



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université 8 mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie,
Département : Génie Civil et Hydraulique

Cours d'aménagements hydrauliques

Destinés aux étudiants de licence en hydraulique

Dr : Kherouf Mazouz

2023

Préambule

Cette polycopie fournit tout d'abord les bases physiques et mathématiques de compréhension et de quantification des mécanismes majeurs se produisant dans les cours d'eau, pour l'écoulement de l'eau dans des systèmes à surface libre, pour le transport des sédiments, et enfin pour la morphogenèse fluviale, c'est-à-dire toutes les évolutions des berges et du tracé du lit du cours d'eau.

Les objectifs de cette polycopie sont de décrire les écoulements fluviaux ainsi que les impacts que peuvent avoir les aménagements hydrauliques. En effet, il convient d'être en mesure d'identifier, de dimensionner et d'anticiper les impacts potentiels des aménagements envisagés sur l'évolution des cours d'eau.

Cette polycopie fait intervenir les équations simplifiées régissant les écoulements à surface libre et les applications de dimensionnement autour des aménagements hydrauliques. Il s'articulera autour de :

- ✚ Formes naturelles des rivières : définition des principaux paramètres contrôlant les rivières, description de l'évolution morphologique des rivières.
- ✚ Hydraulique à surface libre : caractéristiques des écoulements à surface libre, hydraulique des canaux.
- ✚ Transport sédimentaire : définition des modes de transport (charriage et suspension) et estimation de la capacité de transport d'une rivière.
- ✚ Protections des berges : mécanismes d'évolution des berges et principes généraux de protection des berges avec des outils de dimensionnement.
- ✚ Les seuils en rivière : définition et description des différents types de seuils, dimensionnement des paramètres à prendre en compte pour l'installation d'un seuil.
- ✚ Protections des crues : définition des crues, inondations associées et méthodes de protections possibles.

Le document fourni des enseignements pratiques sur la nature des travaux concrets qu'il faut réaliser pour atteindre tel ou tel objectif, sur les effets d'un aménagement en rivière, sur les moyens concrets d'en mitiger les conséquences indésirables, sur la protection des berges et l'entretien des digues et des cours d'eau, sur le rôle de la végétation, en particulier la reforestation, la végétalisation des berges, sur la lutte contre les inondations, sur l'aménagement de l'espace rural favorisant ou, au contraire, réduisant l'expansion des crues et l'érosion, sur les aménagements propices au maintien de la biodiversité le long du cours d'eau. Il s'agit d'un outil pour tous ceux, (étudiants ou professionnels), qui veulent comprendre le comportement des cours d'eau dans leur milieu naturel ; pour tous ceux, encore, qui veulent savoir comment concevoir, construire ou entretenir les aménagements capables de dompter, au bénéfice de

l'homme. Des notions, exemples et explications ont été présentées en s'appuyant sur des informations préalablement requises pour bien comprendre les processus des aménagements des cours d'eau. Il est le fruit d'une longue pratique de l'enseignement de l'hydraulique à ***l'université 8 mai de Guelma***.

Il s'agit d'un support de cours de la matière " Aménagements Hydrauliques " destiné aux étudiants de la 3^{ème} année de Licence, Filière Hydraulique du domaine des Sciences et Technologies (ST). Le cours est structuré selon le programme des enseignements de la 3^{ème} année de Licence Hydraulique, 6^{ème} semestre. Ce document est constitué de neuf chapitres qui s'enchaînent comme suit :

Chapitre 1 : Ressaut hydraulique

Chapitre 2 : Ecoulement par les déversoirs

Chapitre 3 : Notion de morphologie des cours d'eau

Chapitre 4 : Différents types d'aménagements hydrauliques

Chapitre 5 : Quelques généralités sur les cours d'eau

Chapitre 6 : Pourquoi aménager et entretenir les cours d'eau

Chapitre 7 : Des exemples de travaux ou d'aménagement de cours d'eau

Chapitre 8 : Protection contre les inondations

Chapitre 9 : Lutte contre l'érosion

Le premier chapitre est consacré aux ressauts hydrauliques qui sont souvent conçus en systèmes hydrauliques pour dissiper l'énergie mécanique d'un fluide. Ce chapitre se termine par l'étude de l'influence du débit sur les pertes de charge singulières liées au ressaut. Dans beaucoup de situations, des retenues d'eau (lacs, bassins, barrages) sont bordées par un déversoir, c'est-à-dire une paroi dont le bord supérieur, appelé seuil, est profilé. C'est d'ailleurs l'objet **du deuxième chapitre**.

Le chapitre 3 est dédié à la notion de morphologie des cours d'eau. On revient sur la définition de la morphologie des cours. On explique l'évolution des formes que les cours d'eau adoptent en fonction des conditions climatiques et géologiques (nature du sol, débit, pente, granulométrie du fond, etc.), et on met en exergue les facteurs responsables de l'équilibre et le déséquilibre des cours d'eau.

Les chapitres de 4 à 7 décrivent les différents types d'aménagements hydrauliques, l'intérêt de l'aménagement et l'entretien des cours d'eau sont présentés, et quelques exemples de travaux ou d'aménagement de cours d'eau sont illustrés.

Dans les chapitres 8 et 9 respectivement les moyens de Protection contre les inondations et de Lutte contre l'érosion sont évoqués.

Préambule	1
Chapitre 1	2
Ressaut hydraulique	2
1.1. Aperçu sur les écoulements brusquement variés.....	2
1.1.1. Définition et caractéristiques.....	2
1.1.2. Principe d'étude des écoulements brusquement variés.....	2
1.2. Ressaut hydraulique	2
1.2.1 Introduction.....	2
1.2.2 Fonctions du ressaut hydraulique	4
1.2.3 Les types de ressauts hydrauliques	4
1.2.2. Quelques paramètres caractéristiques	4
1.2.3. Définition des profondeurs conjuguées	5
1.3. Impulsion totale.....	5
1.3.1. Variation de (M) en fonction de y pou (Q) donné	5
1.4. Calcul du ressaut pour un canal rectangulaire.....	6
Chapitre 2	9
Écoulement par les déversoirs	9
2.1. Définition et principaux types de nappes.....	9
2.2. Écoulement par nappe libre	10
2.2.1. Déversoir à mince paroi	10
2.2.2. Déversoir à seuil épais	12
2.2.3. Déversoir à seuil déversant	13
2.3. Écoulement par nappe noyée en dessous.....	13
2.4. Déversoir latérale	14
2.5. Déversoir circulaire	16
2.6. Déversoir trapézoïdal à profil convergent vers le haut.....	17
Chapitre 3	24
Notion de morphologie des cours d'eau	24
3.1. Introduction.....	24
3.2. Définitions	24
3.2.1 Glossaire	24
3.2.2. Rives gauche et droite.....	25
3.3. Cours d'eau, vue transversale	25
3.3.1. Lit du cours d'eau.....	25
3.3.2.La berge	26
3.4. Cours d'eau, vue longitudinale	27
Chapitre 4	30

Différents types d'aménagements hydrauliques	30
4.1. Introduction.....	30
4.2. Les différents aménagements répertoriés sont :	32
4.3. Rectification recoupement des méandres	33
4.4. Les différents types de canaux :	34
Chapitre 5	36
Quelques généralités sur les cours d'eau.....	36
5.1 Définition.....	36
5.2. Les différents types de cours d'eau	36
5.3. La morphologie des cours d'eau	37
5.3.1. Les formes fluviales et leurs évolutions.....	38
5.3.2 Dynamique morphologique des cours d'eau.....	42
5.4 Crue et inondation	48
5.4.1 Crues.....	48
5.4.2 . Les inondations.....	49
5.6. Typologie des inondations	50
Chapitre 6	51
Pourquoi aménager et entretenir les cours d'eau ?	51
6.1. Introduction.....	51
6.2. D'une manière générale, les différents travaux visent donc à :	51
6.3. Trois types d'intervention sont utilisés :	52
6.4. Citons quelques méthodes pour entretenir le lit d'un cours d'eau :	52
Chapitre 7	53
Des exemples de travaux ou d'aménagement de cours d'eau	53
7.1. L'effacement ou l'abaissement des ouvrages.....	53
7.2. L'entretien des berges et des ripisylves	53
7.3. La reconnexion des annexes hydrauliques.....	54
7.4. Augmenter la capacité d'accueil du milieu pour les poissons	55
7.5. La gestion des espèces exotiques envahissantes	55
7.6. La restauration des zones humides	56
Chapitre 8	57
Protection contre les inondations	57
8.1. Analyse des crues	57
8.2. Genèse des crues et inondations.....	57
8.2.1. Définition de l'inondation.....	57
8.2.2. Processus conduisant aux crues et aux inondations.....	57
8.2.3. Types d'inondation	57
8.3.Gestion et exploitation des ouvrages de protection.....	57
8.3.1.Recalibrage des ouvrages des cours d'eau	57

8.3.2. Endiguement d'un cours d'eau.....	58
8.3.3. Caractéristiques des digues	59
8.4. Reboisement.....	59
8.5. Barrage écrêteur	59
8.6. Correction torrentielle	59
8.7. Les épis.....	60
8.8. Banquette :	61
Chapitre 9	62
Lutte contre l'érosion.....	62
9.1. Qu'est-ce que l'érosion.....	62
9.2. Les dommages causés par l'érosion	63
9.2.1. La diminution du potentiel agronomique	63
9.2.2. Les inondations et coulées de boue	65
9.2.3. Les dommages causés par l'érosion	66
9.3. Les causes de l'érosion	67
9.3.1. Les facteurs naturels	67
9.3.2. Les facteurs aggravants.....	68
9.3.3. Représentation Schématiques des causes et des conséquences de l'érosion des sols	70
Bibliographie.....	72

Introduction générale

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 agressifs, qui ont comme tout aménagement d'un cours d'eau des conséquences hydro-morphologiques. Aujourd'hui, rares sont les cours d'eau ayant conservé leur morphologie naturelle. Tous les cours d'eau ont subi de lourds aménagements dégradants. Les activités anthropiques représentent des pressions dites hydromorphologiques car elles perturbent :

- ➡ L'hydrologie du cours d'eau en modifiant notamment la dynamique des écoulements,
- ➡ La morphologie du cours d'eau en modifiant les paramètres physiques du lit (sa largeur, sa profondeur, son substrat, la végétation rivulaire...)

Un aménagement est un ensemble des structures ou ouvrages nécessaires pour dériver, stocker et enfin conduire l'eau à l'utilisation finale. Un aménagement hydraulique est un système de génie civil, composé de plusieurs ouvrages (unitaires ou de long linéaire) et destiné à transporter et réguler des écoulements. Un aménagement hydraulique participe à la protection d'une zone protégée contre les inondations ou les submersions. Il comprend des ouvrages qui sont principalement des 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. Selon leur fonction, des types d'ouvrages peuvent être distingués : seuil hydraulique, prise d'eau, ouvrages ; d'adduction ; de stockage (réservoir d'eau, barrage, excréteur de crue) ; d'exploitation ; de soutien d'étiage ; de restitution de protection (digue, etc.)

Comprendre les cours d'eau, c'est comprendre les processus physiques qui les caractérisent, qui les façonnent, et qui les diversifient. Les cours d'eau sont en effet des milieux complexes et dynamiques, ouverts et résilients, fonctionnant particulièrement à processus-réponses et à rétroactions positives et négatives. La géomorphologie fluviale est par excellence la branche de l'hydrologie qui permet d'appréhender tous les mécanismes qui régissent le comportement des rivières dans l'espace-temps. Il est primordial de donner aux étudiants les connaissances nécessaires à la conception, à la réalisation des ouvrages hydrauliques dont la fonction est l'aménagement des cours d'eau. Par ailleurs, il s'agit également de permettre aux étudiants d'acquérir des compétences pour élaborer des mesures préventives pour lutter contre les inondations et l'érosion d'une part qui en découle, et d'autre part évaluer les impacts des ouvrages hydrauliques sur les régimes d'écoulement, et par conséquent le transport des sédiments dans les cours d'eau.

Chapitre 1

Ressaut hydraulique

1.1. Aperçu sur les écoulements brusquement variés

1.1.1. Définition et caractéristiques

Un écoulement brusquement varié est un écoulement permanent dans le temps mais les variables de l'écoulement varient très vite, voire de manière discontinue dans l'espace.

Les principales caractéristiques d'un écoulement brusquement varié sont :

- La courbure des lignes de courant est très prononcée, d'où la répartition des pressions n'est plus hydrostatique dans chaque section ;
- La répartition des vitesses est très irrégulière (le coefficient d'énergie cinétique $\alpha \gg 1$) avec parfois de courants de retour ;
- L'effet du frottement sur les parois peut être négligé ;
- La surface libre est souvent instable et irrégulière.

1.1.2. Principe d'étude des écoulements brusquement variés

Dans le cas général, on ne cherche pas à tracer l'allure de la surface libre. On détermine alors deux sections qui englobent au plus près l'écoulement et où la répartition des pressions est hydrostatique et celle de vitesse est régulière. Entre les deux sections, l'écoulement n'étant pas uniforme, les formules du régime uniforme ne sont donc pas applicables. Cependant, on applique :

- Soit le **théorème des quantités de mouvement** (théorème d'Euler) si l'écoulement est divergent avec de forte dissipation d'énergie : **ressaut hydraulique par exemple** ;
- Soit le **théorème de Bernoulli** si l'écoulement est convergent avec faible ou sans dissipation d'énergie : **écoulement sous une vanne par exemple**.

1.2. Ressaut hydraulique

1.2.1 Introduction

Le ressaut hydraulique est décrit dans la littérature comme un phénomène qui se produit au moment de la transition entre un écoulement torrentiel et un écoulement fluvial. Il se produit lors d'une élévation abrupte du niveau de l'eau dans une petite région ou lors d'une perte importante de charge hydraulique localisée (Figure 1.1).



Figure 1.1. Ressaut hydraulique dans la nature

Le premier scientifique à décrire ce phénomène fut le célèbre Léonard de Vinci au XVI^e siècle, qui depuis lors stimule les scientifiques dans le domaine des sciences hydrauliques. Même si plus de quatre siècles se sont écoulés depuis la description de Léonard de Vinci, de grands progrès dans l'étude du ressaut hydraulique et de ces effets corrélés continuent à se développer.

La compréhension de ce phénomène est aujourd'hui d'une importance vitale dans diverses applications de l'ingénierie. L'un des exemples les plus classiques de son importance est la construction de barrages. Des études montrent qu'un déversoir bien conçu suivant les principes du ressaut hydraulique peut dissiper entre 60 et 70% de l'énergie. Ceci permet de minimiser les dommages faits à la structure et au lit de la rivière et donc de réduire les coûts de maintenance et les impacts environnementaux. La réduction du risque de dommages est faite par jet liquide à grande vitesse des évacuateurs de crues. À des vitesses d'écoulement élevé de canal, les sédiments peuvent être levés de lits de rivière. En réduisant les vitesses d'écoulement, ressauts hydrauliques aussi réduisent le potentiel de l'érosion et l'affouillement autour de pieux.

Le ressaut peut se déclencher dans différentes circonstances : par exemple au pied d'un barrage-déversoir ou à l'aval d'un écoulement au-dessous d'une vanne de fond ou encore dans un canal à forte pente débouchant dans un écoulement fluvial (Figure 1.2)

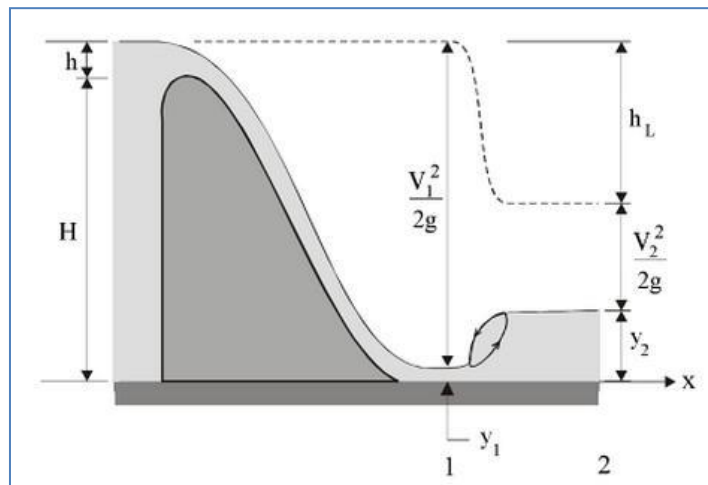


Figure 1.2. Paramètres du ressaut hydraulique

La ligne d'énergie, indiquée en pointillé sur la Figure 1.3 montre que le ressaut hydraulique provoque une dissipation d'énergie par turbulence (h_L).

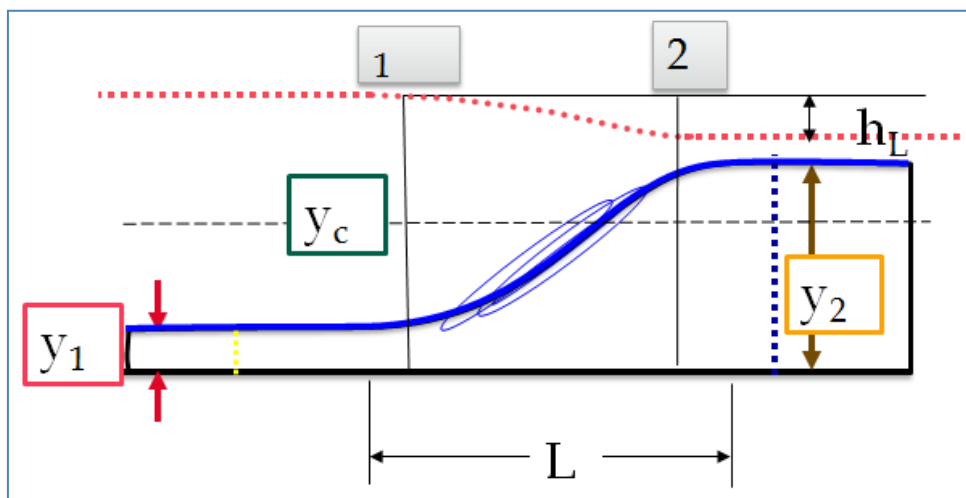


Figure 1.3. Dissipation de l'énergie dans un ressaut hydraulique

1.2.2 Fonctions du ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique a de nombreuses applications. On cite dans le cas d'un canal ouvert :

- ▶ Dissiper l'énergie dans les ouvrages hydrauliques empêchant ainsi l'affouillement à leur aval ;
- ▶ Réduire la pression de soulèvement net dans des ouvrages hydrauliques ;
- ▶ Elever le niveau d'eau sur le côté aval des structures ;
- ▶ Augmenter le débit d'une vanne ;
- ▶ Eliminer les poches d'air à partir des flux de canaux ouverts

1.2.3 Les types de ressauts hydrauliques

En tant que résultat d'études approfondies, les chercheurs ont donné de différentes classifications des sauts hydrauliques Bradley et Peterka (1957) ont classé les ressauts hydrauliques en cinq catégories en fonction de la valeur du nombre de Froude initial. La classification est décrite comme suit :

- Si $1 < Fr_1 < 1.7$, le ressaut est dit ondulé ;
- Si $1.7 < Fr_1 < 2.5$, ressaut faible ;
- Si $2.5 < Fr_1 < 4.5$, ressaut oscillant ;
- Si $4.5 < Fr_1 < 9.0$, ressaut établi ;
- Si $Fr_1 > 9.0$, ressaut fort.

1.2.2. Quelques paramètres caractéristiques

- **Hauteur du ressaut**, c'est la quantité :

$$h_R = (y_2 - y_1) \quad (1.1)$$

- **Longueur du ressaut**, autrement dit la distance entre les sections 1 et 2 est très difficile à déterminer, elle ne peut être déterminée théoriquement, mais il a été démontré expérimentalement que :

$$L_R \cong 6,9 (y_2 - y_1) \quad (1.2)$$

La longueur du ressaut hydraulique peut également être estimée par la formule de Chin, (2000)

$$L_R \cong 6 (y_2) \\ \text{Tant que } 4,5 < Fr < 13$$

- **Rendement du ressaut R_R** : c'est le rapport de l'augmentation de l'énergie potentielle sur la diminution de l'énergie cinétique

$$R_R = \frac{y_2 - y_1}{\frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g}} \quad (1.3)$$

- **Perte de charge du ressaut ΔH** : Le ressaut provoque une importante dissipation d'énergie mécanique ; ce phénomène est irréversible : Son expression est fournie par :

$$\Delta H = H_{S_1} - H_{S_2} = \left(y_1 + \frac{u_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{u_2^2}{2g} \right) \quad (1.4)$$

1.2.3. Définition des profondeurs conjuguées

On appelle profondeurs conjuguées les profondeurs y_1 et y_2 observées respectivement en amont et en aval du ressaut hydraulique (Figure 1.2, et Figure 1.3).

Pour trouver la relation entre les deux profondeurs conjuguées y_1 et y_2 pour un canal rectangulaire, on applique l'équation de quantité mouvement pour volume de contrôle compris entre les sections (1) et (2) (Figure 1.2 et Figure 1.3)

L'application du théorème d'Euler entre les sections (1) et (2) au niveau desquelles la répartition des pressions est hydrostatique et celle des vitesses est régulières conduit à :

$$\rho Q(\vec{U}_2 - \vec{U}_1) = \vec{F}_{P_2} + \vec{F}_{P_1} + M\vec{g} + \vec{F}_f + \vec{F}_\gamma \quad (1.5)$$

\vec{F}_{P_2} ; \vec{F}_{P_1} : sont les forces de pression hydrostatique

\vec{F}_f : est la force frottement négligeable en raison de la courte distance

\vec{F}_γ : est la force d'inertie négligeable en raison de la courte distance

$M\vec{g}$: le poids qui est négligeable devant la force de pression

Donc on a :

$$\rho Q(\vec{U}_2 - \vec{U}_1) = \rho Q(U_2 - U_1) = \rho\left(\frac{Q^2}{S_2} - \frac{Q^2}{S_1}\right) \quad (1.6)$$

$$\vec{F}_{P_2} + \vec{F}_{P_1} = \rho g S_1 y_{G1} - \rho g S_2 y_{G2}$$

L'équation précédente s'écrit :

$$\rho \frac{Q^2}{S_1} + \rho g S_1 y_{G1} = \rho \frac{Q^2}{S_2} + \rho g S_2 y_{G2} \quad (1.7)$$

Cette relation est appelée courbe conjuguée. Connaissant alors y_{G1} on peut déterminer y_{G2} et vice versa.

1.3. Impulsion totale

On appelle impulsion totale la quantité

$$M = \rho \frac{Q^2}{S} + \rho g S y_G. \quad (1.8)$$

Le théorème de quantité de mouvement appliqué précédemment au ressaut montre que l'impulsion totale se conserve avant et après le ressaut hydraulique.

1.3.1. Variation de (M) en fonction de y pou (Q) donné

L'étude de la fonction M (y) dans l'intervalle] 0 ; ∞ [montre deux branches paraboliques

Si $y \rightarrow 0$ alors $S(y) \rightarrow 0$ et $M \rightarrow \infty$

Si $y \rightarrow \infty$ alors $S(y) \rightarrow \infty$ et $M \rightarrow \infty$.

La fonction étant positive continue dans cet intervalle, elle atteint nécessairement un minimum pour $\frac{dM}{dy} = 0$. Ce minimum correspond à la profondeur critique

$$\frac{dM}{dy} = -\rho \frac{Q^2}{S^2} \frac{dS}{dy} + \rho g \left(\frac{dS y_G}{dy} \right) = -\rho \frac{Q^2}{S^2} l + \rho g S = \rho g S \left(1 - \frac{Q^2 l}{g S^3} \right) \quad (1.9)$$

$$\frac{dM}{dy} = 0 \Rightarrow \left(1 - \frac{Q^2 l}{gS^3}\right) = 0 \Rightarrow \frac{Q^2 l}{gS^3} = 1 \Rightarrow \frac{U}{\sqrt{gy_m}} = 1 \Rightarrow Fr = 1 \quad (1.10)$$

On retrouve l'équation du régime critique défini par le carré du nombre de Froude est égal à 1. On voit également que le même débit Q , avec la même impulsion totale M , peut s'écouler sous deux profondeurs différentes y_1 correspondant au régime torrentiel et y_2 correspondant au régime fluvial. (y_1) et (y_2) sont des profondeurs conjuguées au sens du ressaut.

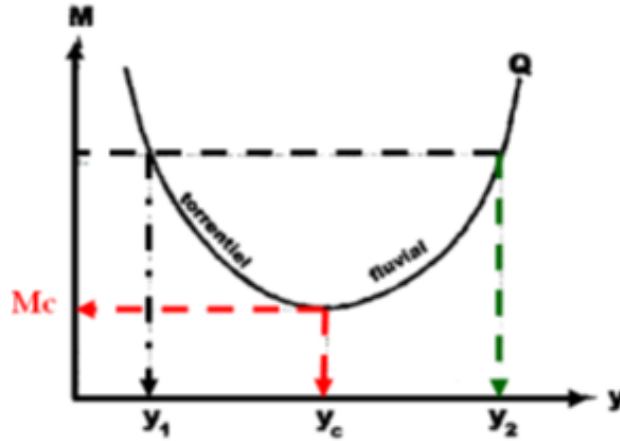


Figure 1.4. Variation de (M) en fonction de (y)

1.4. Calcul du ressaut pour un canal rectangulaire

Pour un canal rectangulaire on a : $S = b \times y$; $y_G = y/2$.

L'équation de la courbe conjuguée devient :

$$\rho \frac{Q^2}{by_1} + \rho g \frac{by_1^2}{2} = \rho \frac{Q^2}{by_2} + \rho g \frac{by_2^2}{2} \quad (1.11)$$

$$\frac{Q^2}{b^2 y_1} + g \frac{y_1^2}{2} = \frac{Q^2}{b^2 y_2} + g \frac{y_2^2}{2} \quad (1.12)$$

$$\frac{q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{q^2}{gy_2} + \frac{y_2^2}{2} \quad (1.13)$$

Avec : $q = \frac{Q}{b}$ (débit spécifique)

En multipliant chaque membre de l'équation par $(2gy_1 y_2)$, et en mettant $(y_2 - y_1)$ en facteur, la conservation de l'impulsion totale se réduit à une équation symétrique du second degré en (y_1) et (y_2) :

$$y_1 y_2^2 + y_2 y_1^2 - 2 \frac{q^2}{g} = 0 \quad (1.14)$$

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{8q^2}{gy_1^3}} \right) = \frac{y_1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right) \quad (1.15)$$

La perte de charge du ressaut est :

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (1.16)$$

Le rendement du ressaut est :

$$R_R = \frac{4y_1 y_2}{(y_1 + y_2)^2} \quad (1.17)$$

Exercices**Exercice 1**

Dans un canal rectangulaire d'une largeur $b = 10\text{m}$ qui évacue un débit $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, il surgit un ressaut. Déterminer la deuxième profondeur y_2 si la première profondeur $y_1 = 0.5\text{m}$. Déterminer alors la hauteur du ressaut ainsi que sa longueur. Quelle est la perte de charge pour ce ressaut hydraulique.

Réponse

Déterminons en premier lieu le nombre de Froude

$$Fr^2 = \frac{Q^2 l}{gS^3} = \frac{Q^2 b}{gS^3}, \text{ car : } l = b \text{ et } S = by \text{ et avec } q = Q/b \text{ on a :}$$

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2}{b^2 g y_1^3} = \frac{Q^2 b}{g S^3}$$

$$Fr_1^2 = \frac{50^2 * 10}{9.81 * (10 * 0.5)^3} = 20.38$$

Donc la deuxième profondeur conjuguée est :

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{0.5}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * (20.38)^2} - 1 \right) = 2.95\text{m}$$

Hauteur du ressaut :

$$h_R = y_2 - y_1 = 2.95 - 0.5 = 2.45 \text{ m} > y_1 \text{ donc ressaut parfait établis car } Fr > 9.$$

Longueur du ressaut :

$$L_R = 6(y_2 - y_1) = 6(2.95 - 0.5) = 14.90\text{m}$$

Perte de charge du ressaut :

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} = \frac{(2.95 - 0.5)^3}{4 * (2.95) * 0.5} = 2.49\text{m}$$

Exercice 2

Dans un canal trapézoïdal se produit un ressaut hydraulique avec $Q = 16\text{m}^3/\text{s}$; $b = 7\text{m}$; $m = 1.5$. Déterminer graphiquement la deuxième profondeur y_2 si $y_1 = 0.5\text{m}$ (on donne pour le trapèze : $y_G = \frac{y}{6} \left(\frac{3b + 2my}{b + my} \right)$; $S = by + my^2$)

Réponse

Sachant que l'impulsion mécanique totale est :

$$M = \rho \frac{Q^2}{S} + \rho g S y_G$$

En divisant par ρg il vient que :

$$\frac{M}{\rho g} = \frac{\rho Q^2}{\rho g S} + \frac{\rho g S y_G}{\rho g} = \frac{Q^2}{g S} + y_G S$$

Cette fonction est appelée fonction du ressaut, alors en donnant une série de valeurs de y_i et on calcule S_i et y_{G_i} puis $F(y_i)$. Cette fonction doit être la même pour les deux valeurs conjuguées y_1 et y_2 . Dressons donc le tableau de calcul suivant :

Tableau de calcul

$y_i(\text{m})$	$S (\text{m}^2)$	$y_G(\text{m})$	$S^* y_G$	$F(y_i)$
0.2	1.46	0.098	0.143	18.02
0.5	3.87	0.242	0.937	7.67
1	8.5	0.470	3.99	7.06
1.2	10.56	0.559	5.90	8.37
1.5	13.87	0.689	9.55	11.44
2	20	0.900	18.0	19.30

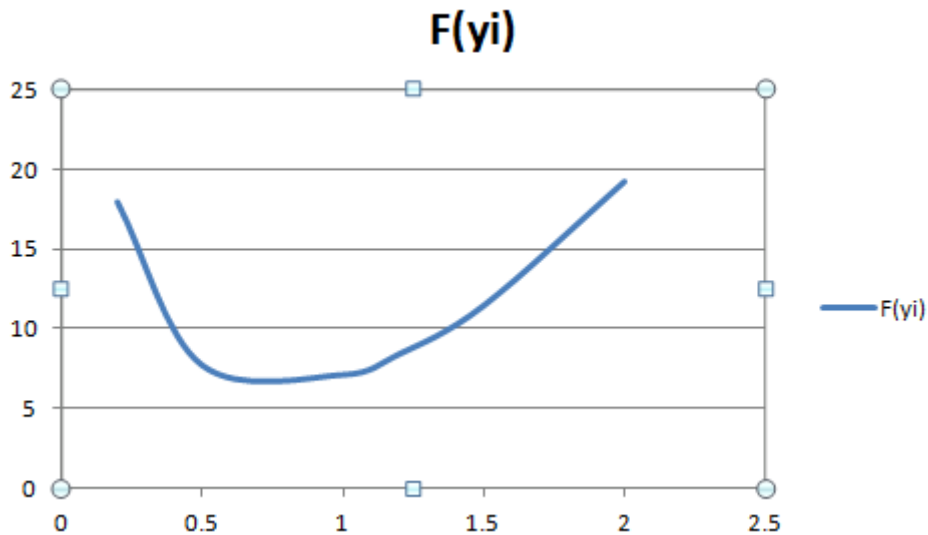


Figure 1.5. Représentation de la fonction du ressaut hydraulique en fonction de la profondeur (y_i)

On en déduit du graphique la valeur de $y_2 = 1,125 \text{ m}$

Chapitre 2

Écoulement par les déversoirs

2.1. Définition et principaux types de nappes

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.

Les différents types de nappes dépendent de la charge et du niveau aval :

- Pour de très faibles charges, la nappe est adhérente à la paroi car la vitesse horizontale de l'eau n'est pas suffisante pour éloigner la nappe. On parle alors de nappe adhérente.

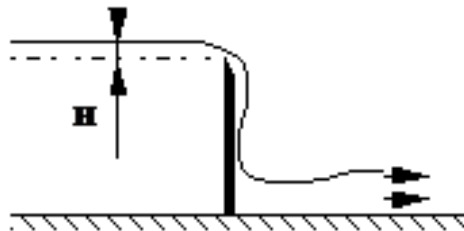


Figure 2.1. Nappe adhérente

- Lorsque la charge augmente, la vitesse croît et la nappe se décolle de la paroi. On parlera alors de nappe libre si l'aération de la zone a est possible

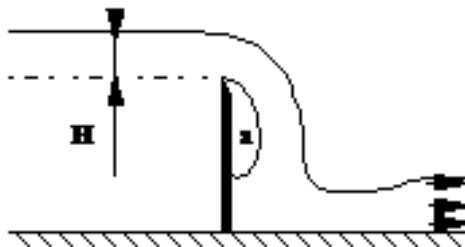


Figure 2.2. Nappe libre

- Dans le cas où la zone a n'est pas facilement aérée, il se produit une dépression et on a alors affaire à une nappe déprimée.

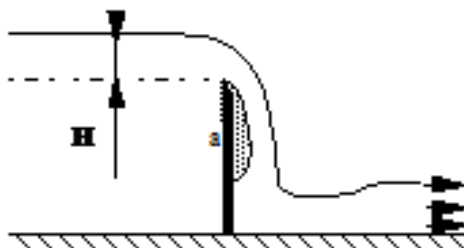


Figure 2.3. Nappe déprimée

- Si le niveau aval augmente, il arrive un moment où il n'y a plus d'air en a ; on parle alors d'une nappe noyée en dessous à ressaut éloigné

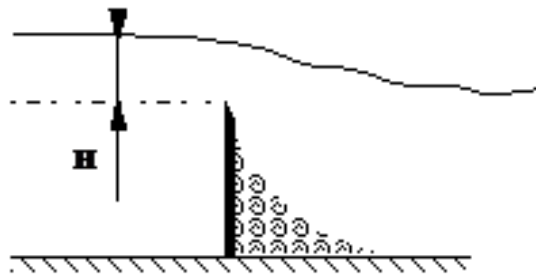


Figure 2.4. Nappe noyée en dessous

- Le niveau aval augmentant encore, le ressaut se rapproche de la nappe déversante jusqu'à recouvrir le pied de la nappe. A ce moment, le débit du déversoir est influencé par le niveau aval. Le niveau augmentant encore jusqu'à être supérieur à celui du seuil, on parlera alors de déversoir noyé à nappe ondulée.

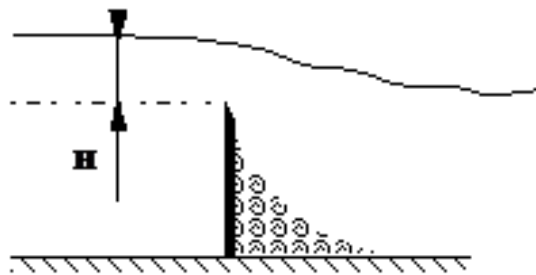


Figure 2.5. Nappe ondulée

2.2. Ecoulement par nappe libre

2.2.1. Déversoir à mince paroi

Un tel déversoir doit avoir une épaisseur à la crête inférieure à la moitié de la charge. Par la suite, nous ne considérerons que des déversoirs verticaux. 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 :

$$V = \sqrt{2gH} \quad (2.1)$$

$$Q = \mu S \sqrt{2gH} \quad (2.2)$$

Avec : S est la section mouillée et μ est le coefficient du débit.

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

$$\mu = \left[0,405 + \frac{0,003}{H} \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H+z} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

Avec : H : charge ; z : hauteur de pelle.

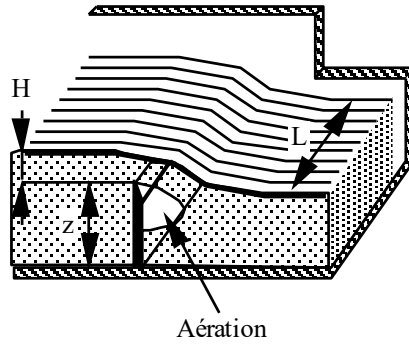


Figure 2.6. Déversoir rectangulaire sans contraction latérale

Le débit est donc :

$$Q = \mu L H \sqrt{2g H} \quad (2.4)$$

Dans les limites où :

$$0,08 \text{ m} < H < 0,70 \text{ m}, L > 4 H \text{ et } 0,2 \text{ m} < z < 2 \text{ m}$$

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

- Pour un déversoir rectangulaire à contraction latérale, on peut retenir la formule de Hegly :

$$\mu = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} - 0,03 \frac{L_1 - L}{L_1} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{LH}{L_1(H+z)} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

Dans les limites où :

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

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

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

$$0 < \frac{L_1 - L}{L_1} < 0,9$$

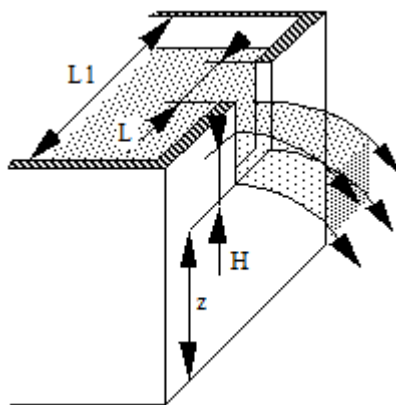


Figure 2.7. Déversoir rectangulaire à contraction latérale

- Enfin pour un déversoir triangulaire, on peut retenir la formule de Gourley et Crimp :

$$Q = 1,32 \text{ tg } \frac{\alpha}{2} H^{2,47} \quad (2.6)$$

(H charge sur la pointe, α angle d'ouverture)

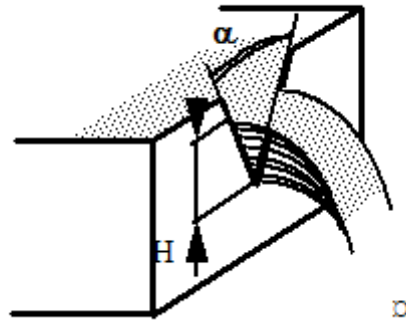


Figure 2.8. Déversoir triangulaire

2.2.2. Déversoir à seuil épais

Dans un tel déversoir, les filets liquides sont parallèles et horizontaux au droit du seuil. Si h est la hauteur d'eau au-dessus du seuil et H la charge, on a par application du théorème de Bernoulli :

$$V = \sqrt{2g(H - h)} \quad (2.7)$$

D'où le débit pour une largeur L :

$$Q = Lh \sqrt{2g(H - h)} \quad (2.8)$$

A priori H et h ne sont pas indépendants et lorsque l'on baisse le niveau aval (à partir de $h = H$), on constate que le débit augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale. Lorsque celle-ci est atteinte l'influence du niveau aval ne se fait plus sentir. Le niveau h est alors à une valeur telle qu'elle maximise le débit :

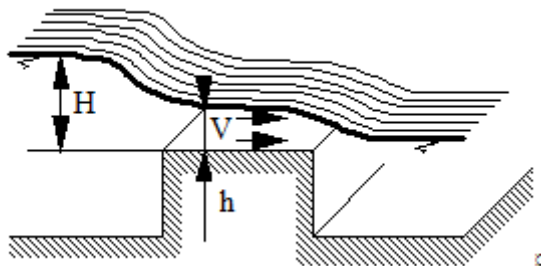


Figure 2.9. Déversoir à seuil épais

$$Q = Q_{max} \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial h} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial h} = L\sqrt{2gh(H - h)} - \frac{Lh}{2} \frac{2g}{\sqrt{2g(H - h)}} = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial h} = L\sqrt{2gh(H - h)} - \frac{Lh}{2} \frac{2g}{\sqrt{2g(H - h)}} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial h} = 0 \Rightarrow h = \frac{2}{3} H \quad (2.11)$$

D'où :

$$Q_{max} = 0.385 L H \sqrt{2gH} \quad (2.12)$$

2.2.3. Déversoir à seuil déversant

Ce type de déversoir est principalement employé comme évacuateur de crue de barrages. Le but recherché est un profil donnant le meilleur coefficient de débit μ (minimisation du volume de béton), tout en respectant une marge de sécurité en regard des effets destructeurs de la lame déversante.

Prenons pour profil de référence celui de la lame naturelle pour une charge donnée. Si la charge (et le débit) augmente la paroi se trouvera en dessous du profil théorique, ce qui améliore le coefficient de débit mais provoque par contre une dépression et donc des risques d'altération du parement aval de l'ouvrage. En général, on cherche un compromis et parmi ceux-ci, celui proposé par Creager est des plus utilisés. Le coefficient de débit μ est de 0,492. Ce profil calculé pour une charge H présente une sécurité de 10% (pas de dépression si $H' < 1,1H$).

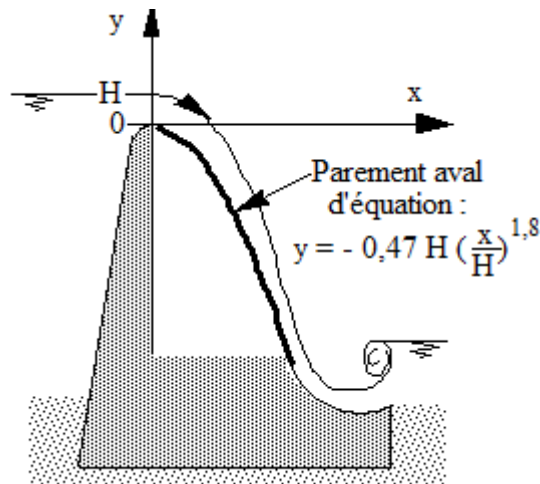


Figure 2.10. Déversoir à seuil déversant

2.3. Ecoulement par nappe noyée en dessous

Dans le cas d'une nappe noyée en dessous, sans ressaut ou avec un ressaut éloigné on pourra utiliser les formules des déversoirs avec nappe libre mais en multipliant le coefficient de débit (μ) par un terme correctif (k) tel que :

$$k = 0,878 + 0,128 \frac{z}{H} \quad (2.13)$$

Sous réserve : $H > 0,75 z - H_1$ et $H > H_1$ ou $H > 0,375 z$

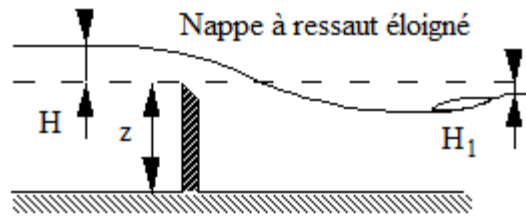


Figure 2.11. Déversoir par nappe noyée

Si le ressaut recouvre le pied de la nappe on prendra un terme correctif (k) tel que :

$$k = 1,05 + 0,15 \frac{H_1}{H} \quad (2.14)$$

Sous réserve d'avoir : $H > H_1$

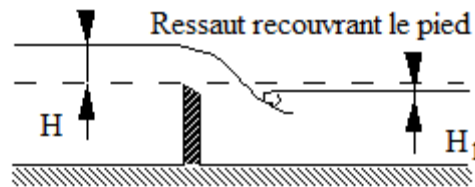


Figure 2.12. Déversoir par nappe noyée avec ressaut recouvrant le pied

2.4. Déversoir latérale

C'est une ouverture ménagée dans la paroi d'un canal ayant un écoulement à surface libre. (Voir Figure 2.13)

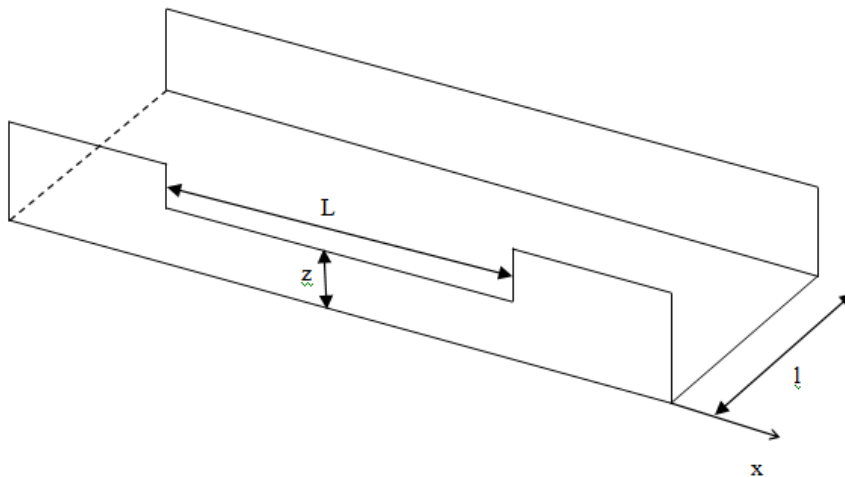


Figure 2.13. Profil d'un déversoir latéral

L : Longueur
z : pelle

Si l'on suppose que le déversoir est court (perte de charge négligeable), l'équation de l'énergie dans une section transversale du canal ayant une charge d'eau H est constante est :

$$E = H + \frac{V^2}{2g} \quad (2.15)$$

Cette énergie est constante le long du profil en long du déversoir. La vitesse de l'eau est constante et est égale à :

$$V = \frac{Q}{S_m} \quad (2.16)$$

La hauteur H est variable dans le sens de la longueur. Le régime peut être fluvial ou torrentiel. L'équation précédente peut s'écrire :

$$E = H + \frac{Q^2}{2gS_m^2} \Rightarrow Q = S_m \sqrt{2g(E - H)} \quad (2.17)$$

En dérivant cette expression dans laquelle H et S_m sont des variables, il vient que :

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{dQ}{dH} \frac{dH}{dx} = \left(\frac{dS_m}{dH} \sqrt{2g(E - H)} - \frac{2gS_m}{2\sqrt{2g(E-H)}} \right) \frac{dH}{dx} \quad (2.18)$$

Comme :

$$\frac{dS_m}{dH} = l \quad (2.19)$$

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{dH}{dx} \left(\frac{lQ^2 - gS_m^3}{S_m Q} \right) \quad (2.20)$$

Comme le débit du déversoir décroît le long de x, par suite le débit déversé (dQ/dx) est négatif d'où si $lQ^2 - gS_m^3 > 0$ ou $lQ^2 > gS_m^3 \Rightarrow Fr > 1$. Cela veut dire que si le régime dans le canal est torrentiel on a : $\frac{dH}{dx} < 0$ et la ligne d'eau s'abaisse le long du seuil, le débit par unité de largeur du seuil est décroissant dans cette direction

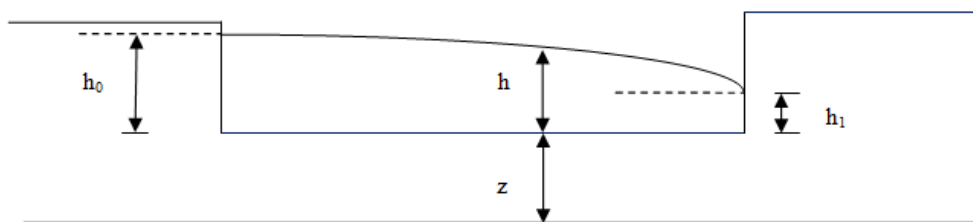


Figure 2.14. Déversoir latéral avec régime torrentiel

- Si $lQ^2 - gS_m^3 < 0$ ou $lQ^2 < gS_m^3 \Rightarrow \frac{lQ^2}{gS_m^3} \Rightarrow Fr < 1$; cela veut dire que le régime dans le canal est fluvial et la ligne d'eau s'élève le long du seuil $\frac{dH}{dx} > 0$ et le débit est croissant dans cette direction

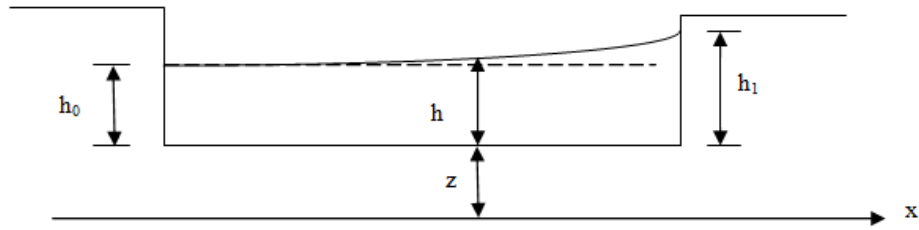


Figure 2.15. Déversoir latéral avec régime fluvial

Le débit d'un déversoir latéral est déterminé par la relation générale valable pour les déversoirs ordinaires à savoir :

$$Q = mLh\sqrt{2gh} \quad (2.21)$$

Avec (h) : est la charge hydraulique mesurée au milieu de l'échancrure et m : le coefficient du débit.

2.5. Déversoir circulaire

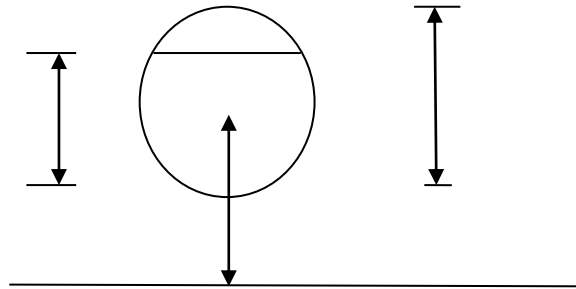


Figure 2.16. Déversoir circulaire

Le débit est déterminé par la relation de Staucs et Von Sanden (1930)

$$Q = cKd^{5/2} \quad (2.22)$$

Avec k est un coefficient numérique fonction du rapport (h/d) :

$$k = 3.203 \left(\frac{h}{d}\right)^{1.975} - 0.842 \left(\frac{h}{d}\right)^{3.78} \quad (2.23)$$

C'est un coefficient expérimental sans dimension qui est fonction du rapport (h/d) et de la section mouillée.

$$c = \left(0.555 \frac{d}{110h} + 0.041 \frac{h}{d}\right) \left(\frac{2d}{L}\right)^{0.0625} \quad (2.24)$$

L : largeur du canal d'amenée en amont du déversoir

z : distance du centre du déversoir au fond du canal.

2.6. Déversoir trapézoïdal à profil convergent vers le haut

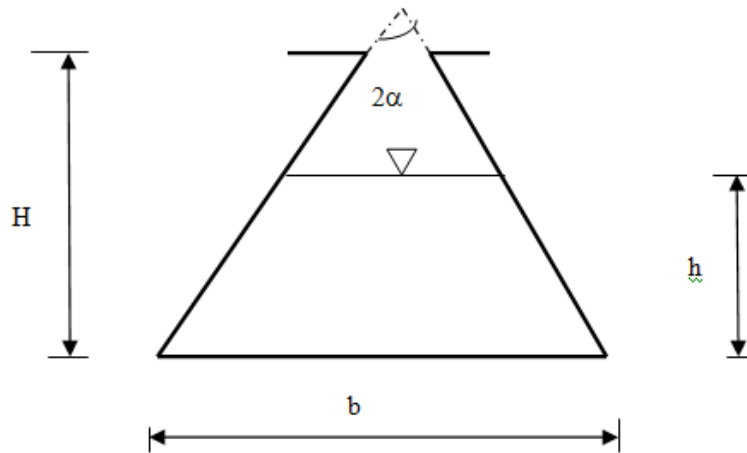


Figure 2.17. Déversoir trapézoïdal

Le débit est donné par la relation :

$$Q = \frac{2}{3} m b h \sqrt{2gh} \left(1 - \frac{4h}{5b} tg\alpha \right) \quad (2.25)$$

Exercices

Exercice N°1.

Le seuil (AB) d'un déversoir de largeur L est suffisamment long pour que dans la section (s) la lame d'eau y coule en filets parallèles horizontaux et que la vitesse (v) y soit considérée comme uniforme (voir Figure 2.18).

1. Calculer en fonction de la baisse de niveau y le débit qui traverse la section (s) pour une largeur (L).
2. Pour quelle valeur de (y) le débit est -il maximal ?
3. L'expérience montre que c'est effectivement ce débit qui s'écoule en réalité. Le calculer dans le cas où v_0 est négligeable.

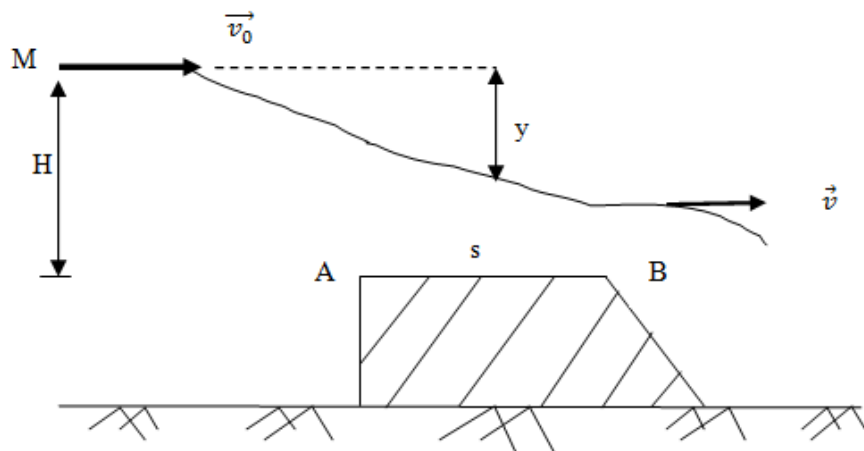


Figure 2.18. Déversoir long exercice N°1

Solution :

1. En appliquant le théorème de Bernoulli entre le point M et un point quelconque de la section (s) on a :

$$\frac{v_0^2}{2g} + H = \frac{v^2}{2g} + (H - y) ; \text{ On prend comme référence le plan passant par (AB).}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2gy \Rightarrow v = \sqrt{2gy + v_0^2}$$

D'où le débit pour une largeur L du déversoir est :

$$Q = L(H - y)\sqrt{v_0^2 + 2gy}$$

2. Le débit est maximal si et seulement si $\frac{dQ}{dy} = 0$

$$\frac{dQ}{dy} = -L\sqrt{v_0^2 + 2gy} + \frac{2g}{2\sqrt{v_0^2 + 2gy}}(L(H - y)) = 0$$

$$\frac{-2L(\sqrt{v_0^2 + 2gy}) + 2gL(H - y)}{2\sqrt{v_0^2 + 2gy}} = 0$$

$$-\left(\sqrt{v_0^2 + 2gy}\right) + g(H - y) = 0$$

$$-v_0^2 - 2gy + gH - gy = 0$$

$$gH - v_0^2 = 3gy \Rightarrow y = \frac{gH - v_0^2}{3g}$$

3. Le débit maximal est :

$$Q_{max} = L\left(H - \frac{gH - v_0^2}{3g}\right)\sqrt{v_0^2 + 2g\left(\frac{gH - v_0^2}{3g}\right)}$$

Si v est négligeable on aura :

$$Q_{max} = L\left(H - \frac{H}{3}\right)\sqrt{2g\frac{H}{3}}$$

$$Q_{max} = \frac{2LH}{3\sqrt{3}}\sqrt{2gH}$$

$$Q_{max} = \frac{2}{3\sqrt{3}}L\sqrt{2g}H^{3/2}$$

$$Q_{max} = 1,7 L H^{3/2}$$

Remarque :

En réalité le débit est : $Q_{max} = 1,55 L H^{3/2}$ la différence d'ordre de 10% est due principalement au frottement sur les parois

Exercice N°2

Déterminer la largeur du déversoir rectangulaire à mince paroi si le débit est de 520 l/s, la hauteur de pelle $z=0,4m$, la charge hydraulique est $H=0,35m$ et la largeur du canal $L= 2,4m$

Solution :

En supposant que le déversoir est sans contraction, on détermine le coefficient du débit par la formule de Bazin

$$\mu = \left(0.405 + \frac{0.003}{H}\right) \left(1 + 0.55 \left(\frac{H}{H+z}\right)^2\right)$$

$$\mu = \left(0.405 + \frac{0.003}{0.35}\right) \left(1 + 0.55 \left(\frac{0.35}{0.35+0.4}\right)^2\right)$$

$$\mu = 0.46$$

$$Q = \mu l H \sqrt{2gH} \Rightarrow l = \frac{Q}{\mu H^{3/2} \sqrt{2g}}$$

$$l = \frac{0.52}{0.46 * 0.35^{3/2} \sqrt{2} * 9.81}$$

$$l = 1.23m$$

Comme la largeur donnée du canal est $L=2.4m > l=1.23m$ donc il y'a contraction. Le coefficient μ sera déterminé par la relation de Hegly

$$\mu_c = \left(0.405 + \frac{0.0027}{H} - 0.03 \frac{L_1 - L}{L_1}\right) \left(1 + 0.55 \left(\frac{L}{L_1}\right)^2 \left(\frac{H}{H+z}\right)^2\right)$$

$$\mu_c = \left(0.405 + \frac{0.0027}{0.35} - 0.03 \frac{2.4 - 1.23}{2.4}\right) \left(1 + 0.55 \left(\frac{1.23}{2.4}\right)^2 \left(\frac{0.35}{0.35+0.4}\right)^2\right) = 0.41$$

On recalcule (1) avec $\mu = 0.41$

$$l = \frac{Q}{\mu_c H^{3/2} \sqrt{2g}}$$

$$l = \frac{0.52}{0.41 * 0.35^{3/2} \sqrt{2} * 9.81} = 1.38m$$

On remplace l par 1.38 dans la formule de Hegly et on remarque une deuxième fois μ_c

$$\mu_c = \left(0.405 + \frac{0.0027}{H} - 0.03 \frac{L_1 - L}{L_1}\right) \left(1 + 0.55 \left(\frac{1.23}{2.4}\right)^2 \left(\frac{0.35}{0.35+0.4}\right)^2\right) = 0.41$$

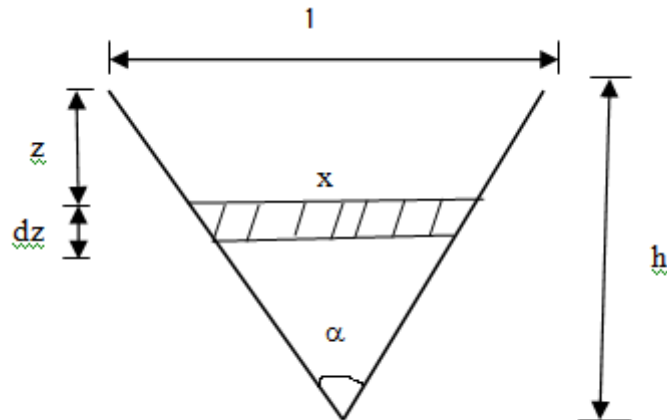
Donc la valeur de $l=1.38m$ est acceptable et finalement on prendra $l=1.38m$

Exercice N°3

Montrer que si le coefficient du débit pour un déversoir à échancrure triangulaire est (μ), le débit de ce déversoir prend la formule :

$$Q = \frac{4}{15} \mu l h \sqrt{2gh}$$

Avec : (h) est la hauteur du déversoir et (l), largeur en haut plafond

Solution :**Figure 2.19.** Déversoir triangulaire exercice N°3

Le débit pour une tranche élémentaire dz vaut :

$$dQ = \mu x dz \sqrt{2gz}$$

Sachant que la vitesse moyenne de la tranche est :

$$v = \sqrt{2gz}$$

Cherchons la relation $x=f(z)$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{l/2}{h} = \frac{x/2}{h-z}$$

Donc :

$$x = \frac{l}{h}(h-z)$$

$$dQ = \mu \frac{l}{h}(h-z)\sqrt{2gz} dz$$

$$Q = \int_0^h \mu \frac{l}{h}(h-z)\sqrt{2gz} dz$$

$$Q = \int_0^h \frac{\mu l}{h}(h\sqrt{2gz} - z\sqrt{2gz}) dz$$

$$Q = \frac{\mu l}{h} \left(h\sqrt{2g} \frac{h^{3/2}}{3/2} - \sqrt{2g} \frac{h^{5/2}}{5/2} \right)$$

$$Q = \frac{\mu l}{h} \sqrt{2g} \left(\frac{2h}{3} h^{3/2} - \frac{2}{5} h h^{3/2} \right)$$

$$Q = \mu l \sqrt{2g} \left(\frac{2}{3} h^{3/2} - \frac{2}{5} h^{3/2} \right)$$

$$Q = \frac{4}{15} \mu l h \sqrt{2gh}$$

D'où en introduisant l'angle α on a :

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{l/2}{h} = \frac{l}{2h} \Rightarrow l = \tan \frac{\alpha}{2} * 2h$$

$$Q = \frac{4}{15} \mu \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) 2h h \sqrt{2gh}$$

$$Q = \frac{8}{15} \mu h^2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{2gh}$$

Généralement la valeur de μ varie en fonction du rapport (l/h) :

Pour un déversoir vertical à crête mince et à nappe libre :

Pour $l/h = 2$ on a $\mu = 0.59$ et pour $l/h = 4$ on a : $\mu = 0.62$

Si l'angle de l'échancrure est égal à 90° on a : $l/h = 2$ et la formule devient

$Q = 1.4h^{5/2}$ C'est la formule de Thomson.

Exercice N° 4

Montrer que pour un déversoir trapézoïdal C'est-à-dire que si l'échancrure du déversoir est de forme trapèze isocèle, le débit d'écoulement prend la forme :

$$Q = \mu l h \sqrt{2gh} + \frac{8}{15} \mu_1 l' \sqrt{2gh}$$

Sachant que : μ est le coefficient du débit de la partie rectangulaire et μ_1 est le coefficient du débit de la partie triangulaire.

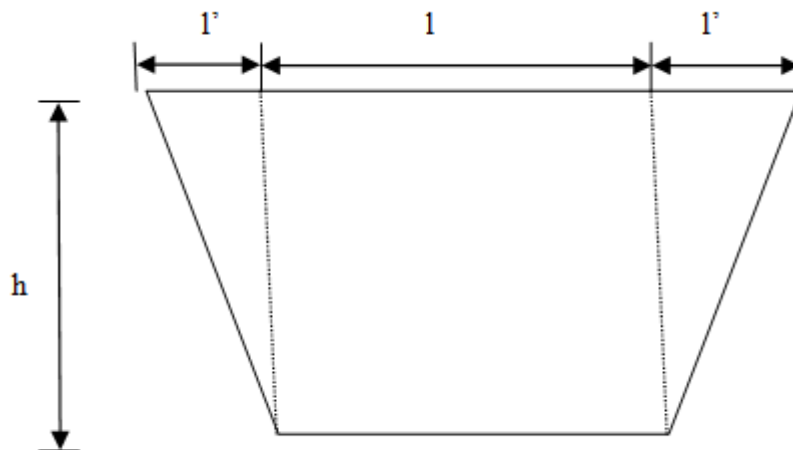


Figure 2.20. Déversoir trapézoïdal exerce N°4

Réponse

Le débit pourra être calculé comme la sommation des débits $Q_1 + Q_2$ avec :
 Q_1 est le débit de la partie rectangulaire et Q_2 celui de la partie triangulaire

$$Q_1 = \mu l h \sqrt{2gh}$$

$$Q_2 = \frac{4}{15} (2l') \mu_1 h \sqrt{2gh} = \frac{8}{15} l' \mu_1 h \sqrt{2gh}$$

$$Q = \mu l h \sqrt{2gh} + \frac{8}{15} l' \mu_1 h \sqrt{2gh}$$

Exercice N°5

Déterminer le débit passant par un déversoir rectangulaire sans contraction tel que $b=80$ cm ; $z=40$ cm ; $H=20$ cm.

Réponse :

Calculons le coefficient du débit pour le déversoir sans contraction :

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

$$\mu = \left[0,405 + \frac{0,003}{0,20} \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{0,20}{0,20+0,40} \right)^2 \right]$$

$$\mu = 0,445$$

$$Q = \mu b \sqrt{2g} H^{3/2}$$

$$Q = 0,445 \cdot 0,8 \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 0,2^{3/2} = 0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 141,2 \text{ l/s}$$

Exercice N°6

Déterminer le débit Q passant à travers un déversoir rectangulaire avec contraction latérale sachant que : $H=1,6$ m ; $b=2,5$ m ; $B=3,5$ m ; $z=0,7$ m.

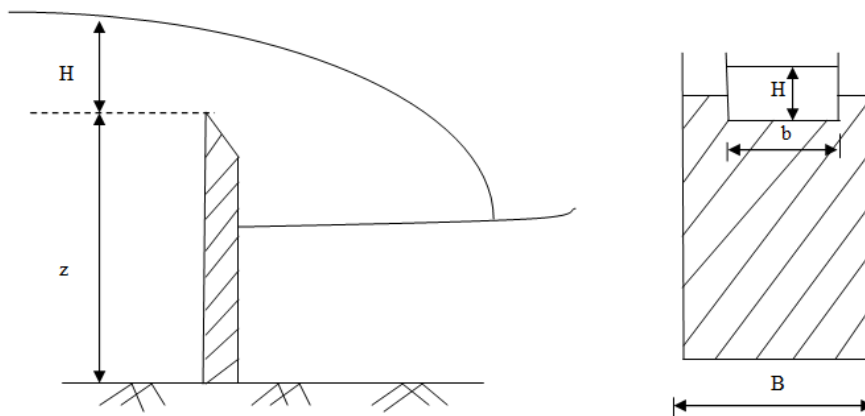


Figure 2.21. Exercice N°6

Réponse :

On a :

$$Q = \mu_c b \sqrt{2g} H^{3/2}$$

Avec :

$$\mu_c = \left(0.405 + \frac{0.0027}{H} - 0.03 \left(1 - \frac{b}{B} \right) \right) \left(1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{H}{H+z} \right)^2 \right)$$

Application numérique :

$$\mu_c = \left(0.405 + \frac{0.0027}{1.6} - 0.03 \left(1 - \frac{2.5}{3.5} \right) \right) \left(1 + 0.55 \left(\frac{2.5}{3.5} \right)^2 \left(\frac{1.6}{1.6+0.7} \right)^2 \right) = 0.334$$

$$Q = 0.334 \cdot 2.5 \sqrt{2 \cdot 9.81} 1.6^{3/2} = 7.48 \text{ m}^3/\text{s}$$

Chapitre 3

Notion de morphologie des cours d'eau

3.1. Introduction

Ce premier chapitre présente la terminologie décrivant les cours d'eau, les vues transversales et longitudinales, les caractéristiques géométriques et les types d'écoulement susceptible d'être rencontrés.

3.2. Définitions

De nombreux termes sont utilisés pour désigner les structures dans lesquelles l'eau s'écoule. Voici les principaux termes et les définitions que le dictionnaire Larousse en donne :

Cours d'eau : 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. Au Québec, le cours d'eau a une définition juridique.

Canal : un chenal artificiel creusé par l'homme et utilisé soit pour la navigation ou le flottage, soit pour l'irrigation ou l'assèchement de certaines régions. Les canaux suivent en général de longues lignes droites.

Il existe un grand nombre de mots pour désigner les différents types de cours d'eau.

Ruisseau : petit cours d'eau, de faible largeur et de longueur limitée, alimentée par des eaux naturelles, souvent affluent d'un étang, d'un lac ou d'une rivière. Les ruisseaux se trouvent à la tête des bassins versants.

Rivière : cours d'eau moyennement important, à écoulement continu ou intermittent, suivant un tracé défini et se jetant dans un autre cours d'eau, un lac, une mer abondante, et particulièrement celui qui se jette dans un fleuve.

Fleuve : cours d'eau important, long et au débit élevé, comptant de nombreux affluents et se jetant dans la mer.

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.

Torrent : cours d'eau au débit rapide et régulier, situé sur une pente plus ou moins prononcée. Les torrents se retrouvent sur des terrains accidentés ou en montagne. Ce terme est utilisé principalement pour désigner les cours d'eau de montagne avec un lit rocheux et encaissé.

Fossé : fosse creusée en long dans le sol servant à l'écoulement des eaux, à la séparation des terrains (ex. fossé de voie publique ou privée, fossé mitoyen, fossé de drainage).

Émissaire : canal d'évacuation des eaux de drainage.

Dans ce document, nous n'utiliserons que les termes "cours d'eau" et "canal".

3.2.1 Glossaire

Amont : Partie d'un cours d'eau qui, par rapport à un point donné, se situe entre ce point et sa source.

Aval : Partie d'un cours d'eau qui, par rapport à un point donné, se situe après ce point, dans le sens de l'écoulement de l'eau.

Bassin versant : Région géographique naturelle drainée par un ou plusieurs cours d'eau et leurs affluents.

Berge : Bord permanent d'un cours d'eau, situé au-dessus du niveau normal de l'eau. La berge est caractérisée par sa forme transversale (berge en pente douce, berge abrupte), sa composition (sableuse, marneuse), sa végétation (herbacée, arbustive).

Continuité écologique : La libre circulation des espèces biologiques et le bon écoulement du transport naturel des sédiments d'un cours d'eau.

Crue : Phénomène caractérisé par une montée plus ou moins brutale du niveau d'un cours d'eau, liée à une croissance du débit. La crue ne se traduit pas toujours par un débordement du lit* mineur.

Débit : Volume d'eau qui traverse une section transversale d'un cours d'eau par unité de temps (m³/s).

Embâcle : Obstruction d'un cours d'eau par un amas de débris végétaux.

Erosion : Arrachement des particules du fond et des berges sous l'effet de la force du courant.

Etiage : Période de l'année durant laquelle le niveau du cours d'eau est le plus bas.

Faciès d'écoulement : Type d'écoulement des eaux d'un cours d'eau désignant des zones rapides (cascades, radiers,...) et/ou des secteurs plus lents (plats, mouilles, fosses,...).

Génie végétal : Science qui étudie les techniques utilisant des plantes afin de réaliser des aménagements de protection contre l'érosion, de stabilisation des berges et des sols.

Hydromorphologie : Etude des paramètres hydrauliques, (régime hydraulique, faciès d'écoulement) et de la forme d'un cours d'eau (lit mineur, berges, annexes hydrauliques).

Lit majeur : Espace situé entre le lit mineur et la limite de la plus grande crue connue.

Lit mineur : Partie du lit comprise entre des berges franches ou bien marquées, dans laquelle l'intégralité de l'écoulement s'effectue la quasi-totalité du temps (en dehors des périodes de crues débordantes).

Masse d'eau : Ce terme, introduit par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), désigne un milieu aquatique homogène : cours d'eau, nappe d'eau souterraine, plan d'eau...

Puissance spécifique : Elle correspond sommairement au produit de la pente et du débit, qui caractérise les potentialités dynamiques du cours d'eau.

Ripisylve : Formation végétale (arbustive ou arborescente) en bordure de cours d'eau.

Zone d'expansion de crue : Espaces naturels ou aménagés (bassin de rétention) dans lesquels les eaux de débordement peuvent se répandre en période de crue, sans porter atteinte aux biens et aux personnes

3.2.2. Rives gauche et droite

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.

3.3. Cours d'eau, vue transversale

3.3.1. Lit du cours d'eau

Le niveau d'eau et l'espace occupé par le cours d'eau varie en fonction de son débit. Un cours d'eau analysée selon sa coupe transversale (Figure 3.1) 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.

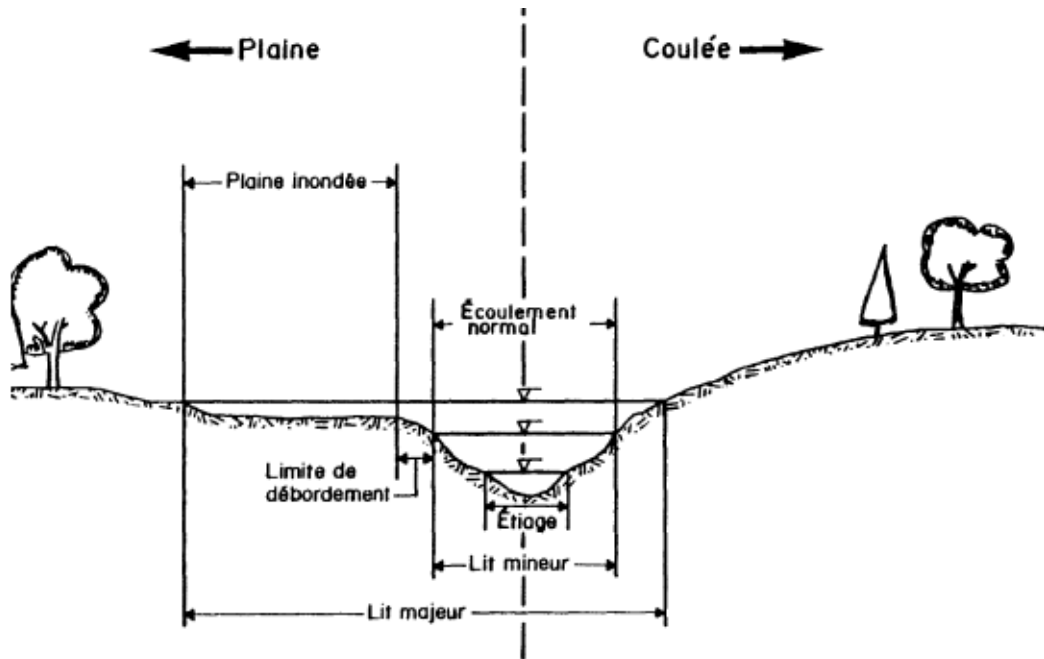


Figure 3.1. Coupe transversale d'un cours d'eau.

Les principaux termes sont :

Lit : désigne tout l'espace occupé, en permanence ou temporairement, par un cours d'eau.

Lit mineur : lit du cours d'eau en écoulement normal.

Lit majeur : lit qu'occupe le cours d'eau lors des crues, incluant les zones inondées.

Lit d'étiage ou **chenal d'étiage** : partie du cours d'eau occupé lors des étiages.

Plaine d'inondation : zone de terrain inondée lors du chenal du cours d'eau lorsque le cours d'eau est en crue.

3.3.2. La berge

La berge est la portion de terrain qui limite tout cours d'eau et elle est subdivisée en deux parties (Figure 3.2.) :

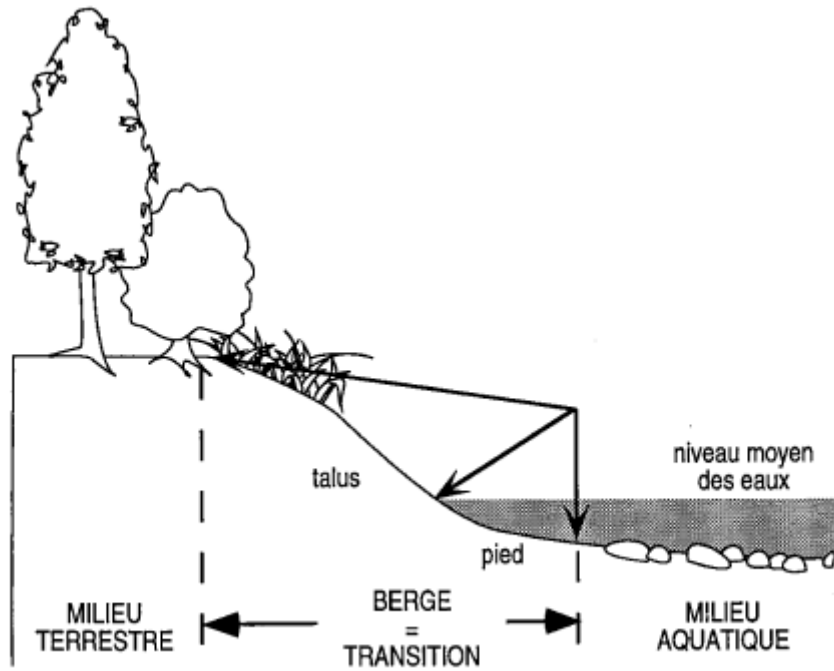


Figure 3.2. La berge dans un cours d'eau (Verniers, 1995).

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 ;

La limite inférieure de la berge est le point le plus bas du pied (fond du lit); la limite supérieure étant le point le plus haut du talus au-delà duquel on considère la plaine alluviale. Ces limites déterminent ce que l'on appelle le lit mineur du cours d'eau.

La berge, c'est aussi la zone de transition entre le milieu aquatique et le milieu terrestre. De part cette situation, elle possède une grande valeur écologique. En effet, la constitution d'une lisière augmente la gamme des micros habitats favorisant de ce fait la diversité et la densité des espèces végétales et animales

3.4. Cours d'eau, vue longitudinale

L'espace longitudinal et latéral qu'occupe un cours d'eau et ses composantes (chenal principal et plaine d'inondation) est appelé "**corridor du cours d'eau**" (Figure. 3.3). La figure présente aussi les principaux termes utilisés

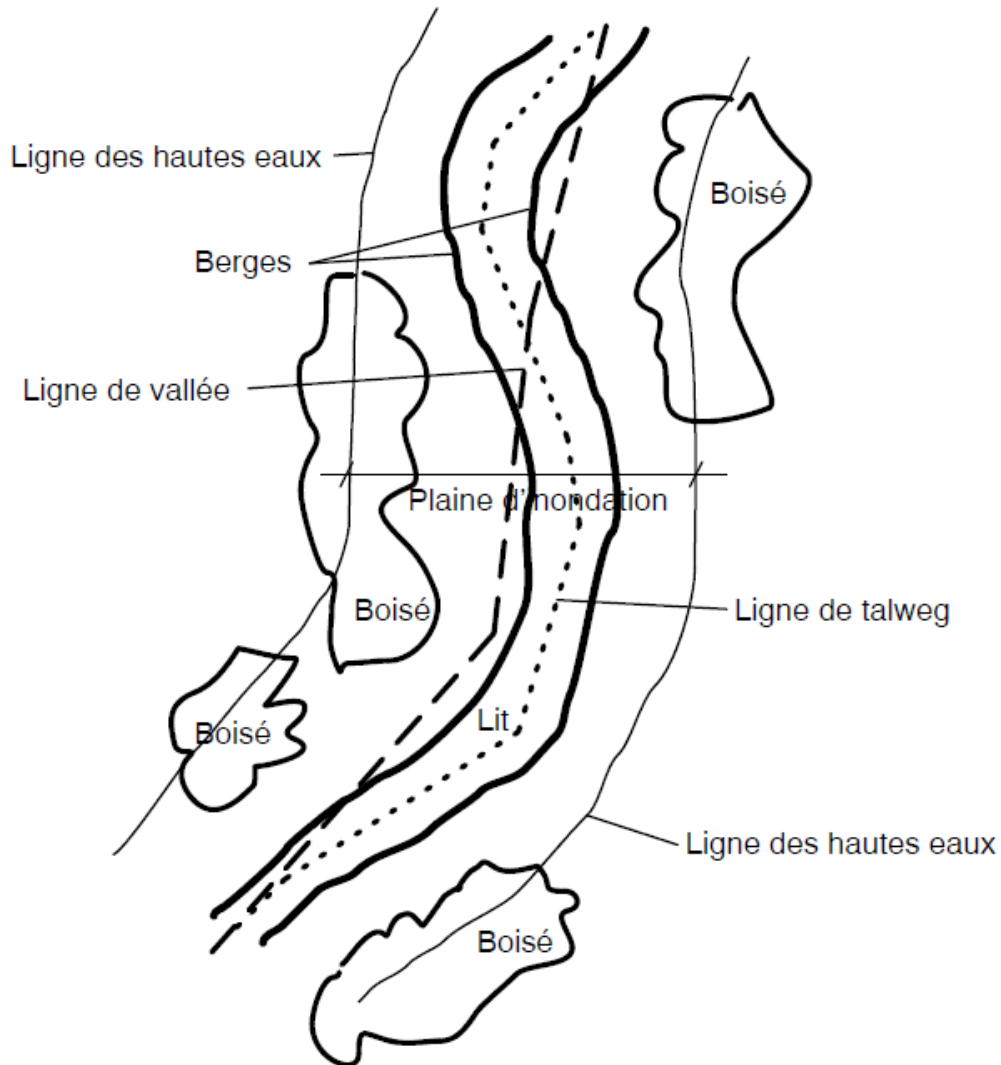


Figure 3.3. Concept de corridor d'un cours d'eau

La description longitudinale d'un cours d'eau est souvent représentée par le profil longitudinal (Figure 3.4) qui représente l'élévation du fond du cours d'eau en suivant la ligne du talweg du cours d'eau (endroit le plus profond). Le haut de la berge et les structures (ponceaux, barrages, etc.) installées le long du cours d'eau peuvent aussi y être présentés.

Un cours d'eau peut être divisé en tronçons à l'intérieur desquelles les caractéristiques sont similaires ou relativement uniformes.

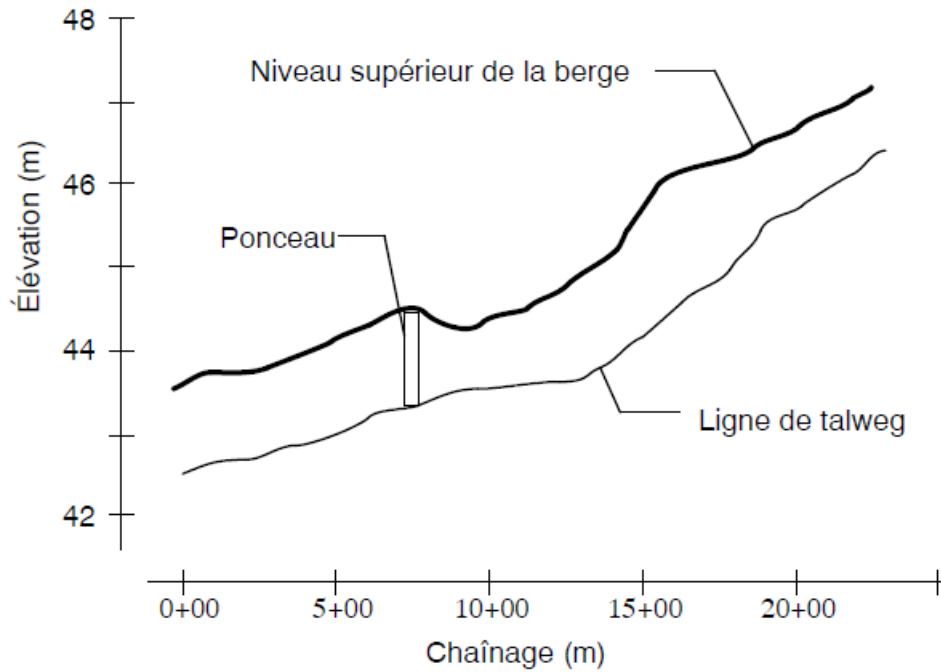


Figure 3.4. Profil longitudinal d'un cours d'eau

La sinuosité est définie comme le rapport de la longueur de la ligne de talweg sur la longueur de la ligne de vallée pour un tronçon.

$$\sin = \frac{L_{ta}}{L_{va}} \quad (3.1)$$

Sin = sinuosité

L_{ta} = Longueur de la ligne de talweg (L)

L_{va} = Longueur de la ligne de vallée (L)

Lorsque cette valeur est supérieure à **1,3**, le tronçon du cours d'eau est considéré comme sinueux.

Chapitre 4

Différents types d'aménagements hydrauliques

4.1. Introduction

Dans plusieurs pays à travers le monde les cours d'eau ont été largement artificialisés durant la deuxième moitié du 19^{ème} siècle et tout au long du 20^{ème} siècle. Leurs fonctionnements hydro-sédimentaires ont été bouleversés, parfois de façon irréversible, par les modifications de l'occupation des sols des bassins versants, qui sont à l'origine des flux, et de leur transfert (liquide et solide), associé au contrôle du réseau hydrographique. Trois principales interventions anthropiques directes dans le chenal en eau et sur les berges ont été bien souvent observées (Tableau 1.1) :

- La chenalisation et la protection des berges,
- L'extraction de matériaux dans le lit mineur,
- L'implantation d'ouvrages hydrauliques transversaux (seuils et barrages)

Tableau 4.1. Principales interventions humaines directes sur la morphologie des cours d'eau et leur intensité de modérée (+) à forte (+) (Malavoi, 2007)

Interventions	Périodes	Intensité	Objectif(s)/usages
Chenalisation (recalibrage, rectification, rescindement des méandres)	- Dès le 18 ^e et le 19 ^e siècle	+	- Réduire les conséquences des inondations et l'érosion des terres riveraines - Navigation
	- Début des années 1950/fin des années 80	+++	Réduire les conséquences des inondations et l'érosion des terres riveraines
Extraction des matériaux en lit mineurs	Depuis l'antiquité	+	Matériaux de construction bon marché (bâtiment voirie, etc.)
	19 ^e siècle	++	
	20 ^e siècle	+++ (mécanisation des outils)	
Implantation de barrage et de seuils	- Moyen âge au 19 ^e siècle	+++	Usages initiaux : meunerie, forge irrigation, flottage, pisciculture, etc.+ début de l'hydroélectricité (19 ^e)
	- 20 ^e siècle	+	Abandon des usages initiaux et développement de l'hydroélectricité (barrages + stabilisation des lits)
	- Années 1980	+	Seuils de compensation et de résorption des impacts physiques et écologiques du recalibrage

Les travaux de chenalisation consistent en un ensemble d'interventions humaines modifiant directement la géométrie du lit mineur. On distingue cinq types d'interventions principales, parmi les méthodes couramment employées pour la chenalisation (Tableau 4.2)

Tableau 4.2. Principaux types d'interventions en rivière relevant de la chenalisation

Intervention	Méthode	Conséquences sur le lit
Recalibrage	Elargissement et approfondissement du chenal	Augmentation de la capacité d'évacuation des débits de crue du lit
Réalignement Rectification	Raccourcissement d'une portion sinueuse ou méandrique par recoupements artificiels des coudes	Augmentation de la vitesse du courant par augmentation de la pente.
Endiguement	Augmentation localisée ou étendue de la hauteur des berges	Limitation des débordements, protection des espaces agricoles et urbanisés contre les crues et contre les érosions dues à l'ajustement des rivières, augmentation de la capacité hydraulique du lit en hautes eaux.
Protection de berges	Aménagements localisés de structures fixes telles que les épis, implantés dans les concavités des sinuosités	Contrôle de l'érosion des berges
Entretien Curage	Enlèvement des obstructions, curage des matériaux du lit	Réduction de la rugosité du lit et de la pente de la ligne d'eau

Les premiers travaux ont consisté à endiguer les cours d'eau (Tableau 4.2). L'objectif était de protéger les terres riveraines contre les inondations et les érosions de berges, principalement en réponse à des besoins agricoles, industriels et urbains, mais aussi pour protéger des sites nouvellement exposés aux crues en raison d'une pression urbaine de plus en plus forte le long des rivières.

Les impacts hydromorphologiques et écologiques de la chenalisation sur le système fluvial sont très complexes et dépendent du type d'aménagement mis en place. Par exemple, le blocage de la dynamique latérale entraîne une réduction de la diversité morphologique du corridor fluvial et de sa qualité écologique (déconnexion des marges alluviales et du chenal principal, réduction de la capacité d'autoépuration). La diminution des apports latéraux peut aussi provoquer un déséquilibre entre débit solide et débit liquide conduisant à la diminution de la diversité des faciès morphologiques et donc des habitats aquatiques.

Parmi les cinq types d'intervention visant à la chenalisation, la rectification est le type d'intervention privilégié conduisant à une diminution de la longueur développée du cours d'eau, c'est-à-dire sa canalisation. La pente se voit ainsi augmentée, entraînant une élévation des forces tractrices (ou contrainte de cisaillement ou encore *shear stress*) et de la puissance fluviale (ou *stream power*), donc de la capacité de transport, provoquant alors une incision. Cette incision est souvent amplifiée par l'artificialisation des berges qui empêche la recharge par érosion latérale et par la perte de connectivité transversale entre le chenal et le lit majeur, notamment lors des crues.

Des travaux de curage, recalibrage, ou de déplacement peuvent impacter fortement les fonctionnalités d'un cours d'eau. L'ensemble de ces processus : érosion, transport et sédimentation, constitue la dynamique fluviale, clé fondamentale du fonctionnement du cours d'eau.

Cette dynamique est régie par les apports solides (les sédiments ayant pour origine les versants, les affluents, ou encore ceux arrachés par la rivière à ses berges) et par les apports liquides (précipitations, ruissellement, apports des affluents...) au cours d'eau. D'autres paramètres interviennent également comme la pente de la rivière et surtout la nature des sédiments de ses berges et de son lit qui conditionne leur érodabilité. Plus la pente est forte et plus la vitesse du courant est accrue. L'énergie de la rivière est alors telle qu'elle l'évacue en érodant ses berges et en charriant sa charge solide. L'érosion est d'autant plus facile et importante que les sédiments sont meubles et friables. La géologie

et l'hydrologie influent donc sur la dynamique fluviale. Apports liquides et solides varient énormément dans le temps et dans l'espace. La rivière adapte en permanence sa morphologie, son tracé, à ces fluctuations. La dynamique n'est donc pas la même en tout lieu et en tout temps.

Les crues sont également une composante majeure de la dynamique fluviale. En effet, bien qu'occasionnelles, elles sont un puissant vecteur d'érosion des berges : la hauteur et les volumes d'eau étant considérablement augmentés lors d'une crue et la vitesse du courant découplée, l'érosion est amplifiée.

Les altérations hydro morphologiques, qui modifient le fonctionnement naturel des cours d'eau, sont liées aux pressions anthropiques qui s'exercent sur les sols du bassin versant et sur les cours d'eau. Les obstacles à l'écoulement, la chenalisation, le curage, la rectification du tracé, l'extraction de granulats, la suppression de ripisylve, le drainage, l'irrigation, l'imperméabilisation ou le retournement des sols sont autant de sources d'altérations hydro morphologiques qui nécessitent la mise en œuvre de travaux ou d'aménagements visant à restaurer les fonctionnalités initiales.

4.2. Les différents aménagements répertoriés sont :

Canalisation : Un canal est une machine hydraulique aménagée par l'homme dont le concepteur doit assurer la permanence d'une alimentation en eau suffisante à sa fonction (voie navigable, voie d'alimentation en eau, irrigation...) au milieu d'un environnement plus ou moins difficile.

L'homme modifie alors les caractéristiques géométriques et hydrauliques d'un cours d'eau, par curages, creusements, rectifications, élargissement, bétonnage des berges et du fond, recalibrage...

Dragage : approfondissement du lit mineur par prélèvement de ses matériaux. Selon les techniques utilisées, les sédiments en suspension lors de cette opération sont plus ou moins nombreux, perturbant la quantité de lumière, remettant en suspension les différents polluants qui étaient piégés dans les sédiments, supprimant la végétation, dénaturant le substrat du fond du lit.

Creuser le lit mineur c'est dans tous les cas, augmenter la pente et donc accélérer le courant (lire l'article hydro morphologie) et l'enfoncement du lit d'un cours d'eau abaisse le niveau de sa nappe d'accompagnement, ce qui nuit aux boisements riverains, aux sources.

Couverture de cours d'eau : chenalisation poussée à l'extrême, notamment en milieu urbain ou périurbain, avec la couverture ou la mise sous tuyau complète du cours d'eau sur des linéaires pouvant être très importants. Ces actions ont occasionnellement été conduites en milieu rural dans le but de « gagner » des terrains agricoles et de favoriser l'intensification de l'agriculture. Les cours d'eau touchés par ce type d'intervention ont donc complètement disparu des cartes... et de la surface de la Terre.

La couverture complète de cours d'eau est sans conteste l'intervention humaine la plus traumatisante pour le milieu naturel puisqu'elle se traduit par la disparition totale de ce dernier. Il s'agit alors à la fois d'une disparition complète des habitats, des faciès, de la ripisylve, des relations entre la nappe et les berges, etc., mais également d'une discontinuité écologique majeure sur le réseau fluvial.

Endiguement : augmentation de la hauteur des berges pour éviter le débordement des eaux et pour préserver le maximum d'espace pour l'agriculture et l'urbanisation. Dans les plaines alluviales, des milliers de kilomètres de berges de cours d'eau ont été protégés contre les processus d'érosion, le plus souvent au moyen de techniques dites "lourdes" à base de perrés, de murs de béton, d'enrochements, d'épis, de palplanches, de gabions, etc.

Un hydro système fluvial naturel est caractérisé par une diversité géomorphologique dont le moteur est, notamment dans un cours d'eau à méandres, l'érosion des berges et la migration latérale du chenal vif. Ces processus d'érosion, de transport de sédiments, de dépôt, de recoupement de méandres, ont pour effet de créer, détruire, recréer, dans une courte échelle de temps, une diversité de milieux dont la grande richesse écologique tient justement à leur fréquence de régénération. Le blocage des processus géodynamiques par des protections de berges, qu'elles soient minérales ou végétales, se traduit donc par un appauvrissement général de la :

- Qualité fonctionnelle du corridor fluvial. L'absence de processus d'érosion latérale entraîne de surcroît une baisse de la « production » de sédiments grossiers par manque de reprise du stock alluvial disponible sur les berges. Or, l'équilibre débit liquide/débit solide est un élément essentiel

de la dynamique fluviale. Cet effet est d'autant plus sensible sur les cours d'eau à dynamique active et coulant dans des alluvions non cohésives. Enfin, il est couramment admis aujourd'hui que les protections de berge favorisent l'incision du lit, au moins localement

- Appauvrissement de la qualité écologique des rives. Les protections de berges se traduisent généralement par une simplification des caractéristiques écologiques des rives. Outre la perte d'habitat rivulaire (sauf parfois dans le cas d'enrochements libres dégradés que peuvent affectionner certaines espèces de poissons, mais là encore on ne considère qu'un compartiment de la biodiversité), les protections de berges « lourdes » remplacent par un système simple l'écotone de rive naturellement beaucoup plus complexe et favorable à une forte augmentation de la biodiversité : systèmes racinaires des arbres de la ripisylve, héliophytes de pied de berge, sous-berges, etc. Les techniques de protection de berge par génie végétal réduisent notablement ce type d'impact.

4.3. Rectification recouplement des méandres

De très nombreux cours d'eau naturellement sinueux ou méandriformes ont été artificiellement rectifiés sur de longues distances, généralement pour en augmenter la débitance (notamment grâce à l'augmentation de la pente) et réduire ainsi la fréquence de submersion des terrains riverains. On a aussi fréquemment utilisé le rescindement de méandres pour linéariser les parcelles agricoles afin d'en faciliter la culture (cas des petits cours d'eau lors d'opérations de remembrement).

On a enfin pratiqué des rescindements pour améliorer la navigabilité des grands cours d'eau. Notons que le rescindement/rectification d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que :

- Le sur calibrage du nouveau lit ;
- La protection des berges contre l'érosion.

Recalibrage : 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.

Le recalibrage des cours d'eau est probablement l'un des types d'intervention les plus fréquemment réalisés en France. Ce type de travaux hydrauliques a été mis en œuvre très anciennement dans les zones urbaines et périurbaines, souvent accompagné d'endigements étroits, pour réduire la fréquence des inondations. Il a été utilisé de manière quasi systématique dans les zones rurales, particulièrement au cours des années 1950 et 1980 pour diminuer la fréquence de submersion des terres agricoles, notamment celles exploitées en maïs, céréale très peu résistante à la submersion.

En concertation avec les acteurs du monde agricole qui proposaient un « débit de projet » égal à Q (5ans), Q (10ans) ou Q (50ans), l'ingénieur hydraulicien calculait le profil type à donner au cours d'eau pour garantir ce projet de débit sans débordement. 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 ;
- La suppression de la ripisylve (systématique sur au moins l'une des deux berges) ;
- L'endiguement « rustique » (merlon réalisé avec les déblais du recalibrage).

Déplacement de cours d'eau : Un certain nombre de cours d'eau ont été volontairement déplacés de leur position initiale naturelle vers l'un ou l'autre côté du fond de vallée. Ces déplacements sont souvent très anciens (plusieurs siècles).

L'objectif était principalement de gagner des terres cultivables ou d'améliorer leur exploitabilité en libérant une partie des espaces agricoles de la présence d'un cours d'eau. Ce type d'intervention reste toutefois limité aux petits et moyens cours d'eau (jusqu'à une dizaine de mètres de largeur environ). Notons que le déplacement d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que :

- La rectification et le recalibrage du nouveau lit mineur ;
- La protection des berges contre l'érosion ;
- La suppression de la ripisylve (systématique sur au moins l'une des deux berges) ;
- L'endiguement.

Les impacts sont donc souvent multiples. Le déplacement complet d'un cours d'eau se traduit généralement par les dysfonctionnements hydro morphologiques et écologiques suivants :

- Modification des relations nappe/rivière : le cours d'eau, souvent déplacé en position topographique plus élevée que naturellement, a tendance à alimenter la nappe en permanence, d'où des étiages plus prononcés ;
- Si le nouveau cours d'eau est rectiligne et surcalibré, s'ajoutent les dysfonctionnements liés à la rectification et au recalibrage.

4.4. Les différents types de canaux :

La dérivation.

C'est un canal assez court généralement qui permet de court-circuiter des méandres d'une rivière navigable.

L'embranchement.

Lui aussi est un canal court. Il est en cul-de-sac et permet de relier une ville importante à la voie d'eau la plus proche.

Le canal latéral.

Comme son nom l'indique, il longe une rivière et remplace la navigation sur celle-ci. Il est alimenté en son origine amont par cette rivière généralement, puis en différents points de son parcours par des ponctions sur les affluents de cette rivière. Il est en quelque sorte une dérivation dont la longueur peut dépasser 200 km.

Le canal de jonction par dérivation.

Ce type de canal joint deux rivières appartenant à deux bassins ou sous-bassins différents lorsque le relief qui les sépare est faible. Il part d'un point haut de la rivière A en descendant très peu et en accompagnant une courbe de niveau jusqu'au point où cette courbe passe sur le versant de l'autre rivière. Éventuellement, on peut avoir recours à un passage en tranchée pour réduire la distance. À partir de là, le canal descend rapidement vers la rivière B.

Le canal de jonction à bief de partage.

Un tel canal joint lui aussi deux rivières différentes, mais en franchissant le relief qui les sépare de la même façon qu'une route franchit un col de montagne. Le bief le plus haut est appelé bief de partage (il croise la ligne de partage des bassins des deux rivières) et doit nécessairement être constamment alimenté en eau sous peine de s'assécher un peu à chaque éclusage. Cela nécessite, dans les collines avoisinantes, de créer tout un réseau de rigoles et d'étangs-réservoirs plus hauts que le bief de partage pour l'alimenter.

Le canal maritime.

Ce type de canal peut être lui-même de trois types.

A. Le premier est un canal qui permet la jonction du port d'une ville proche de la mer avec celle-ci. Il s'apparente donc à l'embranchement. Le canal de Caen à la mer et celui de Carentan sont de ce type.

B. Le second type de canal maritime est latéral à un estuaire interdit aux bateaux fluviaux, ou impraticable du fait de son ensablement. Il s'apparente donc à une dérivation. Le canal de Tancarville en est le plus célèbre exemple dans notre pays, mais on peut citer également le canal maritime de Marans à l'océan.

C. Le dernier type de canal maritime joint deux mers entre elles. Il peut être complètement de niveau comme le canal de Suez ou le canal de Corinthe, ou bien à bief de partage, comme le canal de Panama alimenté en son sommet par le lac Gatun.

En connectant physiquement et biologiquement des bassins versants naturellement isolés les uns des autres à l'origine, ils ont contribué à l'appauvrissement de la biodiversité au profit de la diffusion d'espèces invasives

Étang implante sur les cours d'eau : Il arrive fréquemment que des étangs aient été créés directement sur un cours d'eau, notamment dans un objectif halieutique. Leur ligne d'eau a généralement été calée par un ouvrage (digue perpendiculaire à la vallée + seuil ou vannage) situé à l'extrémité aval du plan d'eau.

Les étangs positionnés sur un cours d'eau ont des impacts morpho écologiques :

- modification des flux liquides, solides et biologiques ; la charge solide est ici totalement bloquée mais la fraction fine peut être brutalement relarguée lors des vidanges (impacts directs sur les biocénoses aquatiques vivant en aval et colmatage des substrats grossiers) ;
- L'effet « retenue » est également aggravé, notamment dans ses aspects biologiques. On identifie généralement un dysfonctionnement du compartiment piscicole du fait d'une « pollution » du cours d'eau par des espèces cyprinicoles caractéristiques des zones extrêmement lentiques et favorisées ici par l'homme à des fins halieutiques. Dans le même esprit, la qualité de l'eau est également altérée du fait des effets de réchauffement ;
- L'effet « point dur » est également aggravé, puisque le cours d'eau n'a plus aucune capacité d'ajustement géomorphologique, tout processus d'érosion étant bloqué.

Extraction de granulats : Les alluvions du lit mineur de la plupart des cours d'eau moyens à grands ont été intensément exploitées entre 1945 et le milieu des années 1990 (septembre 1994 : arrêté ministériel interdisant définitivement l'exploitation des alluvions dans les lit mineurs des cours d'eau). Aujourd'hui, la plupart des cours d'eau exploités au cours de la seconde moitié du 20^e siècle sont encore fortement déficitaires en sédiments grossiers.

Les principaux impacts reconnus sont :

- L'abaissement de la nappe phréatique alluviale et ses effets indirects comme l'assèchement des écosystèmes riverains et la réduction d'une ressource en eau potable de qualité.
- La déconnexion entre le lit mineur, le lit majeur et ses annexes hydrauliques

- un appauvrissement des milieux naturels du lit majeur lié à une absence de submersion fréquente ;
- un processus accéléré de maturation des formations végétales riveraines, avec la fixation des sols et des atterrissements originellement mobiles ;
- un appauvrissement des biocénoses terrestres associées ;
- un appauvrissement de certains compartiments des biocénoses aquatiques dont une partie du cycle de développement est lié à ces connexions (notamment la reproduction pour certaines espèces de poissons).
- La modification de la nature des fonds (mise à nu du substratum notamment), avec des répercussions majeures sur les biocénoses benthiques et le peuplement piscicole (baisse drastique de la diversité des habitats).
- L'érosion accrue des berges et leur déstabilisation, le cours d'eau cherchant à compenser le déficit de charge solide par une augmentation de la sinuosité (réduction d'énergie) et une recharge latérale.
- Le déchaussement d'ouvrages d'art (ponts, digues, etc.).

Extraction en lit majeur :

- L'impact direct des extractions en lit majeur est la disparition immédiate et définitive (contrairement à l'agriculture par exemple) des milieux naturels humides de la plaine alluviale. Les bras morts, noues, prairies humides et autres annexes hydrauliques sont irrémédiablement remplacées par des bassins d'extractions de plusieurs milliers de mètres cubes.

Pour ce qui concerne les impacts indirects des extractions en lit majeur, le plus grave est de rendre irréversible le processus d'enfoncement du lit mineur car la recharge du cours d'eau par l'érosion latérale est impossible : le concept d'espace de mobilité est inapplicable.

Chapitre 5

Quelques généralités sur les cours d'eau

5.1 Définition

Les cours d'eau se définissent comme un ensemble de chenaux superficiels d'origine naturelle, conducteurs d'écoulements d'eaux permanentes ou temporaires. Ce sont des systèmes qui recueillent et transportent les eaux issues des ruissellements de surface, des résurgences ou des nappes souterraines d'un même bassin versant (Figure 5.1).

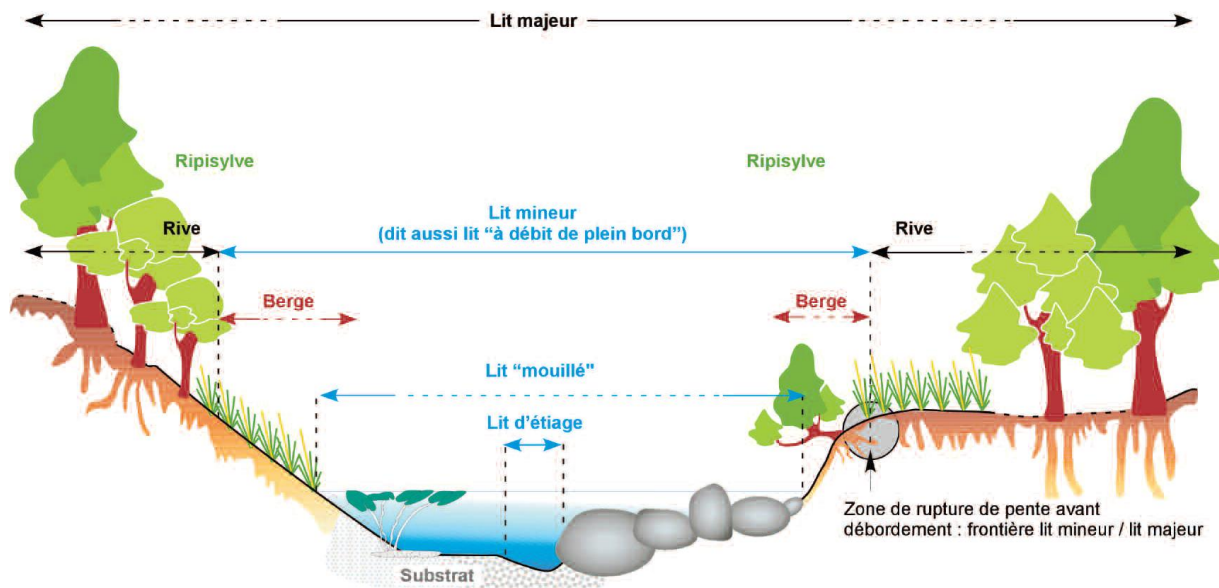


Figure 5.1. Critères de délimitation du lit d'étéage, du lit mouillé, du lit mineur et du lit majeur d'un cours d'eau.

5.2. Les différents types de cours d'eau

La qualité des cours d'eau dépend de différents facteurs qui peuvent être modifiés et dégradés. Ils permettent de dresser un diagnostic du cours d'eau pour évaluer le besoin ou non d'aménagement.

Les principaux facteurs physico-chimiques déterminant l'état des cours d'eau sont les suivants :

- la température ;
 - le taux d'oxygène dissous ;
 - le taux d'azote ;
 - le taux de phosphore ;
 - le taux de polluants ;
 - le pH ;
 - le taux de salinité ;
 - la présence ou non de prolifération végétale ;
 - le taux de matières en suspension...
- Les facteurs hydro morphologiques représentent les facteurs morphologiques et dynamiques (évolution des profils en long et en travers). Sont alors étudiés :
 - le lit mineur (diversification des écoulements, aménagement de l'habitat piscicole, sinuosité du cours d'eau, pente, granulométrie...)
 - l'état des berges et des ripisylves
 - le lit majeur et ses annexes (maillage bocager, reconnexion des annexes hydrauliques, bandes enherbées, restauration de zones humides...)
 - la continuité écologique (migration des poissons) et la ligne d'eau : présence d'un obstacle à l'écoulement, reconquête des écoulements libres...le débit.

5.3. La morphologie des cours d'eau

La morphologie d'un cours d'eau correspond à la forme que la rivière adopte lors de son écoulement. Celle-ci dépend de la pente, de la nature du sol, de la granulométrie, des obstacles, etc. Elle caractérise l'état physique du cours d'eau : la forme du lit et des berges. La morphologie d'un cours d'eau (ou l'hydromorphologie) correspond à ses caractéristiques physiques : le profil en long (méandre, sinuosité...) et le profil en travers (forme du lit).

Hydromorphologie est la contraction d'« hydro » et de « morphologie ». « Hydro » désigne l'hydrologie (régimes hydrologiques, vitesses d'écoulement), et la « morphologie » regroupe les formes du lit mineur, des berges et celles d'éventuelles annexes hydrauliques.

La morphologie du cours d'eau est le résultat d'une évolution constante de sa forme au fil des saisons et des années. Soumis aux étiages (périodes de basses eaux), aux crues et aux inondations, le cours d'eau cherche à établir un équilibre dynamique entre le mouvement des sédiments (débit solide) et le déplacement de l'eau (débit liquide). Cet équilibre se traduit par des phénomènes de dépôts et d'érosion de matières et participe à définir le tracé du cours d'eau.

Le concept de « système fluvial » est défini comme un système complexe adaptable d'interactions actions-réponses, lequel ayant deux principaux composants physiques :

- Le système morphologique (lits, plaine d'inondation, pentes, etc.) et
- Le système en cascade du flux d'eau et de sédiments.

Le concept de système fluvial peut être utilisé sur de vastes échelles spatiales de l'ordre du million de kilomètres carrés mais également sur de petites échelles de l'ordre de la dizaine de kilomètres carrés et temporelles d'un rang de quelques minutes jusqu'à des milliers d'années. Une idéalisation simple du système fluvial a été proposée par Schumm (1977), et il représenté sur la figure 5.2 Schumm a divisé le système fluvial en trois zones, qui correspondent à :

- Zone 1 : La portion d'amont du système correspond aux bassins versants de tête ; cette zone du système fonctionne comme l'aire de production de sédiments.
- Zone 2 : La portion de milieu du système correspond aux rivières ; cette zone du système fonctionne comme l'aire de transfert de sédiment.
- Zone 3 : La portion d'aval du système qui correspond, par exemple, aux deltas, zones humides, lacs, ou réservoirs ; cette zone du système fonctionne comme l'aire de dépôt.

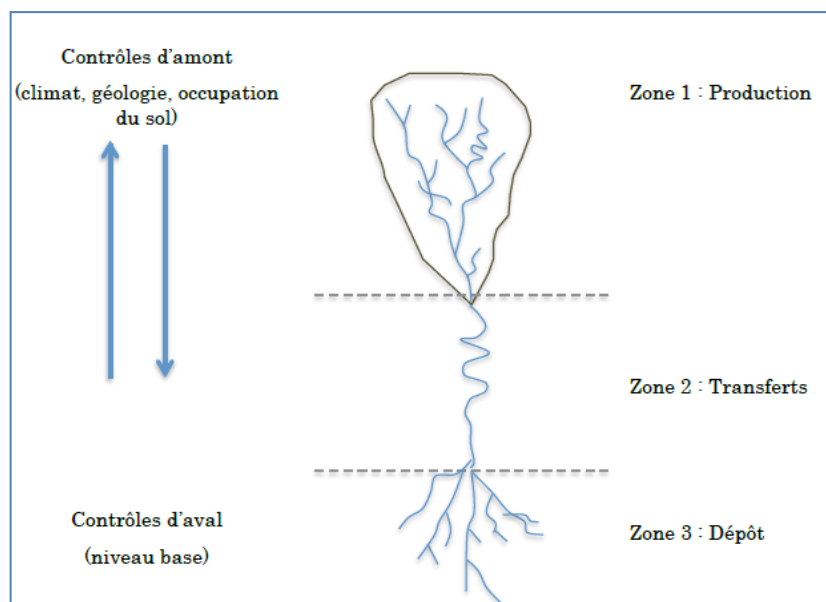


Figure 5.2. L'idéalisation du système fluvial (d'après Schumm, 1977)

Un cours d'eau s'écoule la plupart du temps dans (Figure 5.3)

- ▶ **Son lit mineur.** C'est un espace fluvial formé d'un chenal, de bancs de sables et/ou de galets, recouverts par les eaux. Le **lit mineur ou lit** désigne tout l'espace linéaire où l'écoulement s'effectue la majeure partie du temps. Il est délimité par des berges généralement végétalisées
- ▶ **Son lit moyen :** intermédiaire entre le lit mineur et le lit majeur, il représente l'espace occupé par le cours d'eau lors de crues fréquentes, saisonnières. Il est l'espace soumis à de fréquentes inondations, avec des périodes de retour de 1 à 10 ans. La vitesse de l'eau y est forte et le lit moyen est soumis à une forte érosion et à un important transport de matériaux solides. Il est naturellement occupé par la ripisylve (végétation abondante qui borde les rivières).
- ▶ **Son lit majeur** est l'espace occupé par le cours d'eau lors de grandes crues. Il constitue la zone d'expansion maximale des crues. **Le lit majeur** est l'espace occupé temporairement par un cours d'eau en période de très hautes eaux. Ses limites externes sont celles de la plus grande crue historique répertoriée. Le lit majeur fait partie intégrante de la rivière. Il permet le stockage des eaux de crues débordantes. Les activités humaines et l'installation d'infrastructures y sont est soumise à un risque naturel

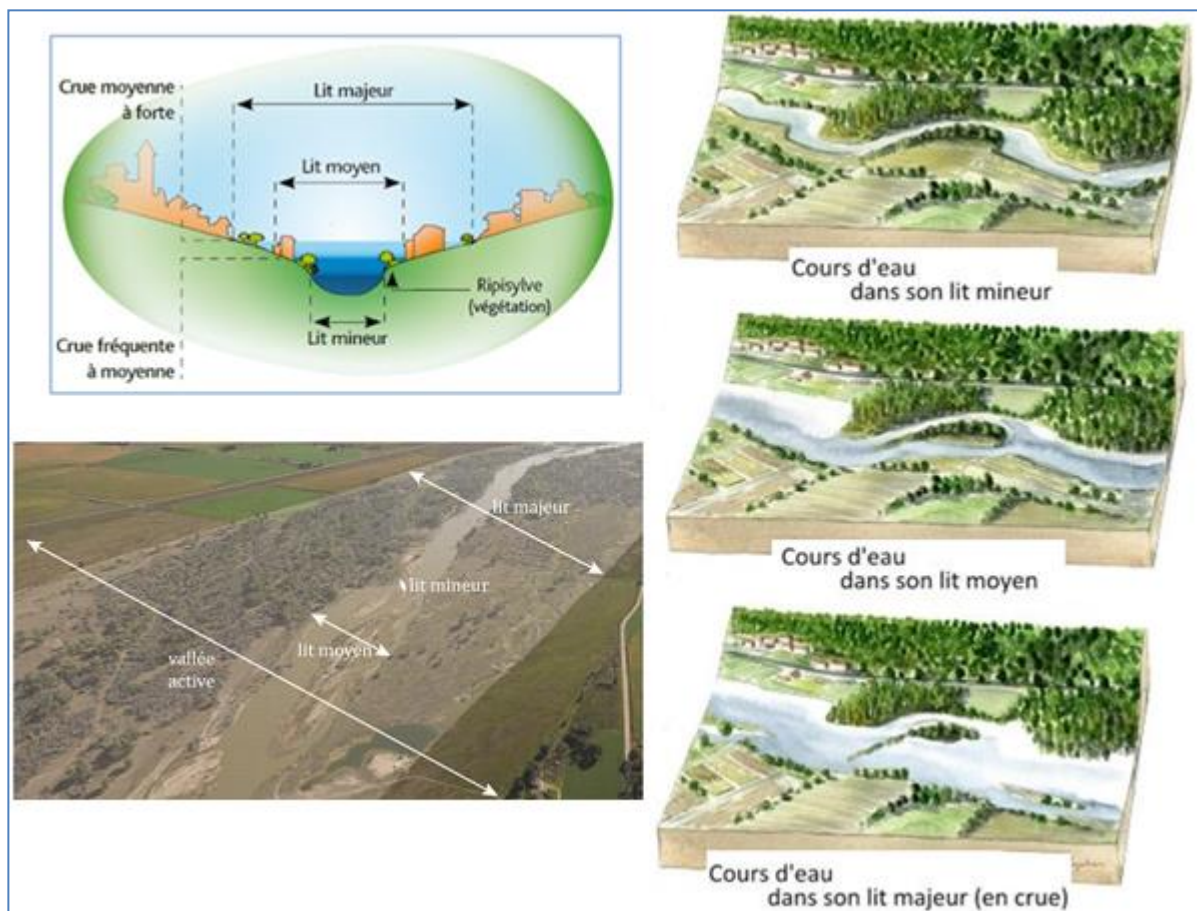


Figure 5.3. Les différents lits

5.3.1. Les formes fluviales et leurs évolutions

Les cours d'eau se différencient d'abord selon le nombre de chenaux (chenal unique ou chenaux multiples). Selon la quantité de matériaux transportés, de la nature plus ou moins cohésive des berges et de la puissance du cours d'eau, le lit du cours d'eau pourra être de différents types : à méandres, en

tresses, rectiligne, sinueux (Photo et figure 5.4). Le débit liquide du cours d'eau varie donc au cours d'une année en fonction des précipitations et de la quantité de matériaux (fins et grossiers) qui est véhiculée c'est-à-dire le débit solide. Ces deux débits sont à l'origine des processus d'érosion et de dépôt qui contribuent aux ajustements morphologiques du cours d'eau. Un équilibre dynamique de rivière est observé lorsque l'érosion et le dépôt se compensent mutuellement.

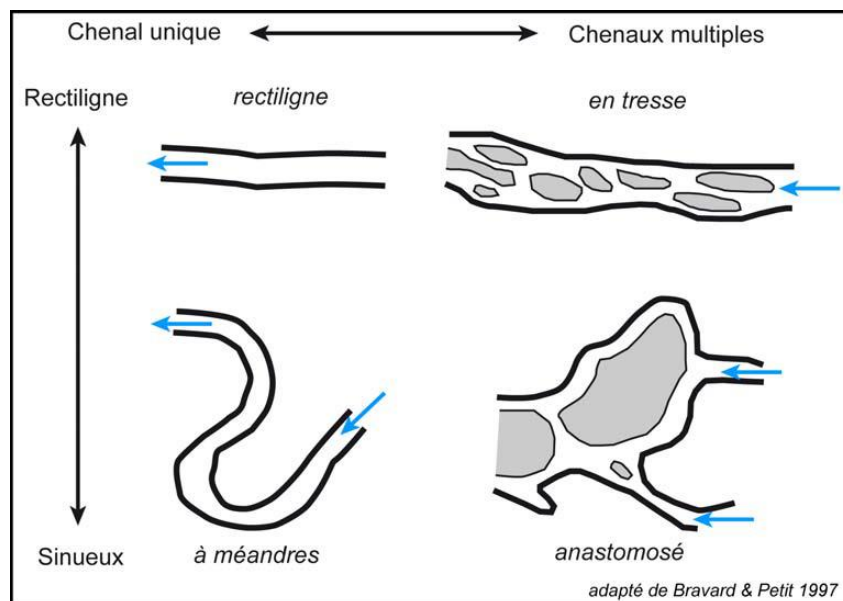
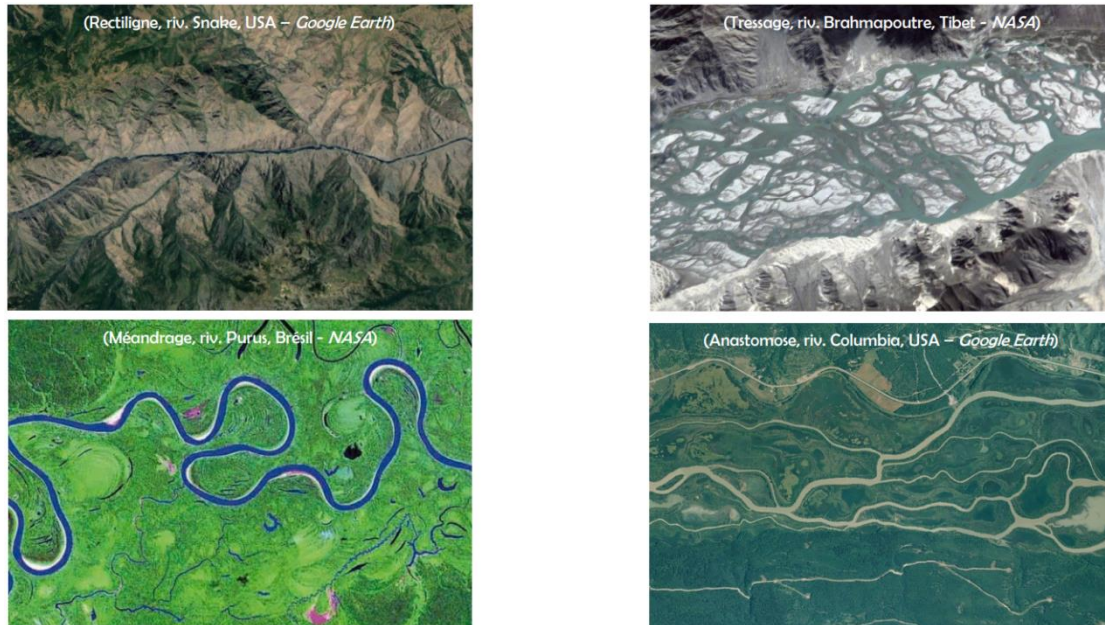


Figure 5.4. Les différentes formes de cours d'eau

➤ **Les rivières à lit rectiligne**

Une rivière rectiligne n'existe pas de façon naturelle sauf si le facteur géologique détermine la trace rectiligne ; ce style fluvial est souvent associé (ou est une conséquence) de travaux de rectification menés par l'homme.

➤ Les rivières à méandres

Les rivières à méandres sont généralement des cours d'eau de plaine aux pentes moyennes ou faibles présentant un ratio d'aspect (c'est à dire le ratio de la largeur de la rivière sur sa profondeur moyenne) moyen ou petit. Les formes des méandres peuvent être naturelles ou conditionnées par des causes artificielles (endiguement). La qualification de méandriforme est liée à la valeur de sinuosité. L'indice de sinuosité r se calcule en faisant le rapport entre la longueur développée de la rivière L_r et la longueur de la vallée L_v (Figure. 5.5). On distingue ainsi les cours d'eau sinueux pour lesquels $1,05 < r < 1,5$ des cours d'eau à méandres pour lesquels $r > 1,5$. La valeur de r caractéristique des méandres varie selon les auteurs.

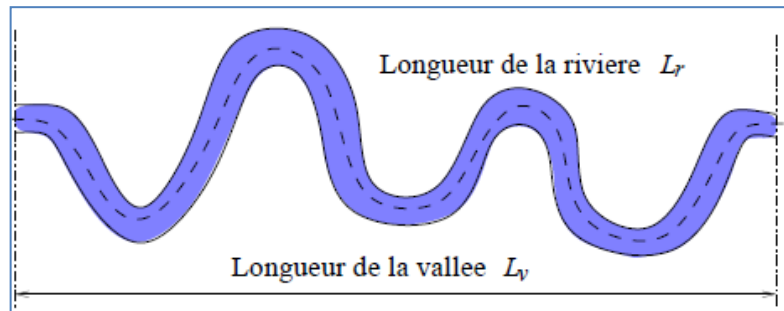


Figure 5.5. Schéma illustrant la définition de la sinuosité.

Le mécanisme de formation et d'évolution des méandres, qui associe des phénomènes d'érosion et de sédimentation, se résume ainsi :

- Une érosion dans les zones concaves ;
- Un dépôt dans les zones convexes.

La combinaison de ces deux phénomènes conduit à la migration des méandres vers l'aval : **la rivière se "déplace" et change de profil**

➤ Les rivières en tresses

Le trace en tresses est généralement associé à une charge de fond excédentaire. Le lit est très large et présente une pente faible. Les rivières en tresses sont caractérisées par des chenaux multiples divergents et convergents qui sont modifiés à chaque crue importante. Le trait complémentaire caractérisant ces cours d'eau est la présence de nombreux bancs (barres sédimentaires) et îles occupant le lit mineur. Les bancs et îles sont généralement peu végétalisés puisque toute végétation naissante dans le lit mineur est arrachée par la crue annuelle ou biennale suivante ce qui permet un rajeunissement fréquent de la végétation alluviale.

➤ Les rivières à lits anastomosés

L'anastomose est le fait de systèmes fluviaux peu énergiques, caractérisés par des chenaux stables ou domine le transport en suspension. Il s'agit d'un style à chenaux multiples, étroits et profonds (ratio largeur / profondeur faible) et à pente plutôt faible. Les facteurs déterminants de l'anastomose sont une puissance d'écoulement limitée, une faible érodibilité des berges et des apports sédimentaires modérés.

Les styles fluviaux constituent une classification des cours d'eau à partir des caractéristiques dominantes du chenal et des formes qui s'y trouvent, dont particulièrement la sinuosité, le tressage et les bancs d'accumulation. La notion de style fluvial permet de classer rapidement et simplement la diversité des cours d'eau à partir d'une appréciation visuelle de leur apparence. Le style fluvial est cependant l'expression du mode de transport sédimentaire dominant et de la charge sédimentaire en transit qui contrôlent en partie les processus concourant à l'évolution morphologique du cours d'eau. Il existe plusieurs classifications des cours d'eau dont les noms peuvent différer mais qui toutes

rejoignent l'idée que l'identification d'un style fluvial permet d'évaluer qualitativement les types de transport et les processus dominants dans l'évolution du chenal.

A la suite de ces premières classifications purement morphologiques, Schumm (1985) introduit des **paramètres hydrologiques et sédimentaires** pour caractériser chaque style fluvial : rapport largeur/profondeur du chenal, type de charge sédimentaire, rôle de la stabilité des berges (Figure 5.6) :

- ▶ Le **style rectiligne** (Figure 5.6: (1) et (2)) se caractérise par une charge en suspension ou mixte, et une stabilité relative du chenal importante avec peu de modification du talweg. Les systèmes à charge mixte voient le développement de barres longitudinales rattachées aux berges qui migrent avec le temps vers l'aval ;
- ▶ Le **style méandrique** est ainsi divisé en deux sous-styles (Figure. 5.6 : (3a) et (3b)) qui sont essentiellement définis en fonction du type de charge sédimentaire. La stabilité relative du chenal diminue lorsque l'on passe de la charge en suspension à la charge mixte ou de fond ce qui traduit en fait une diminution de la cohésion des berges avec l'augmentation de la granulométrie du sédiment. Cette diminution de la cohésion va se traduire par une augmentation de la largeur du chenal et le développement possible de bancs au sein du lit fluvial ; le **style en tresse** (Figure 5.6: (5)) correspond à des systèmes dominés par une charge sédimentaire de fond et une forte stabilité du lit principal et au contraire une faible stabilité des bancs présents à l'intérieur du lit.

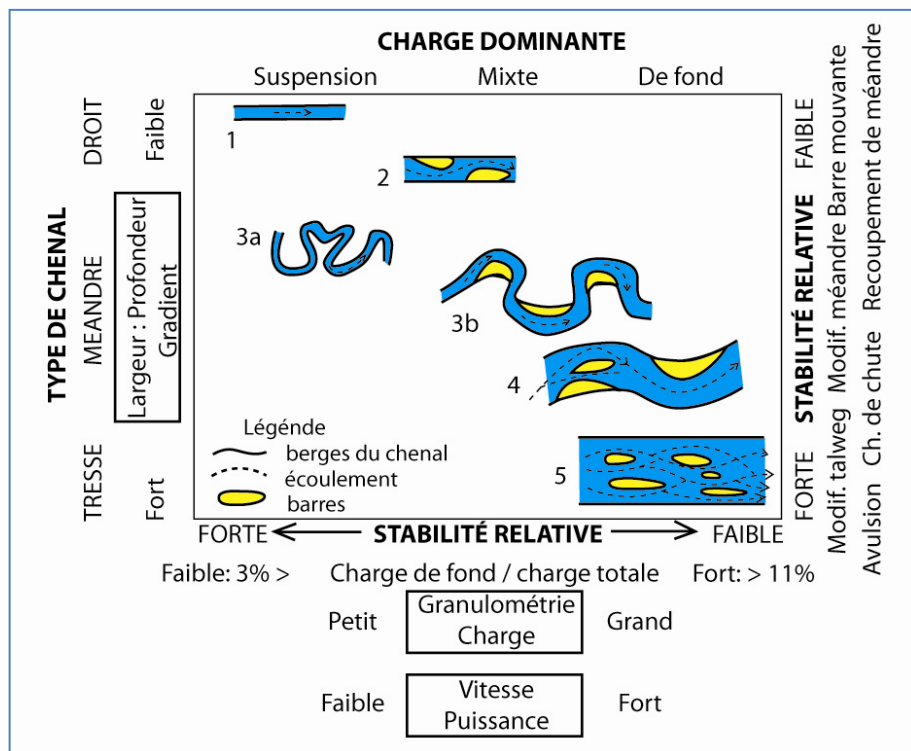


Figure 5.6. Classification des cours d'eau d'après Schumm (1981, 1985).

1,2 - cours d'eau rectiligne ; 3a 3b - cours d'eau méandrique ; 5 - cours d'eau en tresse. La classe 4 correspond à un système transitoire entre les classes 3 et 5.

Les travaux de Schumm sont repris par la suite par Church (2006) qui complète son approche en intégrant le **volume et la granulométrie des sédiments transportés** (Figure 5.7). La classification de Church (2006) est basée sur des critères qualitatifs où apparaissent principalement le calibre des sédiments, leurs modes de transport (suspension, charge de fond) et l'agencement des formes d'accumulation (Figure 5.7). Cette classification a le potentiel de distinguer les chenaux avec des degrés différents de stabilité et d'identifier les ajustements morphologiques en fonction des changements dans l'un ou l'autre des critères de classification. Par extension, la classification permet

d'identifier des patrons d'ajustements morphologiques possibles en réponse à des interventions anthropiques sur la rivière ou à des changements dans l'utilisation du sol dans le bassin-versant.

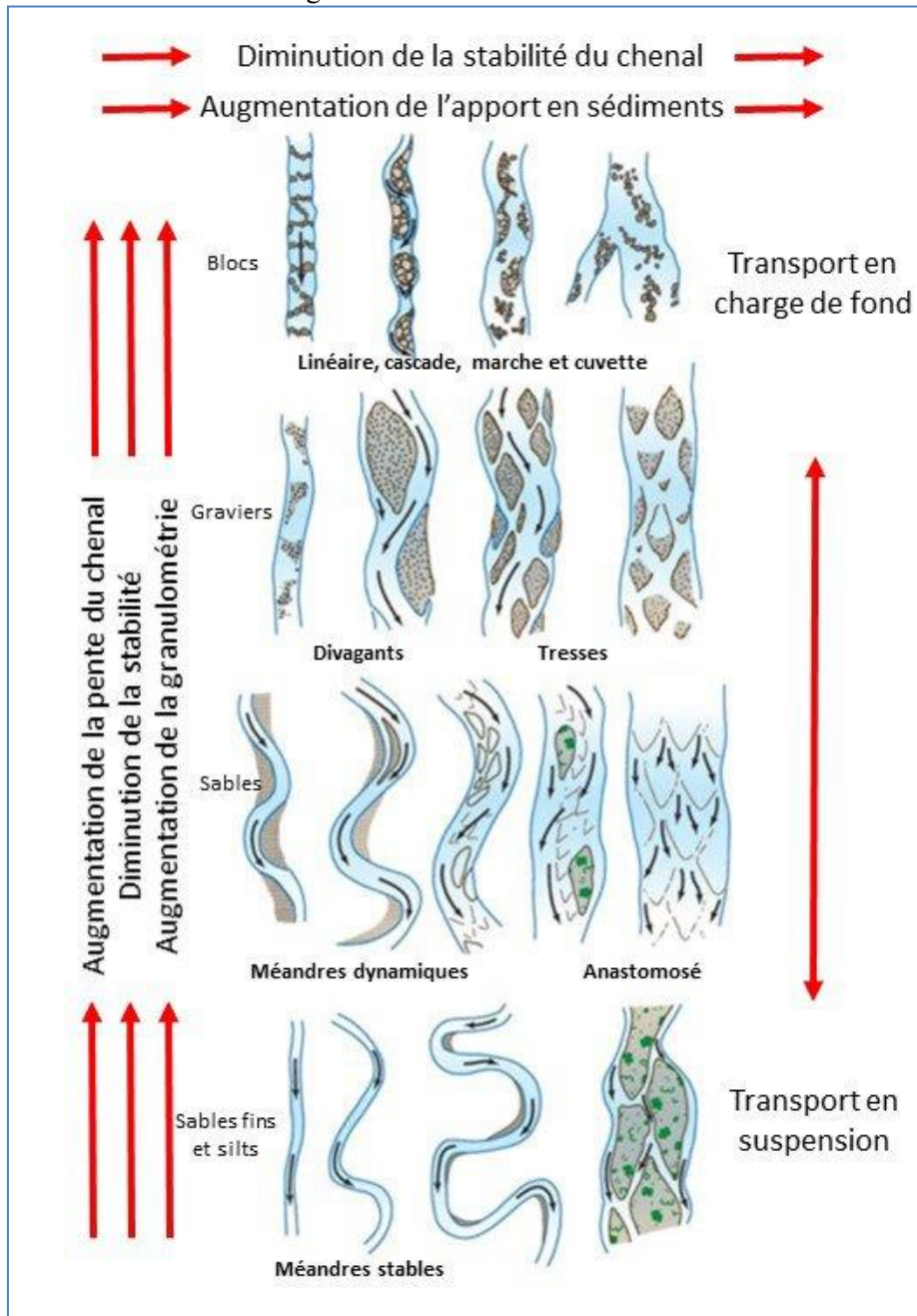


Figure 5.7. Classification des styles fluviaux Church (2006).

5.3.2 Dynamique morphologique des cours d'eau

Le premier déterminant de la morphologie du cours d'eau est la nature géologique du bassin versant. La dynamique du cours d'eau peut ensuite se décrire très simplement en considérant que la rivière transmet les apports liquides et solides de l'amont vers l'aval en se déformant. La géologie, la pente, la granularité des sédiments, la végétation, le débit liquide Q et le débit solide Q_s constituent les variables de contrôle du système. En fonction des fluctuations de ces variables de contrôle, le cours d'eau se déforme longitudinalement (adaptation de la pente du fond I et donc de la pente d'énergie J), transversalement (changement de la largeur au miroir W et divagation) et verticalement (changement de la hauteur d'eau moyenne H , ou H est défini comme le rapport de la

section mouillée S sur la largeur au miroir W) pour permettre un transit des débits et de la charge solide. Ces trois variables (I , W et H) représentent les degrés de liberté du système (Figure. 5.8)

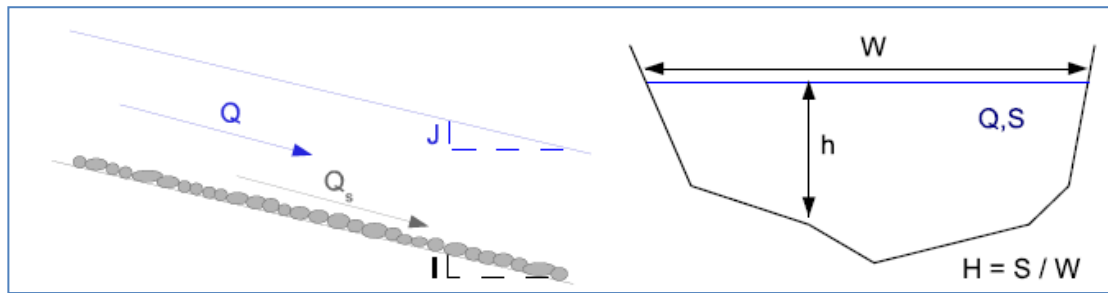


Figure 5.8. Schéma des grandeurs caractéristiques des cours d'eau.

Les différentes variables morphologiques des lits alluviaux à fond mobile s'ajustent à différentes échelles de temps et d'espace. Ainsi le profil en long connaît des ajustements sur de longues périodes de temps (10^3 à 10^4 ans).

5.3.2.1 Notion d'équilibre dynamique

Un cours d'eau à l'équilibre a généralement une capacité de transport des sédiments équivalente à la fourniture de matériaux par le lit, les berges et les sols du bassin versant. Les cours d'eau dissipent leur énergie dans les turbulences de chutes, par la friction de l'eau contre les parois du canal et par le transport de sédiments. En cas de forte sédimentation de la charge de fond et des matières en suspension (par exemple dans les bassins de retenue de barrage), l'eau claire dépensera son excès d'énergie en érodant de façon accrue le chenal pour se recharger en matières en suspension.

À l'échelle du bassin versant, cet effet positif peut être aussi observé dans les dépôts périodiques en plaine d'inondation et dans la création d'îlots sableux dans le lit de certains cours d'eau. L'érosion des berges, en entraînant certaines portions de talus et de végétation, crée des éclaircies. Un cours d'eau en équilibre a généralement une capacité de transport des matériaux équivalente à la fourniture de matériaux par le lit, les berges et les sols du bassin versant. En raison de perturbations hydrologiques ou anthropiques, l'équilibre dynamique entre le débit solide (charge alluviale) et le débit liquide sera perturbé et le cours d'eau entrera dans une phase d'ajustements, où l'érosion du chenal sera exacerbée.

De nombreux facteurs contribuent à perturber les débits et le cours d'eau entrera dans une phase d'ajustements morphologiques de son lit, pour retrouver ensuite une nouvelle situation d'équilibre. Les redressements de cours d'eau ont pour effet d'augmenter la pente du lit, la vitesse de l'eau et la puissance du cours d'eau, entraînant une érosion importante du chenal, mobilisant des sédiments qui étaient stables auparavant. L'élargissement du lit est le processus d'évolution morphologique le plus souvent observé dans le cas de cours d'eau redressés, mais il peut être localement limité par des facteurs externes tels que la présence de roc, d'arbres ou des courbes brusques du lit.

En fonction des conditions géologiques, climatiques, anthropiques, de la présence de végétation, le cours d'eau s'adapte et tend vers le développement d'un état d'équilibre, appelé régime, caractérisé par une largeur W , une hauteur d'eau moyenne H et une pente I . La représentation de l'équilibre du système fluvial peut être illustrée par la balance de Lane (1955) qui lie la fourniture sédimentaire (débit solide Q_s , granulométrie γ) à la puissance fluviale (débit liquide Q_L , pente α) capable de la mobiliser (Figure 5.9). Lorsqu'un système est en équilibre, les sédiments sont transportés vers l'aval sans dépôt ou érosion nets significatifs. On parle d'équilibre dynamique lorsque le système fluvial est capable de retrouver des conditions proches de son état avant perturbation. Un système est dit résilient lorsqu'il revient rapidement à son état pré-perturbé.

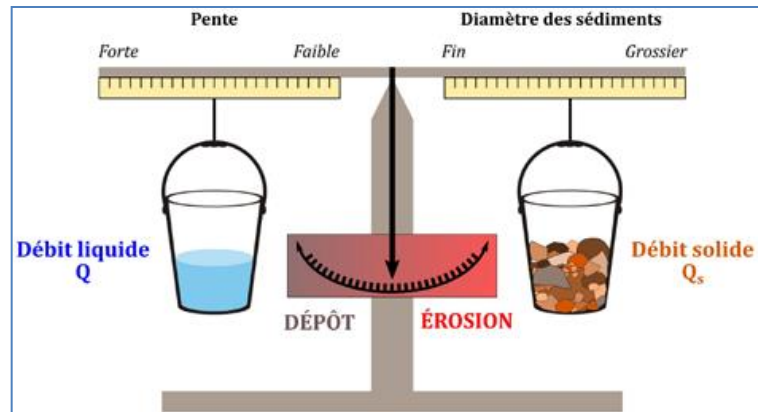


Figure 5.9. Principe de l'équilibre dynamique (d'après Lane, 1955).

La dynamique fluviale est ainsi représentée comme l'oscillation permanente de l'aiguille d'une balance dont l'un des plateaux serait rempli de sable et l'autre d'eau. Pour un matériau de diamètre d , un débit solide Q_s et un débit liquide Q , le système fluvial modifie sa pente d'énergie J afin d'égaliser le taux de travail de transport à effectuer, c'est à dire que la pente s'ajuste jusqu'à ce que le débit solide sortant égale le débit solide entrant.

La rivière va rechercher un **équilibre entre son débit liquide et son débit solide** (Figure 5.10). Ainsi si :

- Le débit liquide diminue : les matériaux vont se déposer ;
- Le débit liquide augmente : la rivière va éroder ses matériaux pour augmenter son débit solide et retrouver son équilibre.

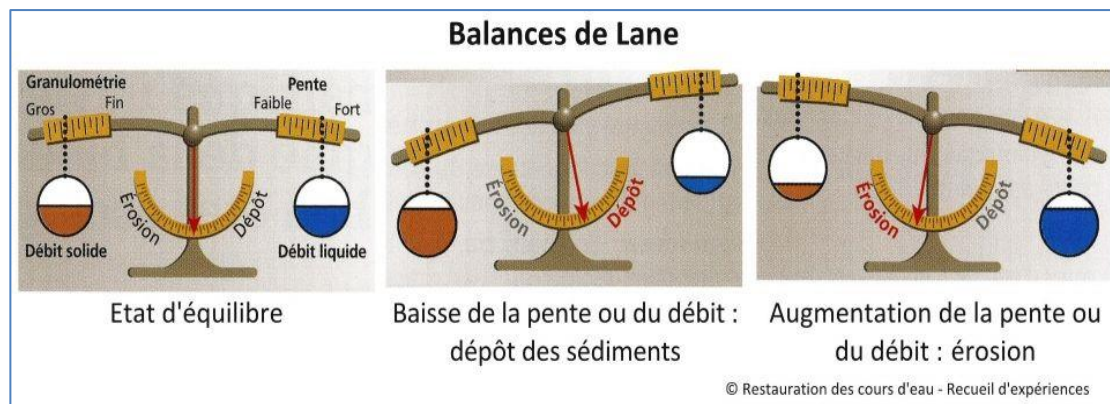


Figure 5.10. Equilibre et déséquilibre d'un cours d'eau

La balance de Lane est directement ou indirectement déséquilibrée (Figure 5.11) par les pressions humaines exercées sur le système fluvial. Celles-ci peuvent être à l'origine d'une modification (davantage détaillé dans le paragraphe 2) :

- Du régime de crue,
- De la pente du chenal au droit des aménagements (rectification, barrages, seuils), du transport sédimentaire (quantité et granulométrie) influencé par une modification des apports sédimentaires amont provenant des versants et des affluents ou encore par les modifications du lit et des berges (radiers, enrochements),
- De la rugosité hydraulique (taille des sédiments et pente de la ligne d'eau) des chenaux de façon durable (chenalisation, pavage du lit) ou régulière (entretien de la végétation aquatique, des bancs et des bords de berges, enlèvement des embâcles, curages).

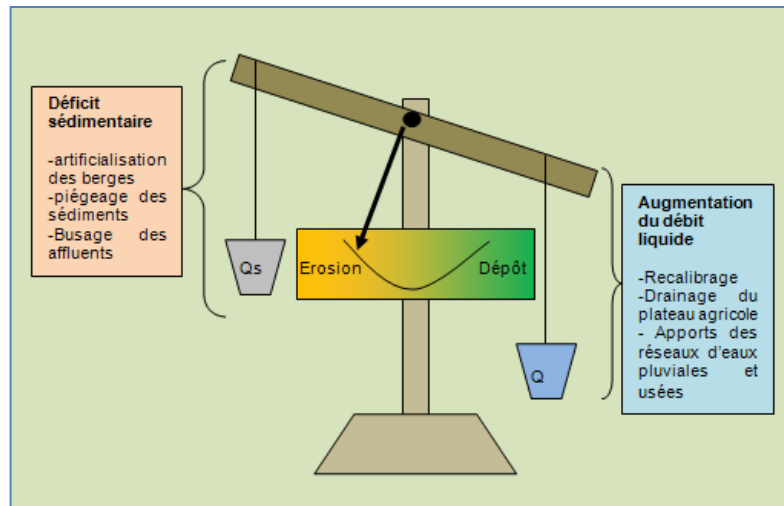


Figure 5.11. Exemple de déséquilibre observé sur un cours d'eau dont la morphologie est particulièrement déstructurée et paramètres expliquant le blocage fonctionnel

Une forte crue entraîne une brutale augmentation du débit liquide (Figure. 5.12), c'est-à-dire de la capacité de transport. Ceci se traduit morphologiquement par le développement de processus d'érosion intenses dans le lit : la rivière consomme du sédiment pour disperser son surplus énergie. Dans le même temps, la pente moyenne du tronçon tend à diminuer pour retrouver une situation d'équilibre.

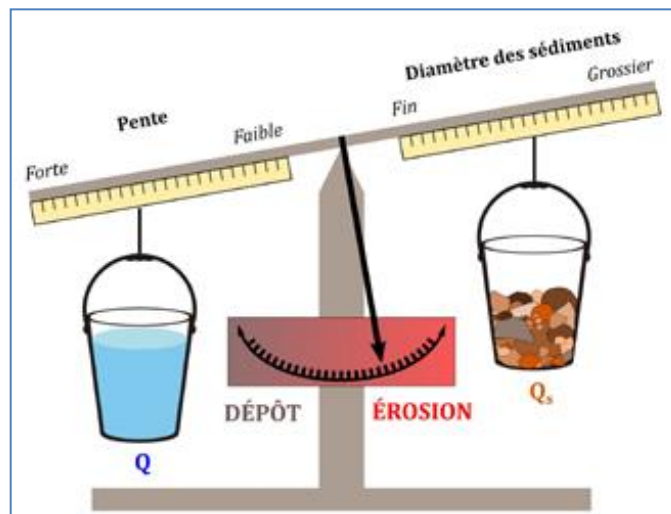


Figure 5.12. Illustration du déséquilibre induit par une forte augmentation du débit liquide à l'origine de processus d'érosion.

Un important glissement de terrain entraîne une forte augmentation de la fourniture sédimentaire dans un cours d'eau (Figure. 5.13.). Son débit liquide n'a pas la capacité de transport suffisante pour évacuer l'ensemble des sédiments.

La rivière exhausse son lit, ce qui se traduit dans le même temps par une augmentation de la pente, favorisant l'augmentation de l'énergie de l'écoulement et donc la reprise en charge des particules.

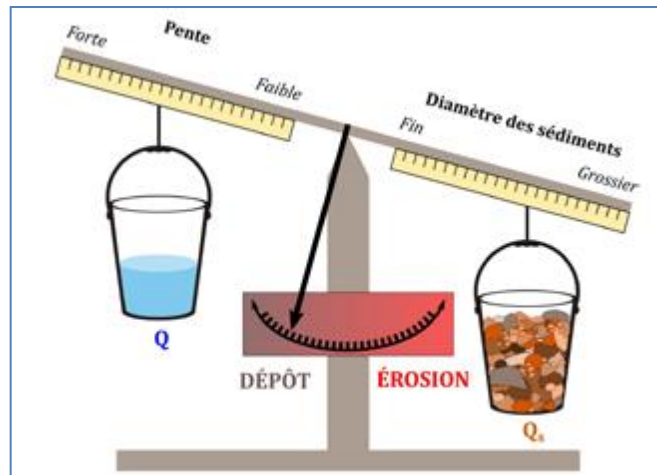


Figure 5.13. Illustration du déséquilibre induit par une forte augmentation du débit solide à l'origine de processus d'exhaussement du lit.

5.3.2.2. Conditions hydro-sédimentaires

Le lit d'une rivière est essentiellement modelé par les débits de crue. Toutefois les débits qui donnent au cours d'eau sa géométrie moyenne sont ceux qui transportent le plus de matériaux compte tenu de leur capacité de transport et de leur fréquence. Nous considérons ainsi différents niveaux de mobilité des matériaux sédimentaires grossiers en rivière, associés à différentes échelles d'étude :

- le **débit de début d'entraînement** ou débit-seuil de mise en mouvement (que nous noterons Q_c), qui correspond à la mise en mouvement de la particule ;
- le **débit morphogène**, qui correspond à la mobilité de la forme ;
- le **débit dominant** est le débit le plus efficace pour transporter des matériaux car il est le produit de la fréquence d'occurrence du débit et de sa capacité de transport : il intègre donc la notion d'impact morphologique. Ce débit est souvent associé au débit de plein bord, mais sans correspondance systématique, car ce dernier est difficile à définir au vu de la variabilité des systèmes fluviaux.

Par définition, ce débit de plein bord représente la capacité d'écoulement du lit mineur juste avant le débordement (Figure 5.14)

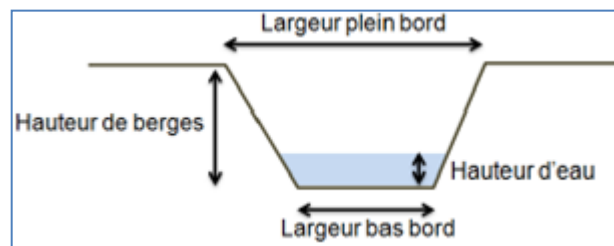


Figure 5.14. Géométrie de l'état plein bord

Le débit utilisé est normalement le débit de plein bord qui correspond à l'écoulement d'auto-ajustement morphométrique du chenal. Le débit de plein bord est un paramètre de caractérisation des cours d'eau particulièrement important, car il peut expliquer en grande partie la morphologie d'un cours d'eau et sert à valider la stratégie d'intervention choisie, telle que l'implantation d'un corridor riverain. Ce débit est observé quand il y a un léger débordement du lit mineur sur la plaine d'inondation. Le débit de plein bord, ou morphogène, est celui qui transporte le plus de matériaux solides compte tenu de son énergie potentielle et de sa fréquence. Même si les débits plus importants

transportent plus de matériaux par événement et les débits plus faibles ont une fréquence plus élevée, le débit morphogène est suffisamment puissant et fréquent pour développer la forme générale du lit. Il correspond généralement à une crue dont la période de retour est de l'ordre de 1.5 an et a 67 % de chance d'être observé chaque année. Ce débit utilise environ le tiers de l'aire d'écoulement du chenal et n'est surpassé que 25 % du temps. Les caractéristiques du débit morphogène peuvent varier en fonction du type de sol, de son occupation et de la taille du bassin versant. Ainsi, la fréquence du débit de plein bord peut aller de quelques mois à une année sur des substrats peu perméables, à près de deux ans sur des terrains perméables. En milieu urbain, la fréquence est plus proche de 1.2 an et en milieu humide, la fréquence est plus faible qu'en milieu désertique. Le débit morphogène a ici été assimilé au débit de pointe d'une crue de fréquence biennale

À l'échelle du tronçon, la structure et le fonctionnement morphologiques du cours d'eau (mobilité sédimentaire, style fluvial) sont fortement influencés par les conditions de puissance locale de l'écoulement.

À l'échelle d'un tronçon, pour une pente donnée, le débit conditionne la puissance du cours d'eau : la puissance brute de l'écoulement est en effet le produit de la pente de la ligne d'énergie I , du débit liquide Q et du poids spécifique de l'eau γ_s N/m³. La puissance spécifique (permettant de comparer des systèmes de tailles et de caractéristiques sédimentologiques différentes, est alors définie comme le rapport entre puissance brute et largeur du lit w .

Cette puissance quantifie l'énergie de l'eau qui transite dans le système fluvial et qui est dissipée sous différentes formes, en particulier *via* le transport des matériaux du fond du lit. Il en résulte que pour un certain couple pente-débit, l'écoulement possède une certaine **capacité de transport**, théorique, des sédiments. Suivant la disponibilité du lit en matériaux (au fond, par incision du « matelas » alluvial ou sur les bords par érosion des berges) et par ces processus d'érosion et de dépôt, le système fluvial mobilise une certaine quantité de matériaux. Il acquiert ainsi une certaine morphologie. Le débit liquide est alors qualifié de « morphogène » lorsqu'il est capable de remodeler le lit du cours d'eau.

La **puissance spécifique** (ω) décrit l'énergie développée par le cours d'eau, elle est donnée par l'équation suivante :

$$\omega = \gamma \cdot Q \cdot i \cdot W^{-1} \quad (5.1)$$

Avec :

ω : puissance spécifique (W/m²)

γ : poids volumique de l'eau ($\gamma = \rho \cdot g = 9\,810 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$)

Q : débit (m³/s)

i : pente moyenne de la ligne d'eau considérée équivalente à la pente du fond du lit (m/m)

w : largeur du lit à plein bord (m)

Certains travaux de recherches évoquent différentes classes de puissances spécifiques pour décrire la réactivité géodynamique d'un cours d'eau. Ces classes sont limitées par les seuils de 10, 30 et 100 W/m² (Tableau 5.1). Ces seuils restent néanmoins purement théoriques et à relativiser en fonction des caractéristiques sédimentologiques des berges du cours d'eau donc de l'érodabilité des berges et de la qualité des apports solides.

Tableau 5.1. Seuils de la puissance spécifique

	1	2	3	4
Puissance spécifique- ω	< 10 W/m ²	10-30 W/m ²	30-100 W/m ²	>100W/m ²
Erodabilité des berges-B	Nulle	Faible	Moyenne	Forte
Apports solides- A	Nuls	Faibles	Moyens	Forts

La puissance fluviale spécifique d'un cours d'eau permet d'estimer le style fluvial potentiel. Elle est exprimée en W/m² et se base sur la récurrence des crues annuelles à biennales (à pleins bords pour les

rivières naturelles). Les rivières dont la puissance spécifique ne dépasse pas 15 W/m^2 se caractérisent généralement par des chenaux inactifs et des méandres libres relativement figés. Les méandres actifs non confinés nécessitent des puissances au moins supérieures à 35 W/m^2 . Par contre, les rivières où la puissance dépasse 100 W/m^2 ont une dynamique de modification du tracé fort active, avec des processus pouvant même aboutir à la multiplication des chenaux et à la formation du tressage, ceci dépendant aussi de la taille du matériau qui constitue le fond du lit.

5.4 Crue et inondation

Distinction entre crue et inondation :

- La crue désigne une augmentation brutale et durable du niveau (i.e. débit) d'un cours d'eau
- L'inondation désigne une submersion rapide et durable par l'eau d'une zone habituellement hors d'eau. Ainsi une crue peut entraîner une inondation qui peut toutefois avoir d'autres origines

5.4.1 Crués

La crue correspond à la montée des eaux d'un cours d'eau, l'inondation au phénomène qui en résulte, l'eau débordant, se répandant sur les terrains alentours. Elle est due à des précipitations en forte quantité, auxquelles peut s'ajouter un sol imperméable ou devenu imperméable suite à une sécheresse importante : le sol n'absorbe plus la quantité d'eau qui lui parvient.

Mais ce phénomène peut également être accentué par des causes : humaines directes (drainage, imperméabilisation des sols ...), humaines indirectes (changement climatique).

Différents types de crue existent : crues lentes : le débit du cours d'eau augmente lentement, suite à des pluies, la fonte des neiges ... crues rapides ou brutales ou éclair : elles résultent de pluies abondantes, d'orages violents, ... Elles peuvent devenir torrentielles, et sont les plus difficiles à prévoir.

La crue centennale est une crue théorique calculée à partir de l'analyse des crues passées et qui a une chance sur cent de se produire chaque année (ou 10 fois par millénaire).

Les crues sont des phénomènes naturels faisant parties intégrantes du régime naturel des cours d'eau, où périodes sèches (étiage) et humides s'alternent. Elles constituent le véritable moteur de la dynamique fluviale et sont indispensables à la « Vie » d'un fleuve, qu'elles façonnent (érosion, déplacement de matériaux). Elles ont un rôle régulateur : lors d'une crue, les eaux « s'étalent » dans la plaine alluviale, ralentissant ainsi le débit des cours d'eau, et peuvent par la suite contribuer à la recharge des nappes alluviales en s'infiltrant. Elles ont également un rôle épurateur et sont très importantes pour le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Les apports de nutriments (matières organiques et minérales) générés par les crues, de l'amont vers l'aval (jusqu'aux zones marines) mais également dans les plaines inondables (lit majeur du cours d'eau), conditionnent la survie de nombreuses espèces aquatiques et marines. Les crues favorisent également la reproduction (en mettant en eau les frayères), le déplacement des différentes espèces aquatiques, en diversifiant les habitats naturels (zones humides, ...). Elles constituent un important vecteur d'échanges de nutriments et d'organismes, et conditionnent alors également certaines activités humaines comme la pêche et l'agriculture (fertilisation des sols).

Les crues ne résultent pas seulement de phénomène de surface (pluies abondantes, ruissellement...). Le sous-sol et les nappes souterraines jouent également un rôle essentiel dans le déclenchement des crues et des inondations (porosité et état de surface des sols au moment des pluies, saturation de la nappe alluviale...). Les crues peuvent néanmoins avoir des conséquences néfastes sur les activités et populations riveraines (dégâts physiques voire corporels) et impliquent de forts enjeux sécuritaires pour les zones les plus exposées. Contrairement aux orientations de gestion des années 1960, les politiques actuelles tendent à mieux prendre en compte le rôle important des crues et intègrent davantage la composante « dynamique » (non figée) d'un cours d'eau.

5.4.2. Les inondations

Premier risque naturel en Algérie en termes de dommages occasionnés, les inondations sont aggravées depuis des décennies par l'aménagement du territoire. L'imperméabilisation des sols notamment en raison de l'urbanisation, la suppression des haies, le remembrement agricole, l'augmentation des surfaces des parcelles cultivées, la rectification et la chenalisation des cours d'eau et le drainage accélèrent le transfert de l'eau depuis l'amont vers l'aval. Avec une concentration des populations et des activités économiques dans les zones rendues ainsi vulnérables, le risque lié aux inondations a nettement augmenté. L'entretien régulier du cours d'eau est essentiel et obligatoire pour garantir la libre circulation des eaux. Il est réglementé par la loi sur l'eau. Il est à distinguer des travaux en cours d'eau, également réglementés par la loi, qui correspondent à des interventions plus lourdes et peuvent avoir des impacts sur le milieu.

Augmentation plus ou moins brutale du débit d'un cours d'eau, la crue se traduit généralement par une augmentation très visible du niveau d'eau et de la vitesse d'écoulement des eaux. Elle résulte de fortes précipitations et/ou de la fonte des neiges.

Les crues sont des phénomènes naturels. Intrinsèques au régime des cours d'eau, elles sont indispensables à leur équilibre dynamique.

Elles façonnent la morphologie de la rivière en érodant son lit, en transportant les matériaux solides et grossiers tout comme les sédiments les plus fins, reconstituant ainsi de nouveaux milieux et habitats. Des bancs alluviaux se forment et sont remobilisés par les crues, de nouveaux bras se forment et d'autres sont abandonnés, les méandres se déplacent. Cette évolution régulière – dans l'espace et dans le temps – de la morphologie de la rivière traduit sa bonne santé. **Cette dynamique explique la nécessité de maintenir un espace dédié au fonctionnement du cours d'eau, appelé *espace de mobilité*.**

Les zones humides contribuent au stockage / déstockage d'importantes quantités d'eau en surface et dans le sol, permettant une régulation des phénomènes hydrologiques dans le bassin versant. Elles interceptent les eaux de ruissellement réduisant ainsi les pics de crue en des débits plus lents et plus faibles sur des périodes plus longues (i.e. étalement de crue).

Inondation : submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal. Cette notion recouvre les inondations dues aux crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer dans les zones côtières et elle peut exclure les inondations dues aux réseaux d'égouts.

Risque d'inondation : combinaison de la probabilité d'une inondation et des conséquences négatives potentielles pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique associée à une inondation. Le risque majeur est donc la confrontation d'un aléa avec des enjeux.

La notion d'inondation appelle celles de lit mineur et lit majeur d'un cours d'eau : le lit mineur est la partie du lit du cours d'eau comprise entre des berges franches ou bien marquées, dans laquelle l'intégralité de l'écoulement s'effectue la quasi-totalité du temps en dehors des périodes de très hautes eaux et de crues débordantes. Le lit majeur est le lit maximum qu'occupe un cours d'eau dans lequel l'écoulement ne s'effectue que temporairement lors du débordement des eaux hors du lit mineur en période de très hautes eaux en particulier lors de la plus grande crue historique.

5.6. Typologie des inondations

Le tableau 5.2 illustre bien la typologie des inondations que soit en plaine ou en zone urbaine.

Tableau 5.2. Typologie des inondations

La montée des eaux en région de plaine	
Les Inondation en plaine	La rivière sort de son lit mineur lentement et peut inonder la plaine pendant une période relativement longue. La rivière occupe son lit moyen et éventuellement son lit majeur
Les inondations par remontée de nappe	Lorsque le sol est saturé, il arrive que la nappe affleure et qu'une inondation spontanée se produise. Ce phénomène concerne particulièrement les terrains bas ou mal drainés.
La formation rapide des crues torrentielles consécutives à des averses violentes	
Les crues des rivières torrentielles et des torrents	Lorsque des précipitations intenses tombent sur le bassin versant les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans les cours d'eau, d'où des crues brutales et violentes dans les torrents et les rivières torrentielles. Les lits des cours d'eau est en général rapidement colmaté par les dépôts de sédiments et des bois morts peuvent former des barrages, appelés embâcles. Lorsqu'ils viennent à céder, ils libèrent une énorme vague qui peut être mortelle
Le ruissellement pluvial urbain	
Les crues rapides des bassins périurbains	L'imperméabilisation du sol (bâtiment, voiries, parkings etc.) limite l'infiltration des pluies et accentué le ruissellement ce qui occasionne souvent la restauration et le refoulement des réseaux d'assainissement des eaux pluviales. Il en résulte des écoulements plus au moins important et souvent rapide dans les rues

Les inondations peuvent aussi être dues à la submersion des bords de mer par l'eau de mer. On parle alors de submersion marine. Le changement climatique pourrait modifier le régime des précipitations sur la planète. En Algérie, il pourrait pleuvoir plus l'hiver, et moins l'été. Ainsi, les inondations pourraient avoir lieu de manière plus fréquente. Les phénomènes extrêmes (orages, crues ...) seraient également en augmentation.

Chapitre 6

Pourquoi aménager et entretenir les cours d'eau ?

6.1. Introduction

Les cours d'eau sont des milieux dynamiques évoluant perpétuellement en fonction des caractéristiques physiques et saisonnières. La qualité de vie d'un cours d'eau dépend de nombreux facteurs tels que la vitesse du courant, la sinuosité du lit, le débit, la qualité de la ripisylve, le taux d'oxygène dissous.... Ces facteurs peuvent être dégradés ou modifiés, c'est pourquoi les cours d'eau doivent être entretenus ou aménagés afin de maintenir leurs différentes fonctionnalités liées aux usages et restaurer leur bon état écologique.

Les différents aménagements visent donc à satisfaire :

- Le régime hydrologique en respectant ou rétablissant,
- Les débits minimums d'étiage,
- La connexion avec les eaux souterraines,
- L'alternance de courants lents et rapides,
- Une variation des profondeurs,
- Les conditions morphologiques en respectant les connectivités latérales des cours d'eau avec ses milieux annexes tels que les prairies inondables, les bras morts, les zones humides....,
- Le maintien ou le rétablissement de l'état physique des berges et de la végétation riveraine,
- La continuité écologique en rétablissant la libre circulation des organismes aquatiques (par exemple les poissons migrateurs) à des échelles spatiales compatibles à leur cycle de développement et en rétablissant des flux de sédiments.

Sans intervention de l'Homme, la richesse des cours d'eau disparaît. En effet, les lits des cours d'eau s'encombrent de divers détritiques et les berges sont envahies par la végétation. L'envasement prend alors le dessus, les capacités d'écoulement sont réduites et les risques d'inondation augmentent. La qualité écologique diminue, les cours d'eau sont alors moins diversifiés en termes d'espèces animales et végétales.

6.2. D'une manière générale, les différents travaux visent donc à :

- Maintenir ou améliorer la qualité de l'eau (augmentation de son pouvoir épuratoire)
- Freiner ou favoriser l'écoulement des eaux (selon la sensibilité des inondations)
- Stabiliser les berges (pour lutter contre leur érosion)
- Améliorer la qualité des habitats (pour la faune et la flore)
- Préserver la qualité paysagère

Une gestion équilibrée des berges et du lit d'une rivière par des opérations d'entretien régulier favorise un contrôle efficace de l'évolution ultérieure du milieu aquatique. Les opérateurs concernés sont les syndicats intercommunaux d'aménagement hydraulique (S.I.A.H.) ou des collectivités locales possédant la compétence rivière. De plus en plus de ces structures se dotent d'un technicien de rivière, dont les missions sont l'observation du cours d'eau, la préparation des chantiers, leur suivi technique et administratif, la communication avec les partenaires et la population ... Toute intervention doit être précédée d'un diagnostic de l'état initial et global du cours d'eau (de l'amont et de l'aval) ce qui permet de mieux cibler les différents objectifs des interventions. Ensuite, l'impact de ces dernières doit

être mesuré ; une évaluation et un suivi des travaux doivent être réalisés. Toute intervention doit donc être raisonnée et planifiée.

6.3. Trois types d'intervention sont utilisés :

- **La restauration** pour mener des opérations permettant de rendre à la rivière l'état dans lequel elle aurait dû se trouver si elle avait fait l'objet d'une gestion régulière
- **L'aménagement** pour modifier fortement le cours d'eau en vue de satisfaire un objet particulier
- **L'entretien** pour garder le cours d'eau dans un état optimal

6.4. Citons quelques méthodes pour entretenir le lit d'un cours d'eau :

- **Le faucardage** : cette technique assure le bon écoulement des eaux ce qui va favoriser la circulation de l'oxygène, la diminution du taux des matières organiques et réduire les obstacles susceptibles de gêner la circulation des poissons.
- **Le curage** : cette technique limite l'engorgement du lit et évite les dépôts très importants.
- La mise en place des **défecteurs ou épis**, des mini seuils.
- La recharge des lits en **matériaux granulaires**.

Chapitre 7

Des exemples de travaux ou d'aménagement de cours d'eau

7.1. L'effacement ou l'abaissement des ouvrages

Pour les ouvrages sur les cours d'eau dont l'utilité ne semble plus avérée ou les ouvrages abandonnés, l'effacement de l'ouvrage est une des solutions pouvant permettre de rétablir la dynamique fluviale et la continuité écologique. L'effacement est envisagé lorsque les frais d'entretien de mise aux normes sont supérieurs à l'utilité du maintien ou lorsqu'il est jugé que l'ouvrage n'est pas compatible avec certains enjeux environnementaux tels que la Directive Cadre sur l'Eau, le plan anguille ... Sans supprimer complètement l'ouvrage, un abaissement de la hauteur de l'ouvrage peut être envisagé pour des raisons techniques ou en prévision d'un effacement total. Il peut également être préféré pour concilier à la fois continuité écologique et conservation du patrimoine. En effet, certains usagers, habitués à la présence dans le paysage d'ouvrages, ne souhaitent pas les voir disparaître et préfèrent d'autres mesures de gestion à mettre en œuvre qui permettent de les conserver. C'est par exemple le cas des moulins.



Figure 7.1. Abaissement des ouvrages

7.2. L'entretien des berges et des ripisylves

Les opérations d'entretien des cours d'eau concernent particulièrement celui des ripisylves et des berges. La ripisylve est une formation végétale composée de trois strates :

Une strate herbacée ;

Une strate arbustive ;

Une strate arborée.

La ripisylve a de nombreux rôles quant à la préservation de la qualité des cours d'eau : elle protège et consolide les berges

Elle retient les pollutions diffuses et élimine naturellement les nitrates.

Elle évite le dessèchement et freine le ruissellement de l'eau.

Elle abrite de nombreuses espèces.

Elle fait office de corridor biologique.



Figure 7.2. Entretien des berges

- La ripisylve a de nombreux rôles quant à la préservation de la qualité des cours d'eau : elle protège et consolide les berges
- Elle retient les pollutions diffuses et élimine naturellement les nitrates.
- Elle évite le dessèchement et freine le ruissellement de l'eau
- Elle abrite de nombreuses espèces
- Elle fait office de corridor biologique

Les berges sont des écotones. Elles constituent une zone de transition entre l'écosystème aquatique et forestier (qui est la ripisylve). Elles abritent des espèces de milieux aquatiques et de rive (par exemple, la musaraigne aquatique (*Neomys fodiens*), le martin pêcheur (*Alcedo atthis*), le cincle plongeur (*Cinclus cinclus*) et bien d'autres...). Si les berges doivent être restaurées, leur artificialisation (en béton par exemple) n'est pas conseillée. Elles perdent alors leur potentiel de corridor écologique, ne permettent plus les échanges entre le sol et le cours d'eau. De plus, il arrive que les espèces telles que les amphibiens ne puissent pas remonter sur la berge par manque de support. Des techniques de génie végétal sont alors utilisées permettant de consolider les berges avec des végétaux vivants. Leur système racinaire permet de stabiliser les berges et de les protéger du courant et de l'érosion. Différents facteurs physiques et botaniques sont à prendre en compte pour les plantations comme par exemple l'exposition à la lumière, le pH, la porosité du sol, la morphologie aérienne des végétaux, le pouvoir de régénération des végétaux, leur action sur les autres plantes, la morphologie du système racinaire....

7.3. La reconexion des annexes hydrauliques

Les annexes hydrauliques sont considérées comme des zones présentant un fort potentiel écologique, lié à une faune et une flore riche et diversifiée, et montrant de multiples rôles dans le maintien de cette biodiversité. Cependant, ces zones humides restent des biotopes fragiles et non protégés, qui sont souvent délaissés et tendent à se fermer. De multiples fonctions sont attribuées aux annexes telles que l'interception de pollutions diffuses (phénomène d'autoépuration), la conservation de la biodiversité du fait d'habitats diversifiés, l'amélioration des caractéristiques morphologiques et physiques du cours d'eau, le rôle de refuge pour la faune et le rôle de zone de reproduction pour des espèces piscicoles.



Figure 7.3. Annexes hydrauliques

L'enfoncement du lit des rivières peut conduire à la déconnexion des annexes hydrauliques qui tendent à s'assécher et ne sont alors plus accessibles par les espèces piscicoles et moins propices à un développement favorable pour les espèces floristiques. Leur reconnexion paraît donc importante en vue de retrouver une continuité écologique des cours d'eau. Pour se faire, des travaux de terrassement sont généralement réalisés pour permettre la reconnexion à l'aval et/ou à l'amont.

7.4. Augmenter la capacité d'accueil du milieu pour les poissons

- **Mise en place d'ouvrages telles les passes à poissons :**
Les passes à poissons permettent aux poissons de franchir des obstacles artificiels.
- **Mise en place de divers habitats :**
De frayères.
De caches sous berge ou ils peuvent se reposer et s'abriter.
De déflecteur qui diminue la section d'écoulement et contribue à la diversification des habitats (création de fosses par exemple) et des écoulements.
De seuil qui créent des petites chutes d'eau qui favorisent l'oxygénation du milieu et maintiennent une hauteur d'eau adéquate pour le développement de juvéniles. Les seuils vont également favoriser le développement de fosse à l'aval (zones refuges potentielles).
- **Le fond doit présenter certaines particularités pour que les femelles aillent pondre :**
Un lit de galets ou de gravier stables pour éviter le déplacement trop important des œufs en cas de crue.
La granulométrie doit être adaptée pour que les femelles puissent creuser un trou et y mettent leurs œufs.
La hauteur d'eau la vitesse du courant et l'oxygénation sont également des facteurs importants.

7.5. La gestion des espèces exotiques envahissantes

La prolifération des plantes exotiques envahissantes cause déjà depuis de nombreuses années, des nuisances sur le fonctionnement des hydro systèmes tant pour la biodiversité que pour les usagers. Devant l'impossibilité d'atteindre une éradication et pour freiner la dynamique d'expansion de ces espèces tout en limitant la dépense publique investies dans la surveillance et la gestion de ces proliférations, les gestionnaires doivent avoir des outils de compréhension et de suivi de phénomènes invasifs pour guider le chaos dans la gestion annuelle et pluriannuelle de ces espèces.



Figure 7.4. Gestion des espèces exotiques

7.6. La restauration des zones humides

Les zones humides, qui contribuent à la fois à la préservation de la ressource en eau et la protection des espèces emblématiques, voient leurs surfaces fortement régresser au cours de ces dernières années malgré un intérêt fort et reconnu. Plusieurs actions sont mises en œuvre pour restaurer ces milieux particuliers :

- **La valorisation** des zones humides de préférence non dégradés peut faire l'objet d'aménagements simples et servir de lieu de balade pour la mise en place de sentier découverte par exemple, s'insérant ainsi parfaitement dans le cadre de vie d'une population. Il s'agit également d'une manière de sensibiliser le public aux problématiques des zones humides
- **La restauration** : cette action vise à restaurer les zones humides dégradées et à rétablir le fonctionnement ou d'assurer le retour de certaines activités en adéquation avec le milieu.
- **La compensation** : l'intervention de l'aménagement de certaines zones comme la construction d'une route par exemple peuvent conduire à la détérioration ou la disparition totales des zone humides. Des mesures de recréation des zones humides doivent être envisagées.



Figure 7.5. Zone humide

Chapitre 8

Protection contre les inondations

8.1. Analyse des crues

La crue dépend essentiellement de l'abondement et de l'intensité de pluie, elle évolue en général suivant l'intensité de l'averse. Sa vitesse est largement influencée par la couverture végétale, la lithologie du terrain ainsi que les paramètres morphologiques du bassin versant.

8.2. Genèse des crues et inondations

Les crues sous climat méditerranéen (semi-aride) sont occasionnées par des orages violents et fréquents. Elles ont accompagné des pluies torrentielles (120 à 190mm) dans certaines régions de l'ouest algériens. Les lames d'eau précipité mensuel de 168,3 mm de précipitation en engendrent un débit $Q= 1912 \text{ m}^3/\text{s}$ provoquant d'énorme inondation.

8.2.1. Définition de l'inondation

Elle désigne un recouvrement d'eau qui déborde du lit mineur et qui affleure le niveau du talweg.

8.2.2. Processus conduisant aux crues et aux inondations

Eau mobilisable

Dans la plupart des cas les eaux fondamentales des inondations est l'arrivée d'importantes chutes de pluie (exceptionnelles).

Pluies répètes : (uniforme qui tombe toute la journée)

Averse : relativement court mais intense

8.2.3. Types d'inondation

Crue torrentielle ou éclair

Ces crues sont particulièrement dangereuses en raison de la soudaineté et la rapidité avec lesquelles elles se produisent. Les débits des oueds passent de quelques mètres cubes secondes à quelques milliers de mètres cubes secondes.

Crue de plaines ou fluviales

Elles se caractérisent par des montés relativement lentes et peuvent se produisent dans plusieurs heures, voire quelques jours. Ces crues peuvent être dangereuses pour certains ouvrages de Génie civil.

Inondation dans le secteur urbain

Au secteur urbain, des orages intenses peuvent occasionner un très fort ruissellement avec un réseau d'assainissement mal entretenue peut créer des inondations importantes (Beb el oued le : 10/10/2001, 214 mm en 24heures)

8.3. Gestion et exploitation des ouvrages de protection

8.3.1. Recalibrage des ouvrages des cours d'eau

Le principe de Recalibrage consiste à augmenter le débit tout en augmentant la section d'écoulement par élargissement du lit de l'oued. Ce système a été mis en œuvre à partir des années 1950 et a permet de réduire les fréquences de submersion des terres agricoles, ce recalibrage s'accompagne suivant des enlèvements importants de la végétation qui accroît la sensibilité des berges à l'érosion.

8.3.2. Endiguement d'un cours d'eau

Une digue est une construction établie dans le but de rétablir les eaux de pluie, ils peuvent avoir plusieurs fonctions : dériver l'eau, canaliser l'eau

Parmi les digues de protection, on trouve :

Des digues le long d'un cours d'eau : polder (digue accolées à la berge)

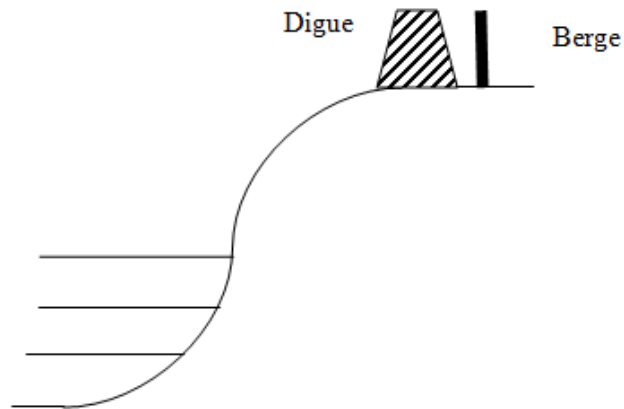


Figure 8.1 : Polder

Parfois positionne dans l'oued

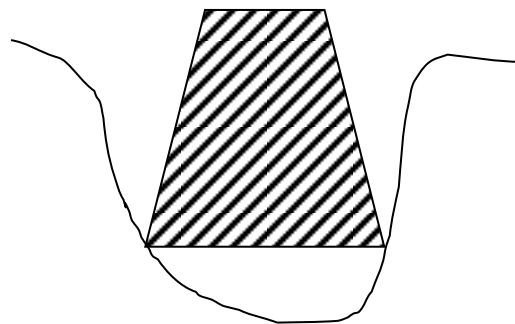


Figure 8.2 : Digue implantée dans l'oued

Polder éloignée

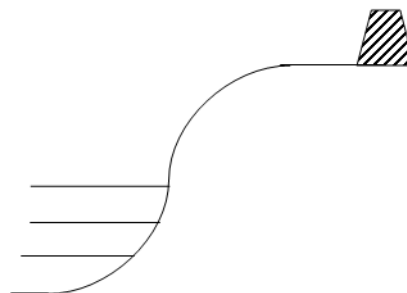


Figure 8.3. Polder éloigné

8.3.3. Caractéristiques des digues

Lors d'une crue la rivière déborde dans son lit mineur et inonde progressivement le lit majeur dans les cas de fortes crues. Le rôle de la digue de limiter l'ampleur de l'inondation. Certaines digues sont équipées soit d'un déversoir ou d'une vidange de fond afin de réduire la charge de la retenue.

8.4. Reboisement

En plus de leurs volet écologique et touristique, les forêts ont un rôle considérable dans la conservation du sol et des eaux. Cette végétation ralentie en général la montée des crues.

8.5. Barrage écrêteur

Le barrage écrêteur a pour but l'écrêtement des crues, et parfois, a vocation multiple, son principe de fonctionnement est de stocker temporairement un certain volume dans le lit du cours d'eau de façon à diminuer le débit de crue en aval selon le schéma

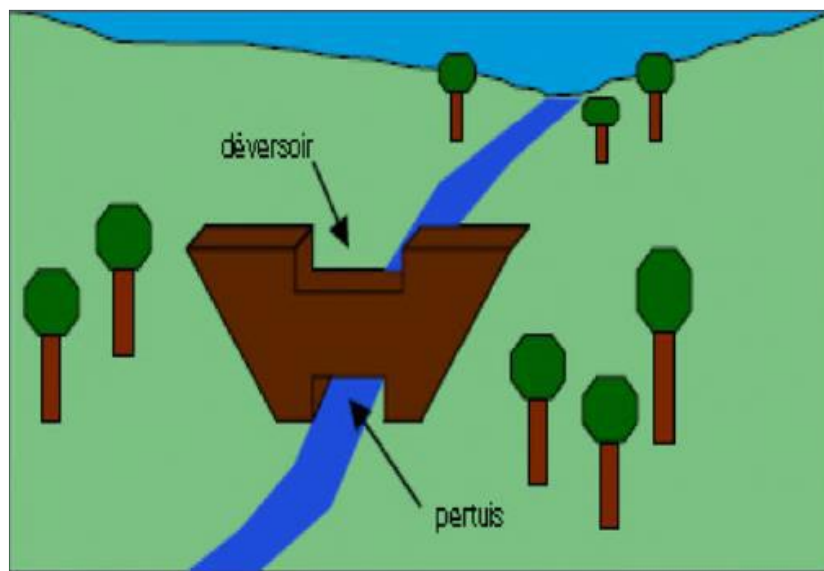


Figure 8.4. Schéma d'un barrage écrêteur

8.6. Correction torrentielle

C'est une technique qui a pour objectif de limiter les vitesses des écoulements dans les cours d'eau ayant des régimes torrentiels.

Un torrent est corrigé par la construction d'un nombre de digues successives transversales sur les lits des canaux naturels.



Figure 5.5. Correction torrentielle

Le nombre des digues à construire est donné selon la formule :

$$N = L \cdot (P - I) / H \quad (8.1)$$

N : Nombre de digues

L : Longueur du ravin (m).

P : Pente moyenne du lit.

H : Hauteur moyenne des digues (1 à 4 mètres).

I : Pente de compensation (pente inter digue, elle est inférieure à la pente initiale du lit de ravin)

$I \approx 0,01$.

8.7. Les épis

Un épi en rivière est ouvrage transversal au courant, enraciné dans la berge, ne barrant qu'une partie du lit et au moins partiellement submersible. Les épis sont utilisés pour protéger les berges ou pour faciliter la navigation. Dans le domaine maritime, des épis peuvent être utilisés pour protéger des plages.

L'espacement entre les épis dépend de la largeur de la rivière, de leur longueur et de leur nature. Théoriquement, pour qu'un système d'épis soit efficace, il faut que l'écart entre deux épis successifs soit de l'ordre d'une fois et demie (1,5) leur longueur moyenne

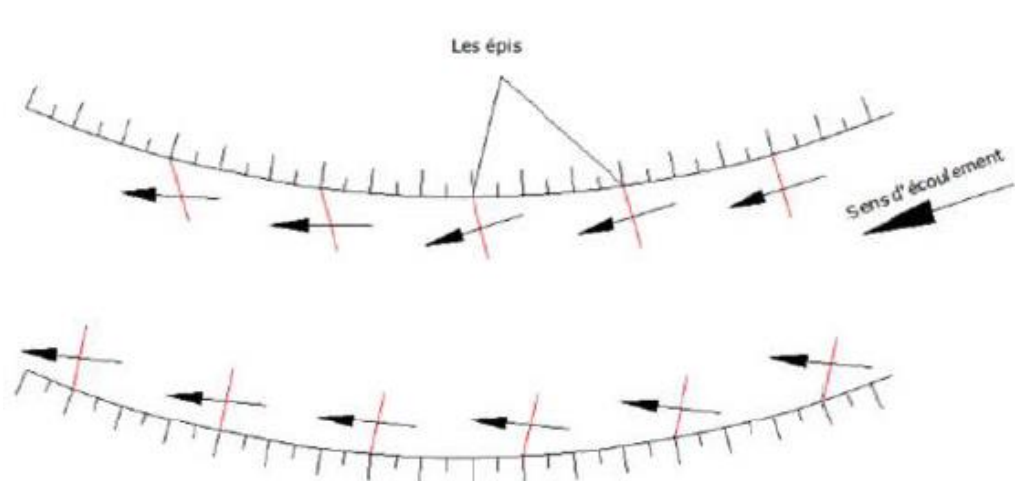


Figure 8.6. Implantation des épis

8.8. Banquette :

La technique des banquettes est de double objectif, la lutte contre l'érosion et la réduction de ruissellement en favorisant l'infiltration due à la diminution de pente. Leurs effets sont considérables dans la défense et la restauration de sol

- La banquette mécanique se divise en quatre zones.
- Le fossé large reçoit les eaux de ruissellement de l'impluvium.
- Le talus reçoit la pluie et un apport latéral des eaux du fossé.
- L'impluvium à l'amont du fossé ; zone cultivée entre les bourrelets, qui ne reçoit plus que la pluie moins le ruissellement.
- La zone de l'impluvium à l'aval et proche du bourrelet qui pourrait recevoir un appoint d'eau par drainage à travers le bourrelet lors des grosses averses.

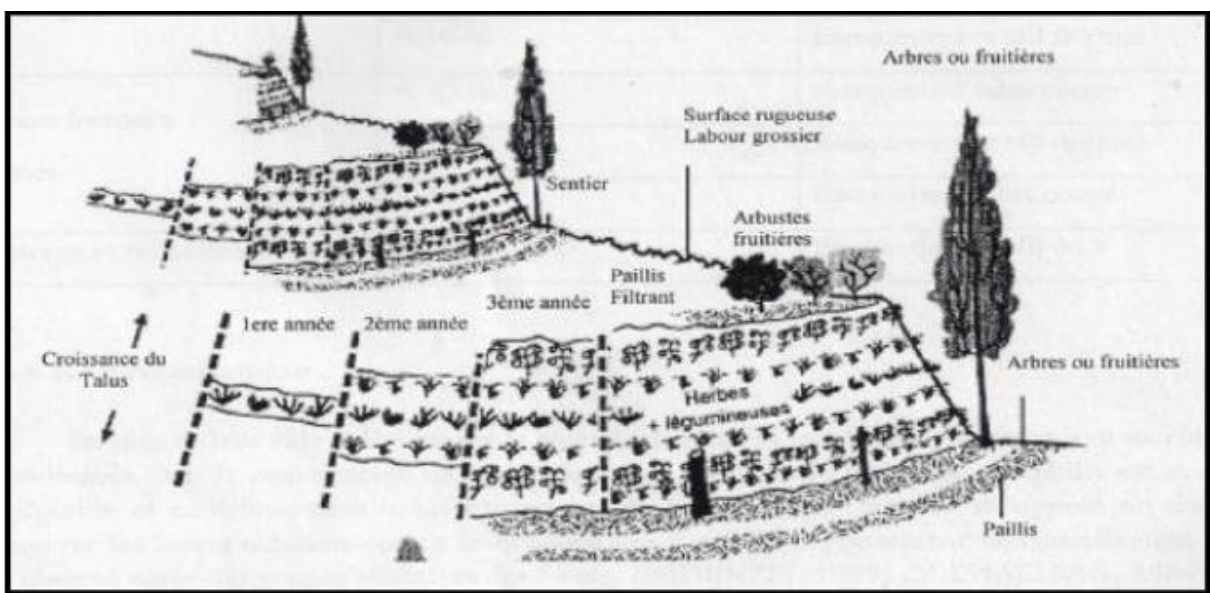


Figure 8.7. Technique de banquette

Chapitre 9

Lutte contre l'érosion

9.1. Qu'est-ce que l'érosion

L'érosion des sols est un phénomène complexe dans lequel de nombreux facteurs entrent en jeu. Prenant naissance sur les parcelles agricoles, l'érosion peut avoir des conséquences importantes tant sur ces terrains que sur les secteurs urbanisés situés en aval.

On peut définir l'érosion comme le détachement et le transport des particules sous l'effet de la pluie, lorsque le sol n'est plus capable d'infiltrer l'eau. Cette situation se produit généralement sur des sols préalablement fragilisés, dans le cas d'une intensité de pluie supérieure aux capacités d'infiltration du sol (lors d'orages violents notamment), ou sur des sols gorgés d'eau (en périodes automnale et hivernale).

Ce transport d'eau et de terre, plus ou moins massif et rapide, peut générer des conséquences importantes sur un plan économique, humain et écologique : le potentiel agronomique des terres s'en trouve diminué, les risques d'inondations accrus (coulées de boue, augmentation de l'intensité et du volume des crues de rivière), et les milieux naturels dégradés.

On peut distinguer deux types d'érosion : L'érosion en nappe (ou diffuse) Il s'agit d'un décapage uniforme de la couche superficielle de terre. Il se produit principalement sur les zones de plateaux.

Cette forme d'érosion passe souvent inaperçue mais peut arracher un volume de terre important : un décapage de 1 mm sur 1 ha correspond à la perte d'un volume de 10 m³ de limons fertiles. Les dégâts sont pratiquement irréversibles.



Figure 9.1. Erosion en nappe

L'érosion en rigoles (ou ravines) Lorsque les eaux de ruissellement se concentrent, elles peuvent selon la nature du sol et l'intensité du relief former une ravine par creusement. Cette érosion se produit généralement dans les vallées sèches et dans les fonds de thalwegs* qui constituent des chemins d'écoulements préférentiels pour l'eau qui ruisselle.

Cette forme d'érosion peut charrier de grandes quantités de terre, et être à l'origine de coulées de boue importantes. Elle est cependant maîtrisable pour peu que l'on adopte certains principes cultureux et que l'on préserve ou conforte certains éléments du paysage régulateurs des écoulements.



Figure 9.2. Erosion en rigole

9.2. Les dommages causés par l'érosion

L'érosion des sols est à l'origine de multiples problèmes. A l'amont, les agriculteurs sont directement concernés par les dégâts sur leurs parcelles. A l'aval, les agriculteurs mais aussi les autres habitants subissent les dégâts liés aux coulées boueuses.

9.2.1. La diminution du potentiel agronomique

Les premiers dégâts causés par l'érosion des sols concernent directement les agriculteurs. Sur le terrain, l'impact est parfois très visible et assez spectaculaire. Sur un plan économique, les conséquences peuvent être lourdes du fait d'une diminution sensible des rendements.

La destruction des semis

Sur les zones amont, l'érosion des sols provoque le déchaussement et l'arrachement des plants. En aval des parcelles, lorsque la terre charriée se dépose, elle recouvre et noie les semis et les jeunes plantes.



Figure 9.3. Semis endommagés par le ruissellement de l'eau

Une perte du capital sol

Dans le cas d'une érosion en nappe, la perte de sol entraîne une forte diminution de la fertilité des terres. L'impact est d'autant plus important que le sol est mince : l'érosion peut décaper entièrement la couche superficielle de terre, précisément la plus riche en éléments fertilisants et en matière organique. On aperçoit alors la roche-mère* à la surface. Dans le cas de ravines profondes, la terre devient totalement inculte.



Figure 9.4. Terre agricole rendue inculte par dépôt de limon en aval d'une ravine

Une gêne pour les travaux agricoles

La formation d'une ravine peut couper une parcelle en deux et donc considérablement entraver le passage des engins agricoles. Certaines ravines sont infranchissables et nécessitent de les contourner. Ceci augmente le temps de travail et les coûts de production.



Figure 9.5. Ravine qui atteint plus de 1.5m de profondeur

L'hétérogénéité des parcelles

En même temps que le transport des particules de terre, sont entraînés les produits de traitement et les engrais disponibles à la surface du sol. Ce phénomène peut provoquer des dégâts dans le bas de la parcelle (surdosage, phytotoxicité, pollution ponctuelle des cours d'eau).

9.2.2. Les inondations et coulées de boue

Les coulées de boue

L'érosion, bien qu'elle se produise sur les terrains agricoles, peut avoir des conséquences directes sur les habitants. En effet, elle peut être à l'origine de violentes coulées de boue touchant les villes et villages situés en fond de vallée. Ces coulées de boue sont le résultat de l'accumulation des eaux de ruissellement et de la terre décrochée des terrains agricoles, et peuvent provoquer des dégâts notables sur la voirie (obstruction des voiries, sapement des chaussées, colmatage des réseaux d'eaux pluviales) et sur les habitations. Les coulées de boue sont souvent imprévisibles et peuvent survenir très rapidement lors d'un orage violent.



Figure 9.6. Dégâts sur les voiries occasionnées par les eaux de ruissellement fortement chargés en matières en suspension

L'augmentation de l'intensité des crues des rivières :

De nombreuses communes du Parc connaissent fréquemment les inondations dues aux débordements des cours d'eau et leurs conséquences psychologiques et économiques. Par ailleurs, l'envasement du cours d'eau consécutif à l'érosion des sols gêne le bon écoulement hydraulique et augmente ainsi les risques de débordement des rivières. Lors de fortes pluviométries, toutes les eaux de ruissellement de la vallée terminent leur course dans la rivière, qui représente leur exutoire naturel, et viennent donc augmenter l'ampleur de la crue.

9.2.3. Les dommages causés par l'érosion

La dégradation des milieux naturels

Le Parc possède un patrimoine naturel remarquable, notamment par la diversité des milieux aquatiques et humides (rivières, marais, fonds de vallée). L'érosion peut sensiblement affecter ces richesses.

Les impacts sur les cours d'eau

L'arrivée de sédiments dans la rivière perturbe fortement son fonctionnement Écologique. D'une part les conditions de vie piscicole sont affectées : l'augmentation des matières en suspension enrichit le milieu, génère un développement anormal du phytoplancton, réduit la pénétration de la lumière et provoque le colmatage des frayères. En outre, l'apport de matières organiques augmente l'activité bactérienne qui a pour conséquence un appauvrissement du milieu en oxygène et l'eutrophisation* du cours d'eau. D'autre part, l'envasement du lit des cours d'eau gêne le bon écoulement hydraulique, et augmente les risques de débordement en amont. Les travaux de curage habituellement réalisés pour restaurer la section du lit sont coûteux et dégradent fortement la biodiversité aquatique. Enfin, l'envasement des estuaires qui découle du charriage des sédiments par les cours d'eau porte également atteinte à la productivité piscicole marine.

Les impacts sur les marais

Lieux de vie de nombreuses espèces animales et végétales, les marais constituent des milieux naturels remarquables. Cependant, ce sont des milieux également très fragiles dont les richesses naturelles sont intimement liées à la présence et à la qualité de l'eau.

Toute perturbation de l'équilibre hydraulique d'un marais agit donc plus ou moins directement sur ses richesses écologiques.

Du fait de la faible circulation de l'eau dans un marais, les phénomènes d'érosion à l'échelle d'un bassin versant provoquent progressivement l'atterrissement du marais et sont à l'origine de dysfonctionnements hydrologiques et sédimentaires importants.

L'arrivée massive des sédiments et la dégradation de la qualité de l'eau qui en découle menacent directement les populations animales et végétales aquatiques, sources alimentaires d'autres espèces. Pour ces dernières, cette baisse quantitative de ressources alimentaires disponibles aboutit à une diminution de leurs effectifs et peut aller jusqu'à leur complète disparition du milieu.



Figure 9.7. Taux des matières en suspensions dans l'eau des rivières au moment des crues dégrade la qualité de l'eau et des habitats aquatiques

9.3. Les causes de l'érosion

9.3.1. Les facteurs naturels

De multiples facteurs rentrent en jeu dans le mécanisme d'érosion des sols. De ce fait, les phénomènes d'érosion sont très évolutifs dans l'espace et dans le temps. Il est difficile de localiser de manière définitive les zones à risques, et de prévoir de façon certaine les périodes dans l'année où ce phénomène va se produire.

Le risque d'érosion des sols est tout d'abord dépendant d'un certain nombre de facteurs naturels et donc difficilement maîtrisables :

I - La Pente des terrains

Le relief influence inévitablement la vitesse de ruissellement des eaux sur une parcelle. Plus cette vitesse ne sera élevée, plus l'arrachement des particules de terre seront important. D'après *l'Association Régionale d'Etude pour l'Amélioration des Sols en Seine Normandie, 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.

II - Le climat

La pluie est sans aucun doute le facteur principal de l'érosion, qui dépendra alors de la durée et de l'intensité des précipitations.

III - La texture des sols

Les sols limoneux ou affinis 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.

9.3.2 Les facteurs aggravants

Depuis quelques décennies, le phénomène d'érosion s'est globalement aggravé. Ceci est dû à l'évolution de l'action de l'homme sur les paysages et à la modification des pratiques agricoles. Ces facteurs aggravants, contrairement aux causes naturelles, sont réversibles pour peu que l'on prenne conscience de leur impact et que l'on agisse sur eux.

I - L'évolution des paysages

Une augmentation de la taille des parcelles

Le développement de la mécanisation et l'évolution de l'économie agricole ont amené les agriculteurs à regrouper leurs parcelles pour agrandir les zones de culture. De nombreux remembrements n'ont malheureusement pas intégré les risques d'érosion, et l'augmentation de la taille des parcelles et l'uniformité croissante des cultures sur les versants ont aggravé les problèmes.

L'évolution de l'usage des sols

L'occupation des sols a une grande influence sur l'érosion. L'imperméabilisation des sols et la diminution des surfaces tampon* augmentent fortement les risques. Au niveau agricole, deux facteurs sont à prendre en considération :

En premier lieu, la diminution des surfaces toujours en herbe (bétails et élevages). En second lieu, le développement des cultures de printemps (maïs pomme de terre, le lin)

La disparition des éléments structurants du paysage

L'augmentation des parcelles s'est accompagnée d'une disparition de nombreux éléments structurants du paysage qui jouent un rôle primordial dans la circulation de l'eau.

Les haies et talus favorisent la dispersion et l'infiltration des eaux de ruissellement et provoquent le dépôt des matériaux entraînés.

Ces éléments jouent le rôle de barrages naturels et évitent la concentration des eaux et la propagation du ruissellement. Leur arasement augmente donc les risques d'érosion des sols.

II - L'évolution des pratiques agricoles

Les pratiques agricoles ont également évolué, et peuvent être à l'origine d'une dégradation hydraulique des bassins agricoles.

L'affinement de la terre

La préparation du lit de semence avant l'installation d'une culture nécessite souvent un affinement de la terre. Un affinement du sol trop poussé favorise la formation d'une croûte de battance.

Le tassement des sols

La mécanisation agricole et la multiplication des interventions culturales (traitements phytosanitaires, apports d'engrais) provoquent le tassement des sols et accroissent le phénomène de ruissellement par concentration des eaux dans les traces de roues des engins. On peut toutefois noter qu'aujourd'hui, les machines évoluent dans le bon sens avec des pneus mieux adaptés aux sols à faible portance.

La baisse de la teneur en matière organique du sol

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.



Figure 9.8. Une terre trop affinée favorise la battance (résistance au splash)

L'absence de couvert hivernal

Le couvert hivernal constitue un écran protecteur pour le sol pendant les périodes les plus pluvieuses. Il permet également d'augmenter la rugosité du sol et donc la dispersion et le ralentissement des écoulements. La stabilité du sol est assurée par la couverture végétale et son système racinaire.

Les cultures d'hiver peuvent être parfois très vulnérables à l'érosion. Lorsqu'elles sont semées tardivement, elles ne bénéficient pas d'une bonne couverture végétale et leur système racinaire n'est pas encore assez développé pour résister à l'érosion des sols pendant l'hiver.

Le sens du labour

Le travail du sol dans le sens de la pente accentue fortement le phénomène de ruissellement en traçant des lignes d'écoulement préférentielles pour l'eau. Un travail perpendiculaire à la pente est donc souhaitable, bien que parfois difficile à mettre en œuvre.

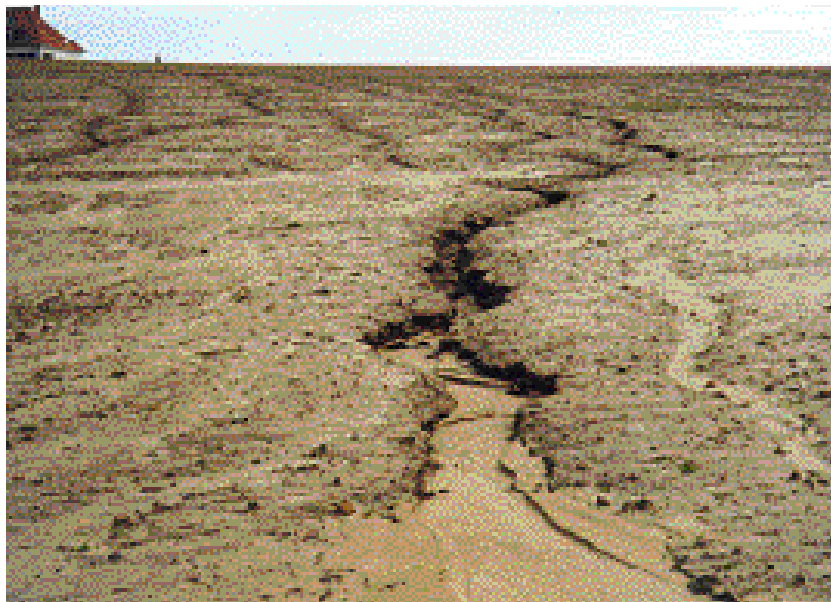
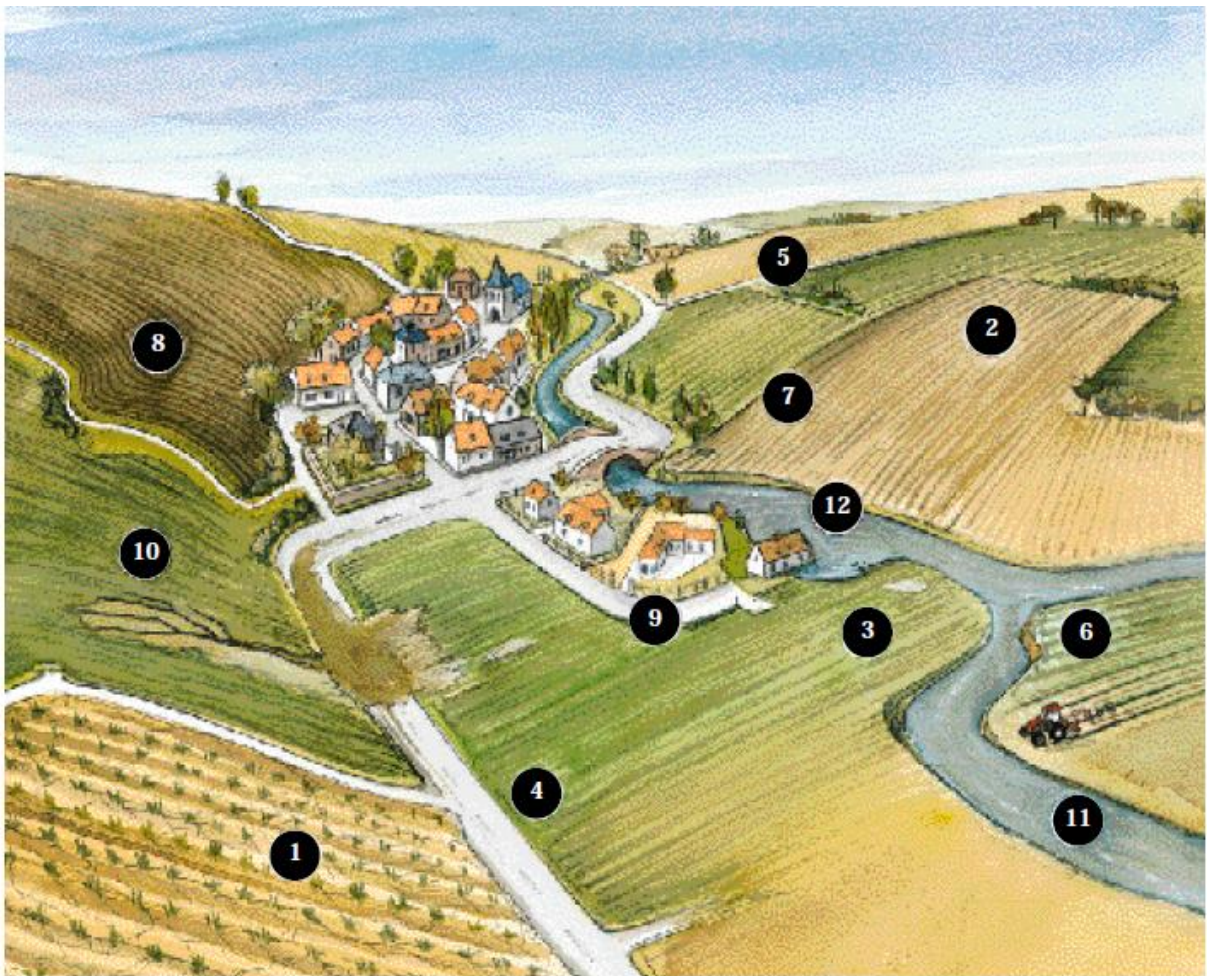


Figure 9.9. Ravinement



Figure 9.10. Dégâts sur des parcelles semées dans le sens de la pente

9.3.3. Représentation Schématiques des causes et des conséquences de l'érosion des sols



Les causes

1. La texture des sols est un des facteurs principaux :

De l'érosion des sols. Les sols limoneux sont très propices à la battance, phénomène qui les rend imperméables et qui augmente le ruissellement des eaux.

2. L'agrandissement des parcelles agricoles suite aux nombreux remembrements accroît les risques d'érosion des sols en créant des conditions favorables au ruissellement des eaux (augmentation de la vitesse d'écoulement des eaux notamment).

3. La diminution des Surfaces Toujours en Herbe participe au phénomène d'érosion des sols. Les prairies assurent un couvert permanent qui tamponne efficacement les eaux de ruissellement.

4. La disparition des fossés qui accompagne souvent l'agrandissement des parcelles exacerbe le problème d'érosion des sols. Les fossés permettent de maîtriser la circulation des eaux de ruissellement et d'éviter leur accumulation sur les parcelles agricoles.

5. La destruction du maillage bocager telles les haies ou les talus ont souvent accompagné les anciens remembrements agricoles. Ces éléments paysagers jouent pourtant un rôle primordial dans la gestion des eaux et représentent des obstacles naturels au ruissellement des eaux sur un versant.

6. Les traces de roues générées par des passages d'engins répétés et des outils non adaptés (pneumatiques par ex.) créent des chemins préférentiels pour les eaux de ruissellement, augmentent les risques d'accumulation sur la parcelle et donc de formation de ravines.

7. Le labour parallèle à la pente accroît fortement la vitesse de ruissellement des eaux.

8. Les sols laissés nus l'hiver favorisent l'érosion des sols en diminuant les capacités d'infiltration des sols.

9. Une urbanisation mal maîtrisée augmente l'imperméabilisation des sols et donc les vitesses de ruissellement des eaux. Les constructions dans les zones à risques de coulées de boue et d'inondations doivent parfois supporter des dégâts matériels importants

Les conséquences

10. 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.

11. "La rivière brune" chargée en limons provenant des versants. La qualité de l'écosystème s'en trouve dégradée (colmatage des frayères, diminution de l'oxygène dissout nécessaire à la vie aquatique etc.)

12. L'augmentation des crues des rivières avec l'arrivée massive des eaux de ruissellement provenant du bassin versant

Bibliographie

Ali Berreksi., 2015, Cours hydraulique 3, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

Degoutte. G., 2006, Diagnostic, aménagement et gestion des rivières, Hydraulique et morphologie fluviales appliquées, Lavoisier, France.

Frédéric Élie., 2009, Le ressaut hydraulique - site <http://fred.elie.free.fr>.

Frédéric Élie., 2014, Écoulement au-dessus d'un déversoir, site <http://fred.elie.free.fr>.

Graf, Walter et Mustafa, Altinakar., 1998, Hydraulique Fluviale, Lausanne, Presses Polytechniques Romandes.

Jean-Louis Ballais, Sylvain Chave, Nadia Dupont, Éric Masson et Marie-Josée Penven., 2011, La méthode hydro-géomorphologique de détermination des zones inondables, Physio-Géo Géographie Physique et Environnement (ISSN 1958-573X) Collection 'Ouvrages'.

Ledoux B., 2006, La gestion du risque inondation, Edition TEC et DOC 11, rue Lavoisier-Paris.

Mériaux. P et Royet. P et Folton. C., 2001, Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, Cemagref Editions.

Mokhtari El hadj., 2018, Polycopié de cours Aménagements Hydrauliques, Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

Serre D., 2005, Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Marne-La-Vallée Paris.

Verniers, G., 1995, Aménagement écologique des berges des cours d'eau, Techniques de stabilisation, Presses Universitaires de Namur, Belgique, 77 pages.

Yahiaoui A., 2012, Inondations torrentielles_ cartographie des zones vulnérables en Algérie du nord (cas de l'oued Mekrra, Wilaya de Sidi Bel Abbés), Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique.

Serre D., 2005, Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Marne-La-Vallée Paris.