mince paroi avec contraction latérale.

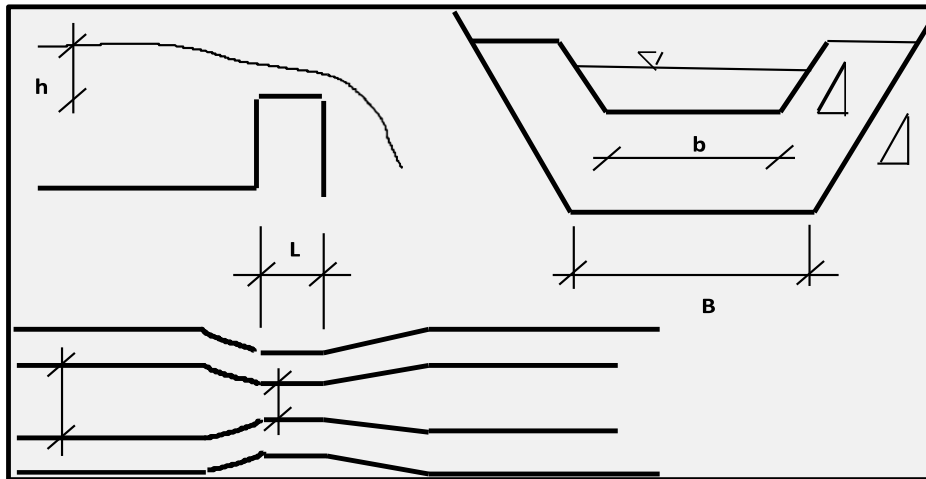


Figure IV.13. Schéma de définition du déversoir en mince paroi avec contraction latérale.

### IV.4. Equations des déversoirs

#### IV.4.1. Equations des déversoirs à paroi mince

On applique le **théorème de Bernoulli** entre les points A de la surface et B de la section contractée.

$$P_B = \rho g H_1 + P_{atm}$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \Sigma \Delta H_{1-2}$$

Où  $V_1$ : représente la vitesse moyenne des particules s'approchant de l'ouverture ;

$$P_1 = P_2 = P_{atm}$$

Ainsi que la vitesse idéale est obtenue pour  $\Sigma \Delta H_{1-2} = 0$

$$\frac{P_{atm}}{\rho g} + Z_A = \frac{P_{atm}}{\rho g} + H_1 + Z_B + \frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{V^2}{2g} = Z_A - Z_B - H_1$$

$$\frac{V^2}{2g} = H$$

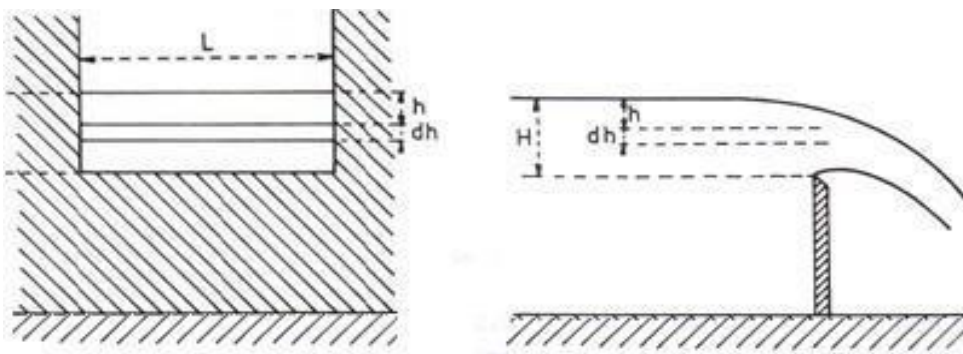


Figure IV.14. Débit du déversoir rectangulaire à crête mince

Le théorème de Bernoulli appliqué entre un point de vitesse négligeable situé sur la surface libre à l'amont, origine du filet liquide passant par la tranche de nappe considérée et le point de vitesse  $V$  situé dans cette tranche et en négligeant la perte de charge entre ces deux points. Par application du théorème de Bernoulli, la vitesse en un point du plan vertical de la crête, situé à une profondeur  $h$  au-dessous du plan d'eau amont, est :

$$V = \sqrt{2gH}$$

Le débit du déversoir sera donc :

$$Q = \mu S \sqrt{2gH} \quad (\text{IV.1})$$

( $S$  = section mouillée ;  $\mu$  = coefficient de débit)

#### IV.4.1.1 Déversoir rectangulaire sans contraction latérale

Un déversoir rectangulaire est dit « sans contraction latérale » lorsque la largeur d'écoulement sur le déversoir ( $b$ ) est égale à la largeur d'écoulement ( $B$ ) en amont du déversoir (figure suivante). Dans ce qui suit on va donner les principales expressions du coefficient de débit pour ce type de déversoirs.

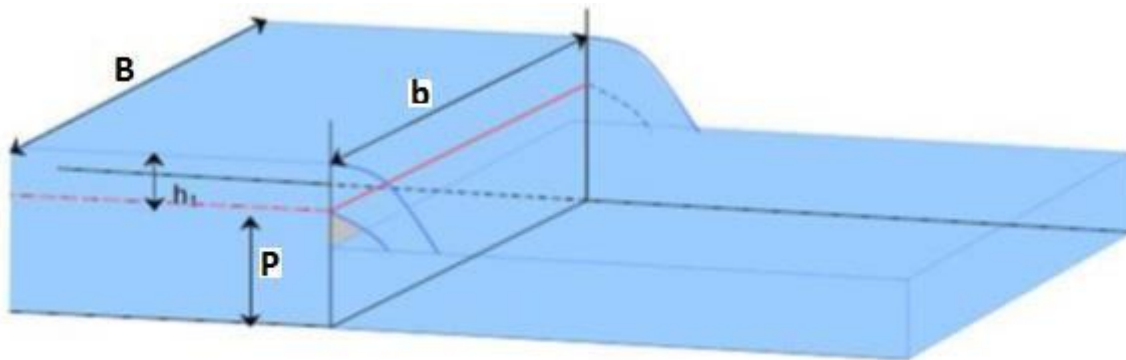


Figure IV.15. Vue en perspective d'un déversoir rectangulaire sans contraction latérale.

Dans le cas d'un déversoir rectangulaire sans contraction latérale et à nappe libre, **Bazin** a donné pour  $\mu$  la relation suivante :

$$\mu = \left[ 0,405 + \frac{0,003}{H} \right] \left[ 1 + 0,55 \left( \frac{H}{H+p} \right)^2 \right]$$

( $H$  : charge ;  $p$  : hauteur de pelle)

Le débit est donc :

$$Q = \frac{2}{3} \mu B H \sqrt{2gH} \quad (\text{IV.2})$$

Dans les limites où :

$$0,08 \text{ m} < \mathbf{H} < 0,70 \text{ m}, \mathbf{B} > 4 \text{ H} \text{ et } 0,2 \text{ m} < \mathbf{p} < 2 \text{ m}$$

En première approximation, on prendra  $\mu = 0,43$ .

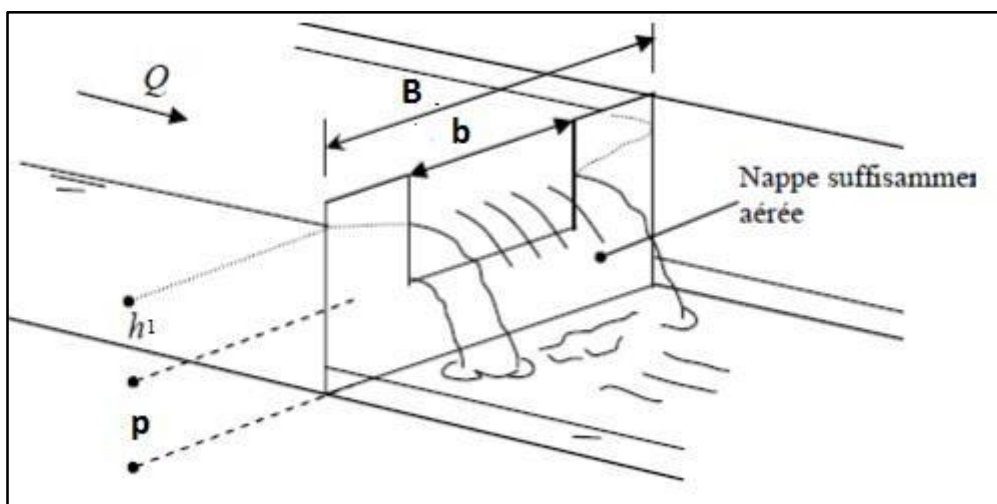
Plusieurs relations du coefficient du débit ont été proposées par le passé et dont les plus importantes sont regroupées dans le tableau (IV.1):

*Tableau IV.1 Coefficient de débit selon l'équation IV.2 selon quelques auteurs et leurs limites d'application.*

Auteur	Année	Coefficient de débit $\mu$	Limite d'application	$N=^\circ$
Bazin	1888 1898	$\mu = 0,6075 \left( 1 + \frac{0,074}{h} \right) \left[ 1 + 0,55 \left( \frac{h}{h+P} \right)^2 \right]$	$0,08\text{m} < h < 0,70\text{m}$ $B > 4h$ $0,2\text{m} < P < 2\text{m}$	1.4
Rehbock	1913 1929	$\mu = 0,6050 \left( 1 + \frac{0,0019}{h} \right) \left( 1 + 0,138 \frac{h}{P} \right)$	$h > 0,05\text{m}$	1.5
SIA	1924	$\mu = 0,615 \left( 1 + \frac{0,001}{h} \right) \left[ 1 + 0,5 \left( \frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$	$0,025\text{m} < h < 0,8\text{m}$ $P < 0,30\text{m}$ $h \leq p$	1.6
Kindsvater-Carter	1957	$\mu = 0,602 \left( 1 + 0,125 \frac{h}{P} \right)$	$L \geq 0,15\text{m}, h \geq 0,03\text{m}$ $h/P \leq 2$	1.7
Sarginson	1972 1973	$\mu = 0,613 \left( 1 + \frac{2,33}{W} + 0,122 \frac{h}{P} \right)$		1.8

#### 4.1.2 Déversoir rectangulaire avec contraction latérale

Le cas le plus usuel du déversoir rectangulaire à crête mince avec contraction latérale est représenté par la figure suivante :



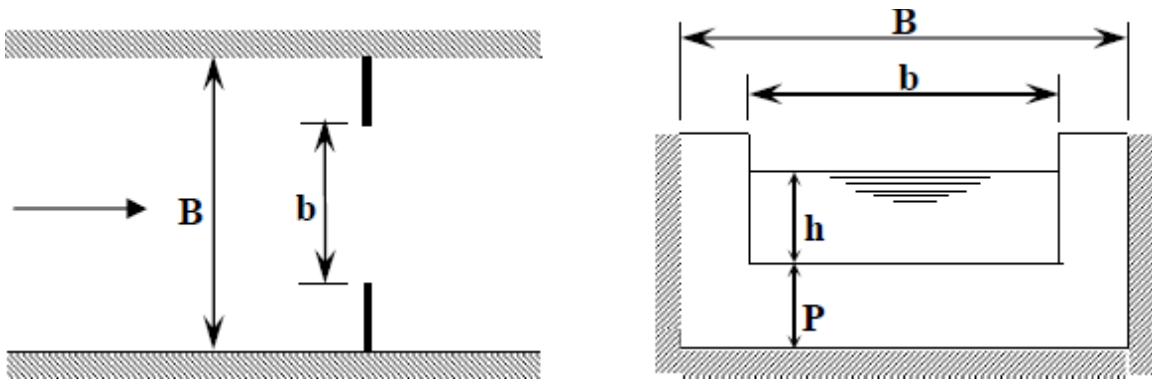


Figure IV.16. Déversoir rectangulaire en mince paroi avec contraction latérale.

La largeur  $b$  de l'échancrure du déversoir est inférieure à la largeur  $B$  du canal d'amenée de forme rectangulaire.

On dit qu'il y a contraction latérale lorsque la largeur  $B$  du canal est supérieure à la largeur  $b$  du déversoir, ce qui définit la valeur du taux de contraction  $\beta = b/B$ .

Le débit est donc :

$$Q = \mu \sqrt{2g} B h^{3/2} \quad (IV.3)$$

Pour ce type de déversoir de très nombreux tests ont été effectués par (SIA, 1926). Ces tests ont montrés que le débit unitaire  $Q$  pouvait être calculé en application de la relation précédente.

- Pour un taux de contraction  $0,30 < \beta < 1$ ,
- Une hauteur de pelle  $P \geq 0,30\text{m}$  ;

La relation du coefficient du débit  $\mu$  s'écrit :

$$\mu = 0,578 \left[ 1 + 0,065 \beta^2 + \frac{(6,25 - 5,19 \beta^2)}{1000 (h + 0,016)} \right] + \left[ 1 + 0,5 \beta^4 \left( \frac{h}{h + P} \right)^2 \right]$$

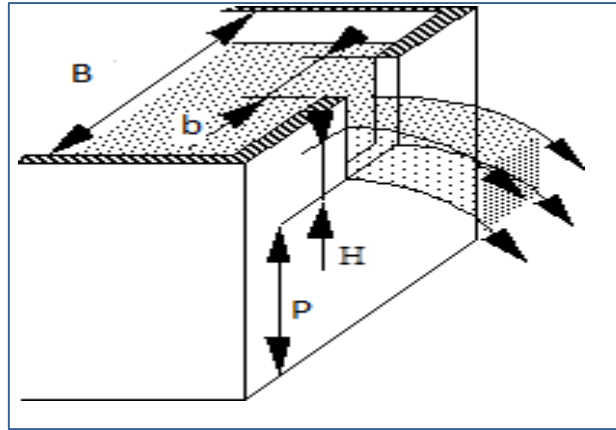


Figure IV.17. Déversoir rectangulaire en mince paroi avec contraction latérale

D'après Hégly :

$$\mu = \left[ 0,405 + \frac{0,0027}{h} - 0,03 \left( 1 + \frac{B-b}{B} \right) \right] \left[ 1 + 0,55 \left( \frac{B-b}{h+P} \right)^2 \right]$$

Dans les limites d'applications où :

$$0,1 \text{ m} < H < 0,6 \text{ m}$$

$$0,4 \text{ m} < B < 1,8 \text{ m}$$

$$0,4 \text{ m} < P < 0,8 \text{ m}$$

$$0 < \frac{B-b}{B} < 0,9$$

Ci-dessous, dans le tableau IV.3, figurent quelques expressions du coefficient de débit  $\mu$  suivant le rapport entre la largeur à l'amont du déversoir (B) et la largeur d'écoulement sur le déversoir (b):

Tableau IV.2. Valeurs de coefficient de débit suivant le rapport b/ B pour un déversoir rectangulaire avec contraction latérale .

$L/L_1$	1	0,9	0,8	0,7
$\mu$	$\frac{2}{3} \left( 0,602 + 0,075 \frac{h_1}{P} \right)$	$\frac{2}{3} \left( 0,599 + 0,064 \frac{h_1}{P} \right)$	$\frac{2}{3} \left( 0,597 + 0,045 \frac{h_1}{P} \right)$	$\frac{2}{3} \left( 0,595 + 0,030 \frac{h_1}{P} \right)$
$L/L_1$	0,6	0,5	0,4	0,3
$\mu$	$\frac{2}{3} \left( 0,593 + 0,018 \frac{h_1}{P} \right)$	$\frac{2}{3} \left( 0,592 + 0,011 \frac{h_1}{P} \right)$	$\frac{2}{3} \left( 0,591 + 0,0058 \frac{h_1}{P} \right)$	$\frac{2}{3} \left( 0,590 + 0,0020 \frac{h_1}{P} \right)$
$L/L_1$	0,2	0,1	0 (à titre indicatif)	
$\mu$	$\frac{2}{3} \left( 0,588 - 0,0018 \frac{h_1}{P} \right)$	$\frac{2}{3} \left( 0,588 - 0,0021 \frac{h_1}{P} \right)$	$\frac{2}{3} \left( 0,587 - 0,0023 \frac{h_1}{P} \right)$	

Où  $\mu$ ,  $h_1$  et P sont respectivement le coefficient de débit, la charge en amont et la hauteur de pelle.



### IV.4.1.3 Déversoir triangulaire

Le dispositif est représenté par une plaque verticale mince disposée en travers de l'écoulement dans un canal généralement de forme rectangulaire de largeur  $B$ , dont le profil de l'échancrure est un triangle d'angle d'ouverture  $\theta$ .

Le déversoir est représenté schématiquement par la figure (IV.18)

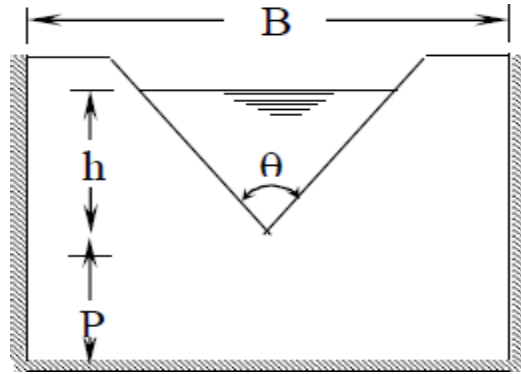


Figure IV.18 : Déversoir triangulaire en mince paroi.

Plusieurs formules ont été proposées pour estimer le débit, donc on a :

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \left( \frac{\theta}{2} \right) H^{5/2} \quad (\text{IV.4})$$

Thomson (1861) a proposé :

$$Q = 1,14 H^{5/2} \quad (\text{IV.5})$$

Cette dernière est applicable pour  $0,05 \leq H \leq 0,25$  m,  $p \geq 0,2$  m et  $V_0 \leq 0,5$  m/s. Cette formule a été extraite pour une valeur de  $\mu = 0,593$ .

❖ La contraction est dite pleine lorsque la hauteur relative :

$$\frac{h}{P} \leq 0,40 \quad \text{et que} \quad \frac{P}{B} \leq 20$$

Dans ce cas le coefficient de débit  $\mu$  ne dépend que de l'angle d'ouverture  $\theta$ . Le tableau suivant (IV.3) regroupe les valeurs de  $\mu$  pour quelques valeurs de  $\theta$  :

Tableau IV.3 coefficient de débit  $\mu$  de l'équation (IV.4) en fonction de  $\theta$

$\theta$	20	40	60	80	90	100
$\mu$	0,597	0,582	0,577	0,577	0,578	0,580

La figure ci-après représente la variation du coefficient de débit  $\mu$  en fonction de l'angle

d'ouverture de l'échancrure  $\theta$  mentionné précédemment dans le tableau (IV.3).

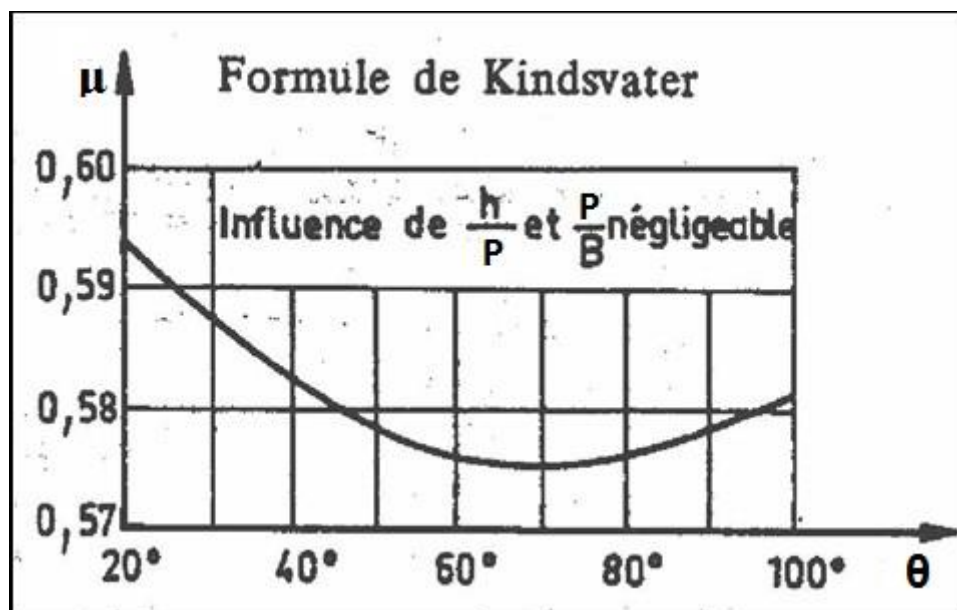


Figure IV.19. Variation du coefficient de débit en fonction de l'angle de l'ouverture de l'échancrure d'un déversoir triangulaire à paroi mince pour une contraction pleine.

D'après la figure (IV.19) on remarque que la courbe obtenue est en forme de cloche composée de deux branches une ascendante et l'autre descendante, et représente un minimum de  $\theta$  et de  $\mu$ , pour  $\theta=70^\circ$   $\mu=0,577$ .

- ❖ La contraction est dite partielle lorsque :
  - La hauteur relative  $h/P \leq 1,20$  et que  $h/B \leq 0,40$
  - La hauteur de la lame d'eau  $0,05 \leq h \leq 0,60$  m
  - La hauteur de pelle  $P \geq 0,10$  m
  - La largeur du canal d'amenée  $B \geq 0,60$  m.

La vitesse d'approche ainsi que la largeur B du canal d'amenée, ont alors un effet très important sur le coefficient de débit. Pour illustrer cet effet Kindsvater a effectué des essais sur un déversoir triangulaire a angle d'ouverture d'échancrure  $\theta=90^\circ$ .

La figure (IV.20) représente pour un angle d'ouverture  $\theta=90^\circ$  la variation du coefficient de débit en fonction de P/B et h/B. Il est à noter que le canal d'amenée doit être de forme rectangulaire ou pouvant être assimilé comme tel.

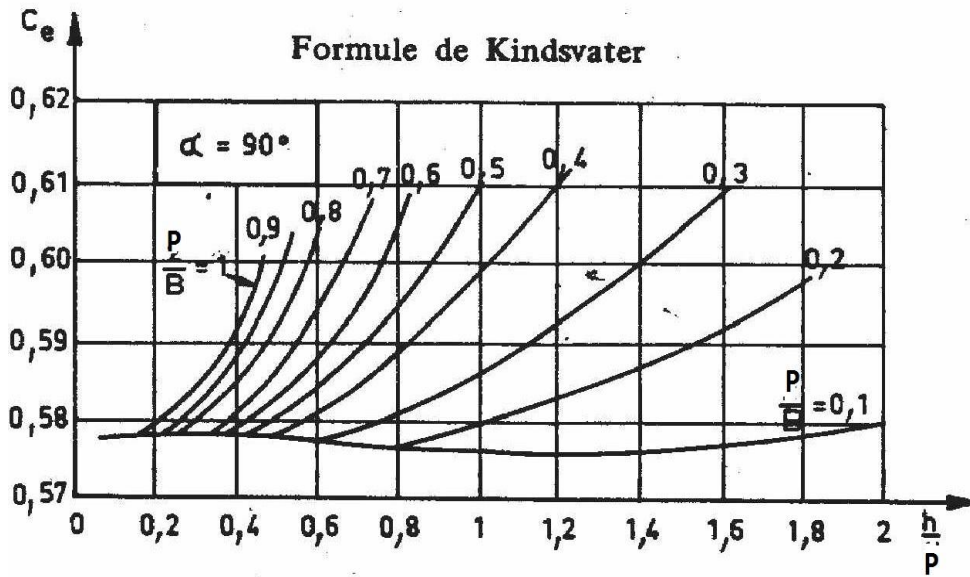


Figure IV.20. Valeurs du coefficient de débit pour  $\theta=90^\circ$  en fonction de  $h/P$  et  $P/B$ , selon Kindsvater

IV.4.1.4 Déversoir trapézoïdal

Dans ce type de déversoir la forme de l'échancrure est un trapèze isocèle envasé vers le haut ou vers le bas, la figure suivante montre schématiquement la forme du déversoir.

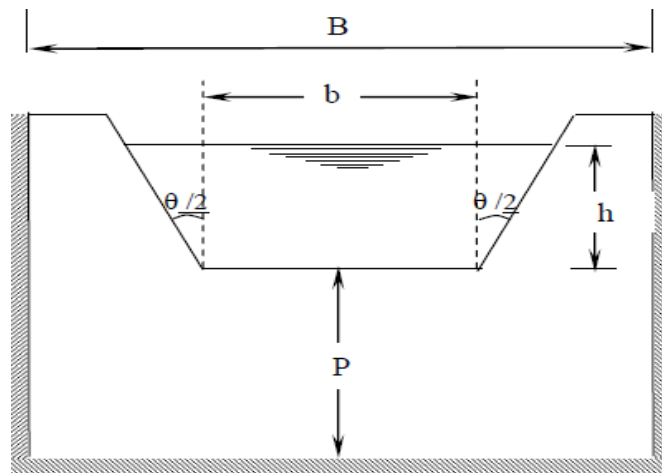


Figure IV.21. Déversoir trapézoïdal –Schéma de définition

Dans le cas d'un déversoir trapézoïdal évasé vers le haut, le débit est la somme du débit d'un déversoir rectangulaire et triangulaire :

$$Q = \left(\frac{2}{3} B \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}}\right) + \left(\frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg}(\theta) H^{\frac{5}{2}}\right) \tag{IV.6}$$

Dans le cas d'un déversoir trapézoïdal évasé vers le bas, le débit est égale le débit d'un déversoir rectangulaire moins le débit d'un déversoir triangulaire :

$$Q = \left( \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \right) - \left( \frac{2}{15} \mu \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \tan^2 \theta \right)$$

Le déversoir le plus fréquemment utilisé est celui de (Cipolett, 1963), dont la crête est constituée par la plus petite base  $b$  et d'angle d'inclinaison  $\theta$  tel que  $\tan \theta = 1/4$ , ce qui permet de compenser l'influence de contraction due aux joues par l'augmentation de la largeur de la surface libre de manière à conservé le plus possible un coefficient de débit  $\mu$  constant pour une large gamme de la variation de la charge  $H$ .

La relation générale du débit pour un déversoir de type Cipolletti est donnée par :

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{IV.8})$$

Pour un angle  $\theta$  de fruit du talus égal à  $14^\circ \Rightarrow \tan \theta = 0,24932800$  selon l'expérience de **Cipollet** le coefficient de débit  $m_{\text{trpz}} = \frac{2}{3} \mu = 0,4$  donc :

$$Q = 1,86 b H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{IV.9})$$

Pour une valeur quelconque de l'angle d'inclinaison des joues du déversoir sur la verticale (**Gourley et Crimp**) ont donné la formule suivante pour le calcul du débit :

$$Q = 1,32 H^{2,47} \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) + 1,69 b^{1,02} H^{1,47} \quad (\text{IV.10})$$

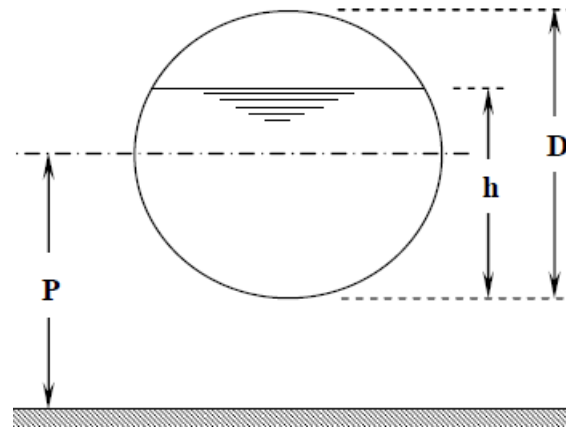
$b$  : est la petite base du trapèze ;

$H$  : la hauteur d'écoulement

#### IV.4.1.5. Déversoir circulaire

Le déversoir circulaire a fait l'objet de plusieurs études, vues les avantages qu'il présente, une simplicité et une facilité d'exécution (il n'y a ni à placé le seuil parfaitement horizontal comme pour le déversoir rectangulaire ni à placer la bissectrice parfaitement verticale tel est le cas pour le déversoir triangulaire) et une précision meilleure pour la mesure des petits débits.

Le déversoir est de forme circulaire de diamètre  $D$  et de hauteur d'écoulement  $h$ , la figure ci-après représente schématiquement le déversoir circulaire à paroi mince.



*Figure IV.22. Déversoir circulaire –Schéma de définition*

D'après les résultats de Stauss et Von Sanden, la forme générale de la formule de débit est donnée par :

$$Q = C K D^{\frac{5}{2}} \quad (\text{IV.11})$$

**D** : est le diamètre du cercle

**K** : est fonction du taux de remplissage  $h/D$ , dont la valeur dépend des considérations théoriques, il est donné par des tables numériques ou par application de la formule de **RAMPONI** qui s'écrit :

$$K = 3,203 \left( \frac{h}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{h}{D} \right)^{3,78}$$

**C** : coefficient expérimental, il est fonction des rapports  $h/D$

En 1930, **STAUSS** a donné la formule suivante pour le calcul de **C** :

$$C = \left[ 0,555 + \frac{D}{110h} + 0,041 \frac{h}{D} \right] \left[ \frac{2D}{L} \right]^{0,0625}$$

Ainsi (**JORISSEN, 1941**) a proposé pour  $0,10\text{m} < D < 1\text{m}$  et  $L/P < 2$  ;

Avec **L** : largeur du canal d'amenée, **P** est la hauteur de pelle. La valeur du coefficient **C** donnée par :

$$C = \left[ 0,558 D^{-0,025} + 0,08 - \frac{\omega}{10Dh} \right] \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{\Omega} \right)^2 \right]$$

#### IV.4.2. Equations des déversoirs à seuil épais

Comparé au déversoir à paroi mince le paramètre supplémentaire est l'épaisseur de la paroi. On désigne par déversoir à seuil épais un déversoir dans lequel l'écoulement de la crête peut être assimilé à un écoulement dans un canal de faible longueur ou, les filets liquides sont considérés pratiquement parallèles tel qu'on peut admettre une distribution hydrostatique des pressions dans la section de contrôle ou l'écoulement passe par un régime critique.

La figure suivante présente le profil d'un déversoir à seuil épais :

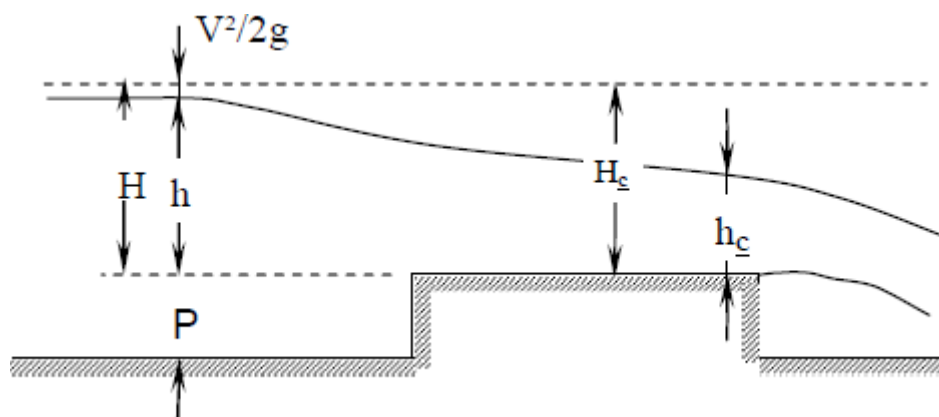


Figure IV.23. Déversoir à paroi épaisse –Schéma de description

##### IV.4.2.1. Déversoir rectangulaire à paroi épaisse sans contraction latérale

Le seuil est de forme régulière représenté par un rectangle de hauteur  $a$  de largeur  $B$  qui est celle du canal d'amenée et longueur du seuil  $L_c$ , il est représenté schématiquement par la figure (IV.24).

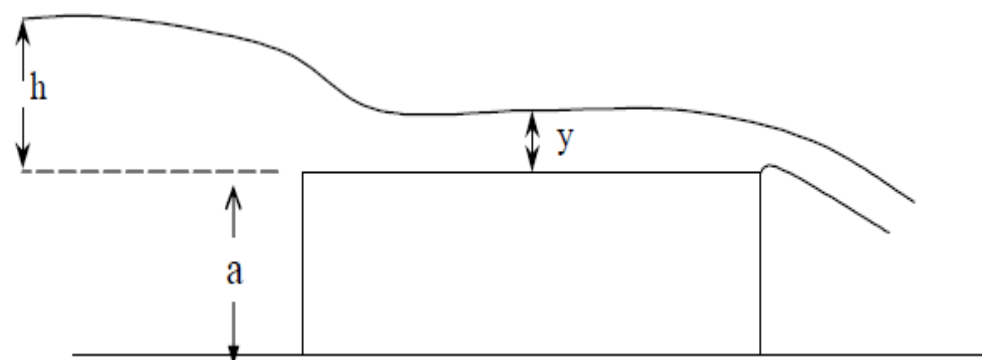


Figure IV.24. Écoulement par-dessus un seuil à paroi épaisse

L'écoulement sur les seuils s'effectue sans variation de la profondeur  $h$  qui est inférieure à la charge  $H$ . Deux problèmes essentiels sont à examiner :

- 1) Détermination de la profondeur d'eau,  $h$ , sur le seuil.
- 2) Détermination du coefficient de débit  $m$ .

La théorie des déversoirs à large seuil est exposée en 1er par Bélanger à la moitié du 19 cycle, il est parti de l'hypothèse de débit maximum.

Le principe de Bélanger qui consiste à dire que la profondeur  $h$  sur le seuil, pour n'importe quelle charge  $H$ , est fixée pour laquelle passe le débit maximum par le déversoir. Cette hypothèse ne doit pas en principe appelée l'objection et permet de résoudre simplement le problème relatif à la profondeur d'eau sur le seuil du déversoir.

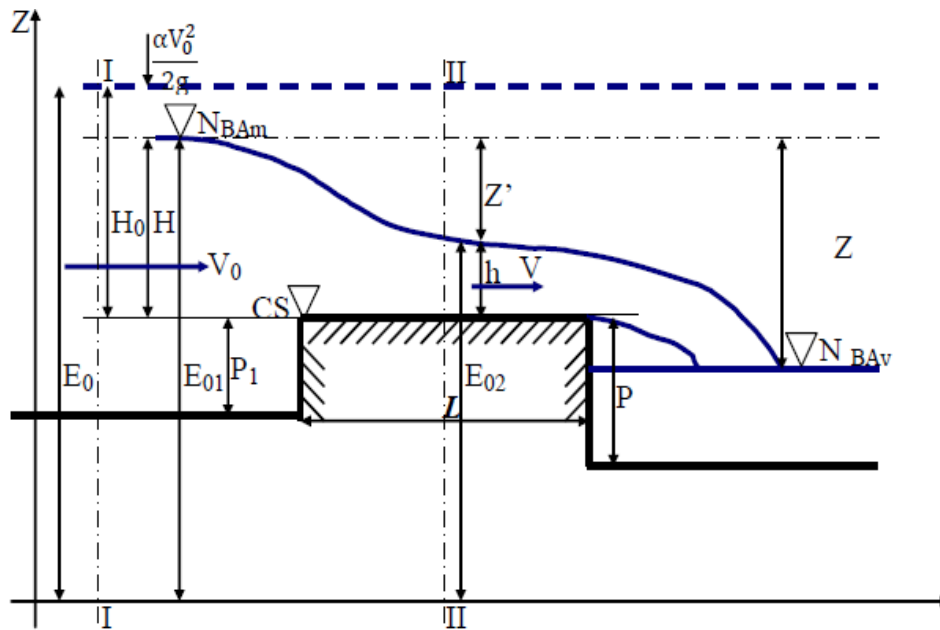


Figure IV. 25. Déversoir à large seuil –Schéma de description-

De la notion de débit maximum, Bélanger a établi que sur un très large seuil horizontal, on devrait avoir :

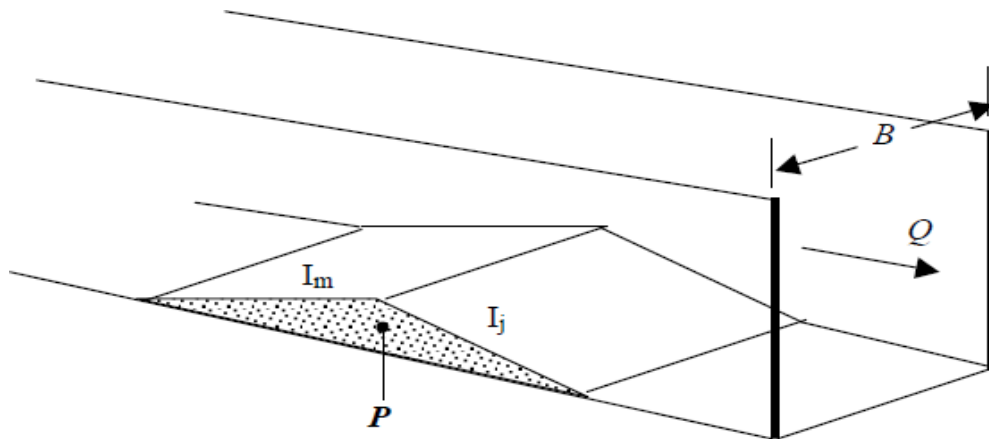
$$Q = \frac{2}{3\sqrt{3}} L H^2 \sqrt{2g} \tag{IV.12}$$

Où L : est la largeur du seuil. On peut donc conclure que le coefficient de débit est égal à **0,385**

$$2 = 0,385 L \sqrt[3]{2g} \tag{IV.13}$$

#### IV.4.2.2. Déversoir à seuil épais à profil en long triangulaire

Il s'agit d'un déversoir créant une contraction verticale de l'écoulement par sa surélévation en formant un seuil dit " seuil épais " (figure IV.26). Il est en général inséré dans un canal d'amenée de section rectangulaire et l'écoulement s'y étend sur toute la largeur et reste en contact avec le seuil sur une certaine longueur.



*Figure IV.26. Représentation schématique du déversoir à paroi épaisse a profil en long triangulaire.*

Le bon fonctionnement de l'appareil est conditionné par les quatre combinaisons suivantes des pentes des parements amont et aval  $I_m$  et  $I_j$  :

*Tableau IV.4. Valeur de pentes amont et aval du déversoir à seuil épais à profil triangulaire type Bazin.*

$I_m$	1/1	1/1	1/1	1/2
$I_j$	1/1	1/2	1/3	1/2

Le débit passant par l'appareil se calcule par la relation suivante :

$$Q = \mu B H^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \quad (\text{IV.14})$$

Rappelons que  $\mu$  est le coefficient de débit et que  $B$  est la largeur du canal dans lequel est inséré le dispositif de mesure. La profondeur  $h$  correspond à l'épaisseur de la lame d'eau.



---

## Chapitre 5. Ouvrages de protection contre les crues

### V.1. Introduction

Depuis que l'homme s'est installé sur les berges des cours d'eau, il a toujours essayé de les domestiquer. Il a entrepris différents aménagements plus ou moins agressif, qui ont comme tout aménagement d'un cours d'eau des conséquences hydro morphologiques.

La problématique des risques naturels et plus particulièrement du risque d'inondation est un sujet d'actualité en Algérie et dans le monde entier, notamment au regard des dernières grandes crues catastrophiques. Les risques d'inondations sont dus à l'interaction complexe de plusieurs facteurs, c'est le résultat de la concordance de paramètres topographiques, géologiques, hydrologiques et météorologiques. Donc la gestion de ce risque devient de plus en plus une nécessité qui doit impliquer tous les acteurs concernés (décideurs, techniciens et population) afin d'identifier les enjeux à protéger, les moyens disponibles et alternatives possibles pour atténuer les dégâts humains et matériels provoqués par ce phénomène.

Une inondation est un malheur naturel qui affecte plusieurs pays du monde. Elle est due à de nombreux facteurs et aggravée par d'autre dont l'activité de l'homme qui fait souvent parti de l'un de ces facteurs. Les dégâts engendrées par cette catastrophe, qu'ils soient humains ou matériels sont généralement de statistiques lourdes.

### V.2. Définition

#### V.2.1 Inondation

Une inondation est une submersion temporaire d'une zone habituellement sèche, par des eaux douces (fortes pluies, débordements de rivières,...etc.) ou salées (submersion marine, tsunami,...etc.). Elle peut être un phénomène régulier ou catastrophique et peut se produire lentement ou très rapidement selon les conditions topographiques et météorologiques de la zone affectée. L'inondation est issue de nombreux facteurs dont le plus répandu dans le monde est les crues.

#### V.2.2 Crue

Une crue est une augmentation rapide et temporaire du débit d'un cours d'eau. Les crues, terme plutôt hydrologique, désigne le dépassement d'un certain débit ou d'une certaine hauteur par un cours d'eau. Cette hauteur d'eau peut être qualifiée en fonction de sa durée de retour ; par exemple une crue décennale est une hauteur d'eau ou un débit qui a une chance sur dix de se produire chaque année. Elle est caractérisée par quatre paramètres :

- ✓ Le débit ;
- ✓ La hauteur d'eau ;

- ✓ La vitesse d'écoulement ;
- ✓ La durée.

### V.3. Éléments descriptifs d'une crue

Une crue est décrite par quatre éléments qui sont :

- ✓ **Temps de concentration** : durée nécessaire à la goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin pour atteindre l'exutoire.
- ✓ **Pointe de crue** : puissance de la crue et durée de la période critique.
- ✓ **Courbe de tarissement** : retour de la rivière au niveau antérieur à la crue.
- ✓ **Fréquence de retour** : une crue centennale, chaque année, une chance sur cent (1/100) de se produire.

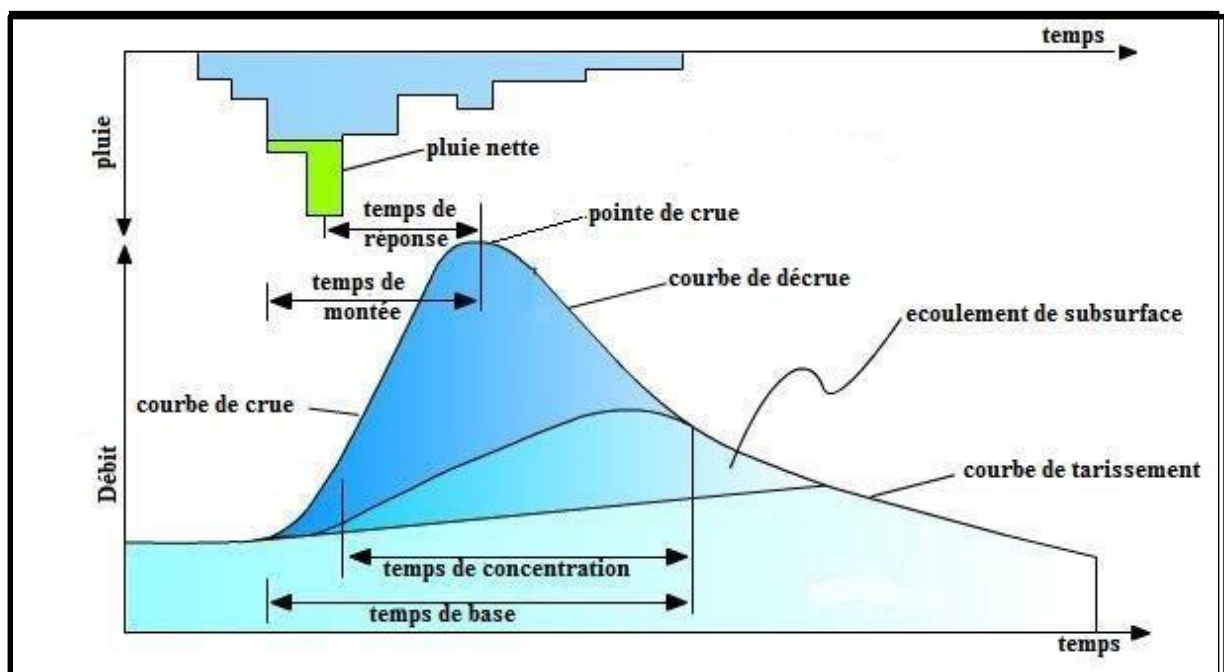


Figure V.1. Éléments descriptifs d'une crue.

### V.4. Principaux paramètres nécessaires pour évaluer la catastrophe

Les dégâts occasionnés par les inondations dépendent des paramètres suivants :

- ✓ La période de retour des crues.
- ✓ La hauteur et la durée de submersion.
- ✓ La vitesse d'écoulement.
- ✓ La torrencialité du cours d'eau.

La possibilité d'apparition d'une crue dépend de nombreux paramètres autres que les quatre précédemment cités, exemple : répartition spatiale et temporelle des pluies par rapport au bassin versant, évaporation et consommation d'eau par les plantes, absorption d'eau par le sol, infiltration dans le sous-sol ou ruissellement, le volume de matériaux solide transportés,

l'érosion des berges...etc.

### **V.5. Mécanismes de l'inondation**

Les facteurs physiques qui influencent les inondations sont :

- ✓ Le régime des pluies.
- ✓ Le relief.
- ✓ La taille du bassin versant.
- ✓ L'état des sols.

Les facteurs aggravants le risque d'inondation sont :

- ✓ L'usage et l'occupation des sols.
- ✓ Aménagements du territoire.
- ✓ Le manque d'entretien des cours d'eau.

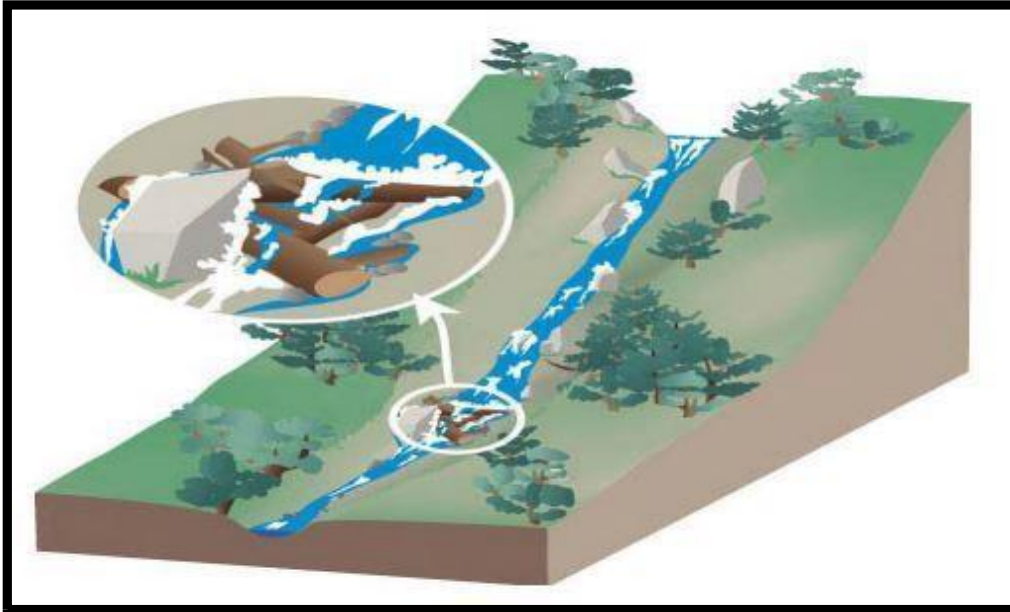
### **V.6. Type d'inondations**

Il existe au moins cinq types d'inondations :

#### **V.6.1 Les inondations par crues torrentielles**

Les crues torrentielles sont des phénomènes brusques et violents issues d'épisodes pluvieux d'une importante intensité. Le ruissellement de ces eaux charrie une grande quantité de matériaux solides (sédiments, bois morts,... etc.) qui font, en quelque sections, colmater le lit du cours d'eau et former des obstacles appelés embâcles. En cédant, ces embâcles libèrent brutalement l'eau qu'ils ont retenue. En conséquence à cela des dégâts très importants sont engendrés.

On parle de crues torrentielles, lorsque le temps de concentration d'un bassin est inférieur à 12h. Elles touchent, généralement, les bassins de montagnes et les régions méditerranéennes mais aussi de petits bassins au relief accentué et à forte capacité de ruissellement peuvent être concernés.



*Figure V.2. Embâcle sur un torrent, inondation par crue torrentielle.*

### **V.6.2 Les inondations par débordement direct (débordement des plaines)**

Les inondations de plaine résultent d'épisodes pluviaux de longue durée et d'intensité modérée. Le sol recevant ces pluies est caractérisé par une faible capacité de ruissellement (lent à déclencher). Par accumulation d'eau, dépassant sa capacité, le cours d'eau déborde, l'écoulement sort du lit mineur pour occuper les terres avoisinantes.

### **V.6.3 Les inondations par accumulation d'eau ruisselée**

Ce type d'inondation est provoqué suite à des pluies exceptionnelles ou d'orages violents s'abattant sur un sol de capacité d'infiltration et de drainage insuffisantes. Cette insuffisance est due essentiellement à deux facteurs :

- ✓ Soit, l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité du sol,
- ✓ Ou bien, le ruissellement se fait sur un sol déjà saturé par une nappe.

### **V.6.4 Les inondations par rupture d'un ouvrage artificiel hydraulique**

L'inondation causée par la destruction d'un ouvrage est un phénomène brutale et extrêmement dangereux. En effet, cette rupture provoque la libération d'une énorme quantité d'eau munie d'une force dévastatrice gigantesque détruisant tout sur son passage. Les statistiques des dégâts matériels et humains engendrés sont inestimables.

La rupture d'un ouvrage est très difficile à prévoir par conséquent la prévention de la calamité est encore plus difficile.

### V.6.5 Les inondations par submersion marine

Une submersion marine est une inondation temporaire des régions côtières par des eaux salées provenant de la mer avoisinante. Elle est due à des événements météorologiques ou océanographiques de dimensions inhabituelles, tels que : marée haute de vives eaux exceptionnelle, phénomène de la surcote et l'élévation du niveau de la mer suite à une fonte importante des glaciers.

### V.7. Procédés de protection des agglomérations contre les inondations

L'objectif d'une stratégie de réduction de l'aléa est de réduire des eaux sur les zones comportant de forts enjeux humains et économiques à l'échelle du bassin versant :

- **Recalibrage du cours d'eau** : augmentation de la capacité du lit en modifiant sa profondeur et sa largeur. Le principe du recalibrage consiste à augmenter la débitance du lit mineur en augmentant la section d'écoulement par élargissement du lit, approfondissement ou les deux. Notons que le recalibrage d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que :
  - La rectification du lit mineur ;
  - La protection des berges contre l'érosion.

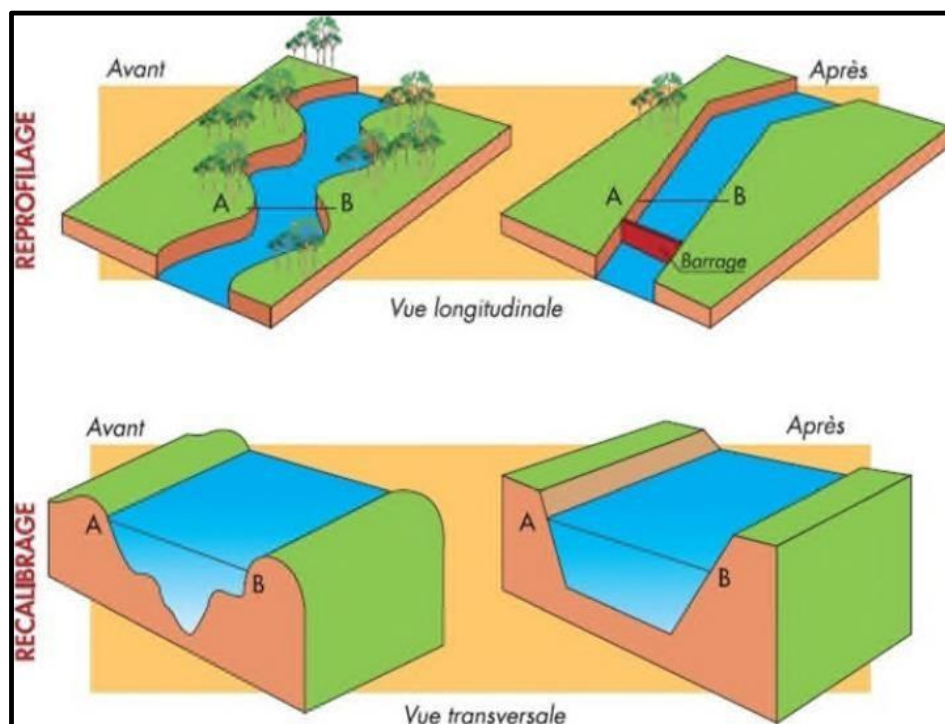


Figure V.3.. Recalibrage d'un cours d'eau

- **Endiguement**: augmentation de la hauteur des berges pour éviter le débordement des eaux.

- **Dragage** : approfondissement du lit
- **Canalisation** : bétonnage des berges et parfois du fond
- **Rectification du cours** : recouplement des méandres.
- **Reboisement** : En plus de leur rôle à développer le volet écologique et touristique, les forêts ont un rôle considérable dans la conservation de sol et des eaux. Le volume intercepté de pluies est non négligeable et contribue dans le ralentissement de la montée de crue et en opposé on doit conserver les forêts existants contre le déboisement (un fort accroissement de ruissellement a été observé après des coupes sélectives des forêts. Le taux d'infiltration sous un couvert végétal naturel non modifié est généralement élevé et le ruissellement est un phénomène relativement rare sauf dans le cas de pluie exceptionnellement violente.
- **Préservation - Restauration - Création des zones d'expansion des crues** : Il s'agit de préserver ou de restaurer des zones connues d'expansion de crues du cours d'eau. Ceci implique généralement de contrôler l'occupation de la zone d'expansion de crues de telle sorte que la submersion de la zone ne soit pas finalement remise en compte. Les effets positifs sont à une échelle plus ou moins locale en fonction de la surface de stockage effectivement en jeu. Ce type d'aménagement n'a que peu d'impact sur la vie aquatique de la rivière et sur son fonctionnement.

#### V.8. Principes régissant la protection moderne contre les crues

- **Apprécier la situation de danger**: connaître parfaitement la situation hydrologique, les conditions d'aménagement des cours d'eau et les types de dangers déterminants. Les dangers peuvent être identifiés en consultant la documentation sur les crues.
- **Identifier les déficits écologiques et y remédier**: une protection durable contre les crues doit veiller à la prospérité de la végétation des rives et laisser suffisamment d'espace pour la diversité structurelle naturelle des milieux naturels, créant ainsi des liaisons entre eux.
- **Différencier les objectifs de protection**: les biens de grande valeur doivent être mieux protégés que ceux de valeur moindre.
- **Retenir si possible; évacuer si nécessaire**: les débits de crue doivent être retardés dans des espaces de rétention afin d'écrêter les débits de pointe.
- **Limiter les interventions**: des sections d'écoulement suffisantes sont impérativement nécessaires pour assurer la protection contre les crues.
- **Examiner les points faibles**: le fonctionnement et la résistance des ouvrages de

protection lors de catastrophes doivent être vérifiés. Ainsi, les points faibles éventuels peuvent être identifiés et éliminés à temps.

- **Garantir l'entretien:** l'entretien des cours d'eau dans les règles de l'art est une tâche permanente. Il permet de préserver l'intégrité des ouvrages de protection et de maintenir la capacité d'écoulement des cours d'eau.
- **Assurer l'espace nécessaire:** les cantons sont tenus de déterminer l'espace nécessaire aux cours d'eau, de l'inscrire dans les plans directeurs et les plans d'affectation et d'en tenir compte dans toutes les autres activités touchant à l'aménagement du territoire
- **Respecter les besoins :** Les besoins de ceux qui recherchent les bords de ruisseaux et de rivières pour se détendre doivent aussi être respectés. En outre, l'utilisation durable des ressources en eau, en particulier l'exploitation de l'énergie hydraulique, doit rester possible.

## V.9. Conclusion

La protection des sites urbains contre les crues et les inondations est une nécessité indispensable afin de réduire les dégâts humains, matériels et économique

**Références bibliographiques**

- [1] ACHOUR B., T. BOUZIANE T., NEBBAR K., 2003, «Débitmètre triangulaire à paroi épaisse dans un canal rectangulaire (Première partie) », Université de Biskra, B.P. 145, R.P, 07000 – Algérie, Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, <<http://larhyss.net/pdf/journal/2/1-Achour.pdf>>.
- [2] ADJIM M., 2008-2009, Exemples du cours d"UE631-hydraulique générale, Dept. Hydraulique, Faculté de technologie, Université de Tlemcen, Tlemcen, Algérie.
- [3] ADJIM M., 1990, Cours d"hydraulique générale pour les ingénieurs en hydraulique option hydraulique urbaine, dept. hydraulique, faculté de technologie, Université de Tlemcen.
- [4] AISSA MADAOUÏ O. et AISSA MADAOUÏ R. , 2016, Protection des villes contre les inondations cas du centre d'ain fezza tlemcen. Mémoire Master en Hydraulique, Option : Eau, Sol et Aménagement, Université ABOU BEKR BELKAÏD.
- [5] BENNIS S., 2007, « hydraulique et hydrologie», 2ème édition, université du Québec école de technologie supérieur
- [6] BONNIN. J., 1986, « hydraulique urbain ».Eyrolles. Paris.
- [7] BONVIN J., 2005, « Hydraulique urbaine I Captages – Réseaux d"adduction – Réservoirs - Réseaux de distribution – Equipements - Pompes – Petites centrales hydrauliques », école d"ingénieur du Canton de vaud,
- [8] CAPOT M, 1977, « les principes des mesures pression, débits, niveaux, températures ». Ed. TECHNIP et institut français du pétrole.
- [9] CARLIER M., 1998, « hydraulique générale et appliquée ».Ed. Eyrolles, EDF. Paris.
- [10] DAMOUM M. 1994, « mécanique des fluides », Ed.OPU.Alger.
- [11] DUPONT A. , Hydraulique urbaine, Ouvrages de transport, d"élévation et de distribution des eaux, Tome II, Edition Eyrolles, 384 pages
- [12] DUPONT J.M., 1996, « Modélisation et étude bibliographique des déversoirs d"orage », 3ème année de l"École Polytechnique de Paris.
- [13] LENCASTRE A. 2002 , « hydraulique générale » Ed. Revue et augmentée. Paris.
- [14] Verniers G. 1995, Aménagement écologique des berges des cours d'eau -techniques de stabilisation. Presses Universitaires de Namur, Belgique, 77 pages.
- [15] Degoutte G. coordinateur, 1997. *Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*. Comité Français des Grands barrages, Cemagref éditions, Antony, 176 p.



- [16] Degoutte, 2003.ENGREF Paris, 2003. Coordination G. DEGOUTTE, P. ROYET.  
Sécurité des barrages en service, p127 à 137.
- [17] Degoutte. G.2006. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées. Lavoisier. France.

