



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département d'Hydraulique et Génie Civil

MODULE SEMESTRIEL

AMENAGEMENTS DES COURS D'EAU ET TRANSPORT SOLIDE

2 Année Master Ouvrages Hydrauliques

Par

Dr. Assia MEZIANI

Année universitaire 2025/2026

Résumé

Le cours Aménagements des cours d'eau et transport solide, dispensé en Master 2^{ème} Année Ouvrages Hydrauliques a pour objectif principal de permettre aux étudiants de maîtriser les mécanismes d'érosion hydrique et de transport solide, phénomènes particulièrement critiques en Algérie car ils entraînent un envasement rapide des barrages, une dégradation des terres agricoles et des dommages aux installations hydrauliques. Il aborde en premier lieu les différents modes de transport des sédiments dans les cours d'eau : le transport en suspension (particules fines maintenues par la turbulence), le charriage et la saltation (matériaux plus grossiers qui roulent, glissent ou sautent sur le lit), ainsi que les facteurs qui les influencent (morphologie du cours d'eau, granulométrie, vitesse de chute selon la loi de Stokes, abrasion selon Sternberg et déclenchement lié au débit liquide et à la disponibilité sédimentaire). Le cours présente ensuite les techniques de mesure de la charge solide (échantillonnage sur le terrain, homogénéisation, tamisage et analyses en laboratoire) et les principales formules empiriques et semi-empiriques de quantification des apports solides (Meyer-Peter & Müller, Einstein-Brown, Ackers-White, Engelund-Hansen, Van Rijn, Recking, Lefort, etc.), en insistant sur les paramètres adimensionnels comme le nombre de Shields. La seconde partie est consacrée aux interventions humaines : rôle physique et écologique du cours d'eau, techniques de confortement des berges (lourdes avec enrochements et gabions, ou douces par génie végétal), ouvrages de correction torrentielle, aménagement des sols et lutte contre l'érosion hydrique (techniques culturales, amélioration de l'infiltration, bandes enherbées, dissociation des zones émettrices), ainsi qu'un aperçu des impacts environnementaux des aménagements et des mesures d'atténuation dans une perspective de développement durable. À travers une combinaison de théorie, d'exemples concrets adaptés au contexte algérien et d'applications numériques, ce module forme les futurs ingénieurs à analyser, quantifier et gérer durablement le transport solide tout en préservant les écosystèmes fluviaux.

Mots-clés : Aménagements durables ; Cours d'eau ; Transport solide ; Ouvrages de correction.

Unité d'enseignement : UEF 2.1.2

Matière : Aménagement des cours d'eau et transport solide

VHS : 45 h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Objectifs de l'enseignement : Cette matière permet aux étudiants d'acquérir des connaissances sur le phénomène d'érosion et du transport solide, problème important touchant les bassins versants et provoquant l'envasement des barrages.

Connaissances Préalables Recommandées :

- Base sur la géologie
- Bases sur l'hydrologie des bassins versants

Contenu de la matière :

1. Modes de transport solide
2. Techniques de mesure de la charge solide
3. Formules de transport et quantification des apports solides
4. Rôle physique et écologique du cours d'eau
5. Différents types/techniques de confortement de berges
6. Les ouvrages de correction torrentielle
7. Aménagement des sols et lutte contre l'érosion hydrique
8. Aperçu sur l'impact des aménagements sur l'environnement

Mode d'évaluation : continue + examen

Références : (Livres et polycopiés, sites internet, etc.).

AVANT PROPOS

Ce cours se penche sur la compréhension des dynamiques complexes des systèmes fluviaux et de leurs aménagements dans un domaine où la science et les enjeux environnementaux et sociétaux se rencontrent. Huit chapitres constitueront le développement de ce sujet au travers du fonctionnement du cours d'eau, de ses interactions avec son milieu naturel et de la mise en œuvre de techniques humaines permettant d'en garantir une gestion durable. Nous aborderons dans un premier temps les modes de transport solide, fondamentaux pour appréhender le mouvement des sédiments dans les rivières, puis les techniques de mesure de la charge solide qui permettent d'évaluer ces processus. Le chapitre concernant les formules de transport et la quantification des apports solides proposeront les outils théoriques et pratiques qui nous permettront de modéliser ces phénomènes, avant de traiter du rôle physique et écologique du cours d'eau qui en fait un écosystème vivant essentiel.

La deuxième partie du cours sera entièrement consacrée à l'étude des interventions humaines. Ainsi, nous aborderons dans un premier temps les différents modes et techniques de confortement des berges, avant de nous pencher sur les ouvrages de correction torrentielle qui permettent de stabiliser les milieux à risque. Le chapitre suivant, qui traitera de l'aménagement et de la protection des sols en lien avec la problématique de l'érosion hydrique, s'attachera à démontrer que des stratégies sont possibles pour préserver les terres, tandis que le dernier chapitre consacré à un état des lieux de l'impact environnemental des aménagements largement réalisés dans le cadre du développement durable, est en quelque sorte un appel à la prise de conscience des impacts écologiques résultant de nos propres réalisations. Ce parcours pédagogique s'adresse à tous ceux qui veulent approfondir leurs connaissances, y compris étudiants, professionnels et simples curieux. En conjuguant approche théorique et mise en pratique, nous espérons donner les clés pour comprendre, analyser et agir en faveur de la gestion durable des ressources en eau et des paysages fluviaux. Soyez préparés à un parcours intellectuel à la fois enrichissant et engageant !

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Chapitre I. Modes de Transport Solide

1.1. Introduction.....	1
1.2. Le déclenchement des transports solides a pour doubles origines.....	3
1.3. Différents modes de transport solide.....	3
I.3.1. Transport solide en suspension.....	4
I.3.2. Transport solide par charriage et saltation.....	4
1.4. Transport solide et morphologie.....	4
1.5. Caractéristiques des matériaux transportés.....	4
1.6. Dimension des particules.....	4
I.6.1. Nature des matériaux.....	5
I.6.2. Vitesse de chute.....	5
I.6.3. Abrasion des particules.....	6
1.7. Transport proprement dit.....	7
1.8. Conclusions.....	7
Applications numériques – Chapitre 1.....	8-12

Chapitre II. Techniques de Mesure de La Charge Solide

2.1. Introduction.....	14
2.2. La capacité de transport d'un cours d'eau.....	14
2.3. Mesure de la charge solide « débit solide ».....	15
2.3.1. La mesure du transport en suspension.....	15
2.3.2. La mesure du transport de fond.....	16
2.4. Méthodologie d'échantillonnage.....	17
2.4.1. Fréquence et période d'échantillonnage.....	17
2.4.2. Le site d'échantillonnage.....	17
2.4.3. Les points d'échantillonnage.....	17
2.4.4. Épaisseur de la couche de sédiment prélevée.....	18
2.4.5. Homogénéisation des divers prélèvements.....	18
2.5. Opérations à réaliser au laboratoire à réception des échantillons.....	18
2.5.1. Homogénéisation.....	18
2.5.2. Tamisage.....	19
2.5.3. Broyage et séchage.....	19
2.6. Conclusions.....	19
Applications numériques – Chapitre 2.....	21-24

Chapitre III. Formules de Transport et Quantification des Apports Solides

3.1. Introduction.....	26
3.2. Principes de la modélisation et paramètres adimensionnels.....	26
3.3. Les modèles en débit.....	28
3.4. Les formules mettant en œuvre la contrainte.....	29
3.4.1. Ackers et White [1973].....	29
3.4.2. Bagnold [1980].....	29
3.4.3. Einstein Brown [1950].....	29
3.4.4. Engelund et Hansen [1967].....	30
3.4.5. Lefort [2007].....	30
3.4.6. Meyer-Peter et Müller [1948].....	30
3.4.7. Schoklitsch [1962].....	30

3.4.8. Yang [1984].....	31
3.4.9. Rickenmann [1991].....	31
3.4.10. Van Rijn [1984].....	31
3.4.11. Recking [2006].....	31
3.4.12. Parker et al. [1982].....	32
3.4.13. Mizuyama [1977].....	32
3.4.14. Sogreah [1991].....	32
3.4.15. Lefort [2007].....	33
3.4.16. Zhang et al. [2011].....	33
3.4.17. Formule de Li et al. [2022].....	33
3.4.18. Formule d'Okeu et al. [2017].....	33
3.5. Conclusions.....	34
Applications numériques – Chapitre 3.....	35-40

Chapitre IV. Rôle Physique et Écologique du Cours D'eau

4.1. Introduction.....	42
4.2. Rôle physique du cours d'eau.....	43
4.3. Continuité écologique du cours d'eau.....	43
4.4. Conclusions.....	45
Applications numériques – Chapitre 4.....	46-50

Chapitre V. Différentes Techniques De Confortement De Berges

5.1. Introduction.....	52
5.2. Techniques lourdes.....	52
5.2.1. Principe.....	52
5.2.2. Matériaux utilisés.....	53
5.2.3. Avantages et inconvénients.....	55
5.3. Techniques douces.....	56
5.3.1. Principes.....	56
5.3.2. Différents types de protection.....	56
5.3.3. Avantages et inconvénients du génie végétal.....	58
5.4. Conclusions.....	58
Applications numériques – Chapitre 5.....	59-64

Chapitre VI. Les Ouvrages de Correction Torrentielle

6.1. Introduction.....	66
6.2. Rôle et fonctions des barrages de correction torrentielle.....	66
6.2.1. Stratégies de correction torrentielle.....	66
6.2.2. Méthodologie de conception.....	67
6.3. Typologie et fonctions des barrages de correction torrentielle.....	68
6.4. Considérations écologiques.....	70
6.5. Conclusions.....	70
Applications numériques – Chapitre 6.....	71-75

Chapitre VII. Aménagement des Sols et Lutte Contre L'érosion Hydrique

7.1. Introduction.....	77
7.2. Les techniques culturales.....	78
7.2.1. Diminuer l'impact des gouttes de pluie.....	78
7.2.2. Non déchaumage pendant l'interculture.....	78
7.2.3. Non labour.....	78
7.2.4. Cultures intermédiaires.....	78

7.3. Augmenter la capacité d'infiltration et de stockage à la surface du sol.....	79
7.3.1. Travail du sol.....	79
7.3.2. Utilisation d'équipements permettant de répartir les charges.....	79
7.3.3. Favoriser les céréales d'hiver.....	79
7.4. Consolider le sol.....	79
7.4.1. Par l'apport de matières organiques.....	79
7.4.2. Par l'amendement calcique.....	79
7.4.3. Favoriser le tassement sur les zones de passage d'eau.....	80
7.4.4. Éviter l'affinement excessif.....	80
7.5. Empêcher la concentration des eaux.....	80
7.5.1. Taille, forme et orientation des parcelles.....	80
7.5.2. Éviter le tassement du sol.....	80
7.5.3. Alternier les cultures.....	80
7.6. Reconversion des terres.....	80
7.7. Les aménagements hydrauliques.....	80
7.7.1. Méthode de travail pour une étude d'aménagement hydraulique.....	81
7.7.2. Limiter les volumes de ruissellement.....	81
7.7.2.1. La bande enherbée.....	81
7.7.2.2. Dissociation zones émettrices amonts et zones de pente.....	81
7.7.2.3. Limiter la concentration du ruissellement et créer des zones de dépôts.....	81
7.7.2.4. Ouvrages pour protéger les chemins d'eau et organiser l'écoulement.....	82
7.7.2.5. Ouvrages pour protéger les zones bâties des inondations.....	83
7.8. Conclusions.....	83
Applications numériques – Chapitre 7.....	84-88

Chapitre VIII. Aperçu sur L'impact des Aménagements sur L'environnement

8.1. Introduction.....	90
8.2. Types d'aménagements.....	90
8.3. Impacts environnementaux des aménagements.....	90
8.4. Mesures d'atténuation et de gestion.....	90
8.5. Interaction entre aménagements et environnement.....	90
8.6. Conclusions.....	91
Étude de cas : L'aménagement hydraulique et urbain de la ville d'Alger (Algérie).....	92-93
Exposé 01 – Chapitre 8.....	94-95
Exposé 02– Chapitre 8.....	96-97
Exposé 03– Chapitre 8.....	98-99
Références bibliographiques.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Modes de transport solide.....	3
Figure 1.2. Schéma explicatif de l'abrasion des articles.....	6
Figure 2.1. Capacité de transport dans un cours d'eau.....	14
Figure 2.2. Processus de mesure et analyse du transport des sédiments dans un cours d'eau.....	16
Figure 2.3. Procédures de tamisage en laboratoire pour l'analyse des contaminants organiques et métalliques.....	19
Figure 3.1. Étapes de la modélisation du transport solide (avec ou sans calcul de la ontrainte).....	27
Figure 4.1. Illustration lit mineur, lit majeur, berges.....	42
Figure 4.2. Les 3 axes de fonctionnement de l'hydrosystème (Ward, 1989).....	43
Figure 5.1. Érosion des berges (Illustration).....	52
Figure 5.2. Abaque de dimensionnement.....	53
Figure 5.3. Types de confortement de berges.....	54
Figure 5.4. Enrochement et zones fragiles par l'enrochement.....	55
Figure 6.1. Barrage de consolidation.....	66
Figure 6.2. Coupe schématique du barrage et des berges.....	68
Figure 7.1. Moyens à mettre en œuvre contre l'érosion.....	77
Figure 7.2. Ouvrages de stockage à l'interface agricole-urbaine.....	82
Figure 8.1. Interaction entre aménagements et environnement.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Classification des dimensions des particules selon leur mode de transport.....	5
Tableau 2.2. Principales caractéristiques des formules de transport utilisant le débit.....	28
Tableau 5.1. Tableau et tableau de dimensionnement.....	53
Tableau 6.2. Les fonctions de types de l'ouvrage.....	69

INTRODUCTION

L'eau qui s'écoule dans les rivières et les torrents ne transporte pas uniquement de l'eau, mais aussi une charge solide composée de sédiments, de particules minérales et organiques. La compréhension de ces phénomènes est cruciale, car le transport solide et l'érosion influencent directement la morphologie des bassins versants et le fonctionnement des infrastructures hydrauliques, notamment les barrages, les canaux et les systèmes de drainage.

Ce cours vise à fournir aux étudiants les connaissances et compétences nécessaires pour analyser, mesurer et gérer le transport solide dans les cours d'eau, tout en considérant les aspects physiques et écologiques. Il permettra d'aborder les techniques de mesure de la charge solide, les formules de transport, ainsi que les méthodes de protection et d'aménagement des berges et des sols afin de réduire l'érosion et l'envasement des ouvrages hydrauliques.

L'étude de l'aménagement des cours d'eau et du transport solide s'appuie sur des bases solides en géologie et en hydrologie des bassins versants, et s'inscrit dans une approche intégrée visant à concilier développement hydraulique et protection de l'environnement. Les étudiants seront ainsi capables de proposer des solutions techniques adaptées pour la gestion durable des cours d'eau et la prévention des problèmes liés à l'érosion et au transport de sédiments.

CHAPITRE I

CHAPITRE 1. MODES DE TRANSPORT SOLIDE

1. 1. Introduction :

Il existe différents modes de transport solide dans les cours d'eau, ils dépendent essentiellement de la morphologie du cours d'eau et des terrains traversés. Outils d'Erosion, les cours d'eau transportent des matériaux (blocs, cailloux, graviers, sable, limons, etc...), en quantités variables et quelques fois considérables. L'expression de transport solide recouvre un ensemble de phénomènes physique extrêmement vastes ayant tous un point commun : il s'agit de l'entraînement de solide à l'état granulaire sous l'action de l'eau.

La connaissance de ce transport en cas de réalisation de certains ouvrages d'art, vu les conséquences qui peuvent avoir lieu :

- ✓ L'engravement ou l'envasement de certains barrages.
- ✓ Détérioration des installations hydraulique (pompes, vannes) et hydro-électriques (turbines).
- ✓ Dégradation des terres agricoles.

1. 2. Le déclenchement des transports solides a pour doubles origines

L'ampleur du débit liquide qui dépend des conditions hydrométéorologiques sévissant dans les bassins versants.

La disponibilité en matériel susceptible d'être prise en charge, qui dépend de l'intensité et de la fourniture sédimentaire par les processus des versants. Cet effet demeure très difficile à l'expliquer, quoi qu'il y ait beaucoup de chercheurs dans ce domaine car les phénomènes soient beaucoup plus complexes lorsque deux phases réagissent ensemble (liquide et solide). Il faut connaître donc les caractéristiques du liquide et celles du solide.

1. 3. Différents modes de transport solide

Sous l'effet d'un flux liquide, les éléments constitutifs du lit sont susceptibles d'être mise en mouvement. Dans les cours d'eau fluviaux, et par extension dans les torrents. L'expression du Transport Solide recouvre un ensemble de phénomènes physiques extrêmement vaste, ayant tout commun : il s'agit de l'entraînement des solides à l'état granulaire en très grand nombre sous l'action de l'écoulement d'eau. L'objectif assigné à notre étude des transports solides est l'appréciation quantitative des vases dans les retenues du barrage étudié. Les eaux des cours d'eau transportent les sédiments sous deux formes : en suspension, et par charriage et saltation.

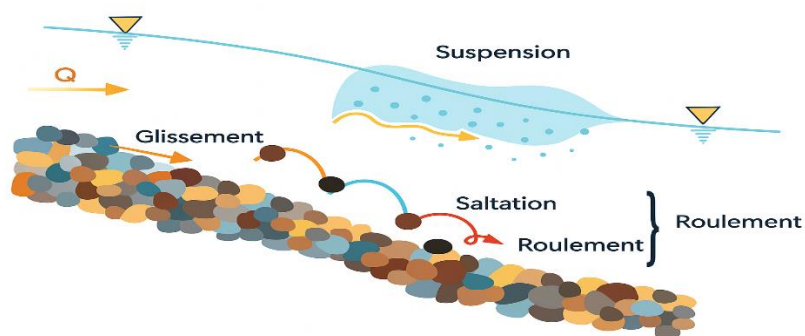


Figure 1.1. Modes de transport solide.

I. 3. 1. Transport solide en suspension

Ils concernent les particules fines, dont légères, qui sont maintenues dans le corps de l'écoulement, sans contact fréquent avec le lit, sous l'effet des fluctuations verticales turbulentes de la vitesse du liquide. Le transport solide en suspension traduit l'importance des hautes eaux et les crues qui sont la conséquence d'un ruissellement intensif des précipitations torrentielles. Les concentrations des éléments en suspension des oueds Algériens dépassent souvent les 100g/l surtout pendant les premières pluies d'automne.

I. 3. 2. Transport solide par charriage et saltation

La taille des particules est plus importante, l'énergie turbulente n'arrive plus à vaincre la pesanteur et les particules cheminent sur le fond sous l'action des forces hydrodynamiques. Ce transport met toujours en jeu les chocs et les frottements entre les particules, de ce fait les particules roulent et glissent les unes sur les autres (ou elles sautent légèrement sur le fond). On dit qu'il y a transport solide par saltation quand il y a suite de retombées successives à des distances relativement appréciables.

I. 4. Transport solide et morphologie

Le transport solide résulte d'interactions entre la phase liquide et la phase solide. Il faut voir ces interactions comme des actions constantes de l'écoulement sur la morphologie des cours d'eau et, réciproquement, de l'action du flux solide sur la nature de l'écoulement. Par exemple les chercheurs Smart et Jaeggi ont montré qu'à partir d'une pente de 7%, pour un débit liquide fixe s'écoulant sur un lit affouillable, la hauteur d'eau est significativement supérieure à ce qu'elle serait en l'absence de particules solides.

Concernant le risque torrentiel, les situations de risque peuvent résulter d'un excès d'apport de solide par rapport à la capacité d'un tronçon à les évacuer. Il est important d'être capables d'estimer la capacité de transport solide d'un cours d'eau et l'apport effectif de sédiments pour prévoir les catastrophes naturelles. Il est aussi essentiel de pouvoir évaluer l'évolution de la morphologie du cours d'eau en fonction des apports réels de sédiments.

I. 5. Caractéristiques des matériaux transportés

La capacité des transports des particules solides varie dans l'espace et le temps avec le débit liquide, sa vitesse d'écoulement et la nature granulométrique des matériaux. Le plus important des propriétés du point de vue hydraulique est la taille, la forme, la gravité spécifique, avec la propriété du fluide. On peut déterminer le mouvement relatif entre les particules et le fluide.

I. 6. Dimension des particules

Le calibre et la proportion des éléments influent sur la stabilité des matériaux du point de vue transport tel que l'existence des éléments qui seront facilement entraînés. On peut classer les dimensions des particules, selon leur mode de transport, tel que proposé par l'Américain Geophysical Union au tableau 1. Cette classification est faite en considérant qu'il s'agit de matériaux non cohérents, tapissant tout ou une partie des berges et du fond et conservant leur individualité propre du cours de leur transport dans les rivières.

Tableau 1. 1. Classification des dimensions des particules selon leur mode de transport.

Diamètres moyens	Désignations	Zones Concernées	Mode de transport	Nature du phénomène
De 0.24 à 4 µm	Vase	Lacs, estuaire, Littoral	Suspension et courant de densité	Mécanique et physicochimique
De 4 à 62 µm	Silt	Zone morte d'eau	//	Mécanique
De 62 µm a 2 mm	Sable	Littoral, cours d'eau	Suspension où charriage	//
De 2mm a 64mm	Gravier	Cours d'eau	Charriage	//
De 64mm a 250mm	Galets	Plage, rivière a forte pente, torrents	//	//
> 250mm	Blocs	Torrent a forte pente	//	//

I. 6. 1. Nature des matériaux

Les matériaux transportés sont de nature différent, suivant le facies géologique des régions dont ils proviennent et les plus intéressants sont les limons et les vases.

I. 6. 2. Vitesse de chute

Pour les faibles valeurs du nombre de Reynolds rapporté à la particule, il est préférable d'appliquer la formule de Stokes qui lie le diamètre à la vitesse de chute « W ». Soit :

$$W^2 = [A (P_s - P) \cdot g \cdot D^2] / C_0 \cdot P \quad (\text{mm}^2/\text{s}) \quad (1.1)$$

Avec :

- ✓ A : Constante qui dépend de la forme des grains ;
- ✓ D : diamètre de la particule ;
- ✓ P_s, P : densité du solide et du liquide (kg/m²) ;
- ✓ C₀ : coefficient de trainée dépend du nombre de Reynolds.

D'ou :

$$\text{Re} = W \cdot d / \nu \quad (1.2)$$

Avec :

W : vitesse de chute (m³/s) ;

d : diamètre de la sphère (grain) en (mm) ;
 ν : viscosité cinématique du liquide, $\nu = \mu/\rho$ (m^2/s).

Avec :

μ : viscosité dynamique ; ρ : masse spécifique.

A titre de comparaison, en eau calme, un grain de sable de diamètre 0.1 mm à une vitesse de chute de 1cm/s, et pour un grain de 0.01mm de diamètre, la vitesse étant proportionnelle au carré du diamètre, la vitesse de chute est 104 plus faible, il lui faut 3 heures pour parcourir 1cm.

I. 6. 3. Abrasion des particules

Au cours de leur entrainement par l'écoulement, les matériaux transportés sont sujet à une usure intense du fait de leur frottement les uns contre les autres, qu'on appelle l'Abrasion. Et suis à cette usure, le diamètre des particules diminue. Cette diminution n'est autre qu'une perte de poids qu'on peut estimer par la formule de H. Sternberg ; ce dernier admet que cette perte de poids « dp » est proportionnelle au travail de la force de frottement (Figure 1.2), a son poids initial et à la distance parcourue.

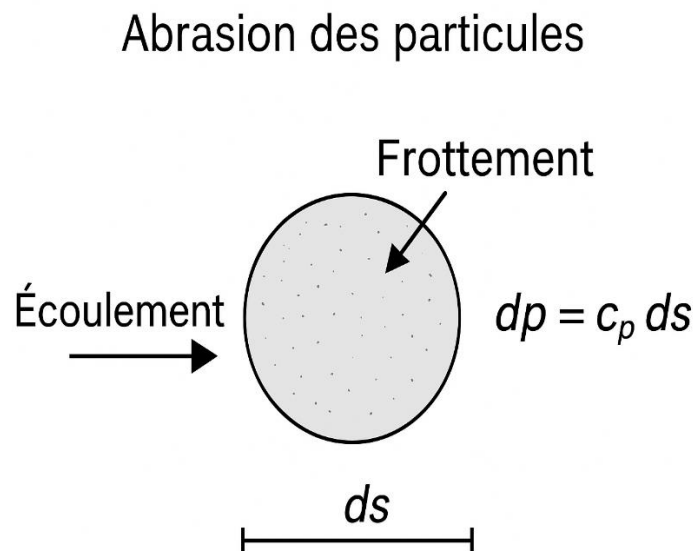


Figure 1.2. Schéma explicatif de l'Abrasion des particules.

Soit :

$$dp = c_p \cdot ds \quad (1.3)$$

Avec :

dp : perte de poids ;
 ds : longueur de la distance parcourue (m) ;
 p : poids de la particule en charriage (kg) ;
 C : coefficient de frottement qui dépend des caractéristiques minéralogiques des matériaux, il a été évalué expérimentalement : $0,8 < c < 0,05$ km.

I. 7. Transport proprement dit

L'érosion hydrique qu'elle soit pluviale ou fluviale s'accompagne d'une mobilisation des alluvions apportées par l'écoulement. En cas d'un couvert végétal clairseme ou totalement absent, le ruissellement des eaux de pluie et surtout à la suite d'averse torrentielle décape progressivement les horizons supérieurs du sol, jusqu'à atteindre parfois la roche mère le long du versant ; la lame d'eau déploie une force après sa concentration lui permettant d'arracher les obstacles (grains de sable, végétaux, etc...). Une fois détachée, la particule est mise en mouvement par le rejaillissement de la goutte de pluie sur la surface du sol et entraînée par l'écoulement le long de la pente (Meyer Peteret Muller 1975).

La faculté d'érosion augmente avec l'épaisseur de la lame d'eau ruisselée donc avec la forte intensité de pluie et le pourcentage des matériaux mobilisables qui finissent par atteindre le réseau hydrographique. La vitesse suffisante à l'arrachement est bien supérieure à la vitesse du transport car l'adhérence des matériaux est d'autant plus forte que ceux-ci sont plus fins, aussi des matériaux d'un calibre inférieur à 0.25 mm environ exigent-ils pour être enlevés un courant d'autant plus fort, qu'ils sont plus petits. Alors que, pour des matériaux grossiers, l'érosion par enlèvement se fait dès que la vitesse suffit au transport, pour les matériaux fins.

I. 8. Conclusions :

Les points entamés dans ce chapitre 1 sont :

- **Complexité des phénomènes de transport solide** : Ce chapitre illustre la diversité des modes de transport (suspension, charriage, saltation) dans les cours d'eau, dépendant de la morphologie fluviale, des conditions hydrométéorologiques et des caractéristiques granulométriques des matériaux (taille, forme, densité, vitesse de chute).
- **Interactions liquide-solide** : Les processus d'entraînement granulaires résultent d'interactions dynamiques entre l'écoulement liquide et les sédiments, influençant réciproquement la morphologie des lits et la capacité de transport, comme démontré par des études sur l'augmentation de la hauteur d'eau en présence de solides.
- **Impacts et enjeux pratiques** : La compréhension quantitative du transport solide est cruciale pour anticiper les conséquences sur les ouvrages hydrauliques (envasement des barrages, détérioration des turbines), la dégradation des terres agricoles et les risques torrentiels, nécessitant l'estimation des apports et capacités d'évacuation des sédiments.
- **Outils et classifications** : Des classifications comme celle de l'American Geophysical Union, ainsi que des formules empiriques (Stokes pour la vitesse de chute, Sternberg pour l'abrasion), fournissent des bases pour analyser les dimensions des particules et leur comportement, facilitant la modélisation des phénomènes d'érosion et de transport.
- **Perspectives pour la gestion durable** : Une approche intégrée, alliant observations de terrain, modélisations physiques et études sur les processus versants, est indispensable pour évaluer l'évolution morphologique des cours d'eau et promouvoir une gestion résiliente des ressources en eau face aux apports sédimentaires variables et aux crues intenses.

APPLICATIONS NUMERIQUES – CHAPITRE 1 : MODES DE TRANSPORT SOLIDE

Exercice 1 : Classification granulométrique

Un échantillon de sédiments d'un cours d'eau présente les dimensions moyennes suivantes :

- 0,5 μm
- 20 μm
- 0,5 mm
- 5 cm

☞ Classer ces particules selon la classification donnée (vase, silt, sable, gravier, galet, bloc).

Solution :

- 0,5 μm → Vase (0,24 à 4 μm)
- 20 μm → Silt (4 à 62 μm)
- 0,5 mm → Sable (62 μm à 2 mm)
- 5 cm (50 mm) → Gravier supérieur (charriage)

Exercice 2 : Vitesse de chute (formule de Stokes)

On considère une particule sphérique de sable de diamètre $d = 0,1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-4} \text{ m}$, de densité $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, dans de l'eau de densité $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ et de viscosité dynamique $\mu = 10^{-3} \text{ Pa.s}$.

☞ Calculer la vitesse de chute W selon la loi de Stokes :

$$W = ((\rho_s - \rho) g d^2) / (18 \mu)$$

Solution:

$$W = ((2650 - 1000) (9,81) (1 \times 10^{-4})^2) / (18 \times 10^{-3})$$
$$W \approx 0,009 \text{ m/s} = 0,9 \text{ cm/s}$$

Exercice 3 : Abrasion des particules

Une particule de gravier de poids initial $p = 0,5 \text{ kg}$ est transportée sur une distance $ds = 2 \text{ km}$. On suppose un coefficient de frottement $c = 0,05/\text{km}$.

☞ Estimer la perte de poids dp .

Solution :

$$dp = c \times p \times ds$$
$$dp = 0,05 \times 0,5 \times 2000 = 50 \text{ g}$$

Exercice 4 : Transport solide et morphologie

Explique qualitativement pourquoi une pente trop forte (>7%) favorise un transport solide important et peut modifier la morphologie d'un cours d'eau.

Solution :

Une pente forte augmente la vitesse d'écoulement, donc l'énergie cinétique. La capacité de charriage et de saltation devient plus grande, ce qui provoque l'élargissement du lit, la formation de ravines et une instabilité morphologique.

Exercice 5 : Nombre de Reynolds

Une particule de sable de diamètre $d = 0,2$ mm chute dans de l'eau à la vitesse $W = 1$ cm/s. Sachant que la viscosité cinématique de l'eau est $\nu = 1 \times 10^{-6}$ m²/s, calculer le nombre de Reynolds associé.

☞ Conclure si la formule de Stokes est applicable.

Solution :

$$Re = W \cdot d / \nu$$

$$Re = (0,01 \times 2 \times 10^{-4}) / 1 \times 10^{-6} = 2$$

Comme $Re < 5$, le régime est laminaire et la loi de Stokes reste valide.

Exercice 6 : Débit solide et crue

Un oued transporte en suspension une concentration moyenne de 50 g/L pendant une crue. Si le débit liquide est de 30 m³/s, estimer le débit solide (en kg/s).

Solution :

$$\begin{aligned} \text{Débit solide} &= \text{concentration} \times \text{débit liquide} \\ &= (50 \text{ g/L} \times 1000 \text{ L/m}^3) \times 30 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 50\,000 \text{ g/m}^3 \times 30 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 1500 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Exercice 7 : Vitesse critique d'arrachement

On estime que la vitesse critique nécessaire pour arracher un grain de sable de 0,5 mm est de 0,3 m/s. Explique pourquoi, paradoxalement, les particules très fines (<0,25 mm) nécessitent parfois une vitesse encore plus grande pour être arrachées.

Solution :

Les particules fines ont une forte cohésion (forces électrostatiques et capillarité) qui augmente leur résistance à l'arrachement. Ainsi, plus le matériau est fin, plus il faut une vitesse importante pour vaincre ces forces.

Exercice 8 : Effet morphologique

Lorsqu'un barrage retient une grande partie du transport solide, quelles sont les conséquences sur la morphologie du lit en aval ?

Solution :

Le déficit sédimentaire provoque une incision du lit (érosion accrue), une déstabilisation des berges et parfois un enfoncement du lit en aval. Cela peut entraîner une perturbation des écosystèmes et une modification de la morphologie fluviale.

Exercice 9 : Classification des particules selon leur mode de transport

En vous basant sur le tableau 1.1 du chapitre, classez les particules suivantes selon leur mode de transport principal et la zone concernée :

- a) Particule de 0,01 mm de diamètre.
- b) Particule de 5 mm de diamètre.
- c) Particule de 100 mm de diamètre.

Solution :

En se référant au tableau 1.1 :

a) 0,01 mm (10 μm) :

- **Désignation** : Silt.
- **Zone concernée** : Zone morte d'eau.
- **Mode de transport** : Suspension.

b) 5 mm :

- **Désignation** : Gravier.
- **Zone concernée** : Cours d'eau.
- **Mode de transport** : Charriage.

c) 100 mm :

- **Désignation** : Galets.
- **Zone concernée** : Plage, rivière à forte pente, torrents.
- **Mode de transport** : Charriage.

Exercice 10 : Analyse des impacts du transport solide

Expliquez brièvement comment le transport solide peut affecter la gestion des barrages. Proposez une mesure préventive pour réduire un de ces impacts.

Solution :

Le transport solide peut entraîner **l'engravement ou l'envasement des barrages**, réduisant leur capacité de stockage, et provoquer la **détérioration des installations hydrauliques** (pompes, vannes, turbines) due à l'abrasion par les particules transportées. **Mesure préventive** : Installer des bassins de sédimentation en amont du barrage pour piéger les sédiments en suspension et réduire leur arrivée dans le réservoir, prolongeant ainsi la durée de vie de l'ouvrage.

Exercice 11 : Abrasion des particules

Un grain de sable de 0.1 mm de diamètre a une densité de 2650 kg/m³, l'eau a une densité de 1000 kg/m³ et une viscosité cinématique de 1 × 10⁻⁶ m²/s. $A = 1/18$, $C_0 = 0.5$.

Question : Calculez la vitesse de chute W en m/s.

Solution : Utilisons $W^2 = \frac{A(P_0 - P)gD^2}{C_0P}$, avec $D = 0.1 \times 10^{-3}$ m, $g = 9.81$ m/s².

$$W^2 = \frac{\frac{1}{18}(2650 - 1000) \times 9.81 \times (0.1 \times 10^{-3})^2}{0.5 \times 1000}$$
$$W^2 = \frac{\frac{1}{18} \times 1650 \times 9.81 \times 10^{-8}}{500} = 1.79 \times 10^{-6}$$
$$W = \sqrt{1.79 \times 10^{-6}} \approx 0.00134 \text{ m/s} \approx 0.0134 \text{ cm/s}$$

Réponse : La vitesse de chute est d'environ 0.0134 cm/s.

Exercice 12 : Interaction liquide-solide et morphologie

D'après le chapitre 1, comment l'interaction entre le flux liquide et le flux solide influence-t-elle la morphologie d'un cours d'eau ? Donnez un exemple concret cité dans le chapitre.

Solution :

L'interaction entre le flux liquide et le flux solide modifie la morphologie du cours d'eau, car l'écoulement agit sur le lit (érosion, dépôt) et les sédiments influencent la dynamique de l'écoulement (hauteur d'eau, turbulence).

Exemple concret : Les chercheurs Smart et Jaeggi ont montré qu'à partir d'une pente de 7 %, pour un débit liquide fixe sur un lit affouillable, la hauteur d'eau est significativement supérieure en présence de particules solides, illustrant l'impact des sédiments sur l'écoulement.

Exercice 13 : Identification des modes de transport solide : À partir des descriptions suivantes, identifiez le mode de transport solide (suspension, charriage ou saltation) correspondant à chaque cas :

2. Des particules fines de limon restent en mouvement dans l'eau sans contact fréquent avec le lit du cours d'eau.
3. Des graviers roulent sur le fond d'une rivière sous l'effet des forces hydrodynamiques.
4. Des galets effectuent de petits sauts successifs à la surface du lit d'un torrent.

Solution

- a) **Suspension** : Les particules fines, comme le limon, sont maintenues dans le corps de l'écoulement par les fluctuations turbulentes, sans contact fréquent avec le lit.
- b) **Charriage** : Les graviers, plus gros, roulent ou glissent sur le fond sous l'action des forces hydrodynamiques.

c) **Saltation** : Les galets effectuent des sauts successifs à faible distance, caractéristique du transport par saltation.

Exercice 14 : Nombre de Reynolds

Pour le grain de l'exercice 2, calculez le nombre de Reynolds. Question : Quelle est la valeur de Re ?

Solution : $Re = \frac{W \cdot d}{\nu}$, avec $W = 0.00134$ m/s, $d = 0.1 \times 10^{-3}$ m, $\nu = 1 \times 10^{-6}$ m²/s.

$$Re = \frac{0.00134 \times 0.1 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-6}} = 0.134$$

Réponse : Le nombre de Reynolds est de 0.134.

Exercice 6 : Volume de sédiments en suspension

Contexte : Une crue transporte 80 g/L sur 3 m³/s pendant 2 heures. La densité des sédiments est 2500 kg/m³. Question : Calculez le volume de sédiments en m³.

Solution : Masse totale : $80 \times 3 \times 3600 = 864000$ g = 864 kg. Volume : $\frac{864}{2500} = 0.3456$ m³.

Réponse : Le volume est d'environ 0.346 m³.

Exercice 7 : Comparaison des vitesses de chute

Un grain de 0.01 mm a une vitesse de chute de 0.001 cm/s. Calculez la vitesse d'un grain de 0.02 mm (proportionnelle au carré du diamètre).

Question : Quelle est la vitesse en cm/s ?

Solution : $\frac{0.02}{0.01} = 2$, donc $2^2 = 4$ fois plus rapide. $0.001 \times 4 = 0.004$ cm/s.

Réponse : La vitesse est de **0.004 cm/s**.

Exercice 8 : Capacité de transport

Une rivière transporte 500 kg de sédiments sur 1000 m³ d'eau. Calculez la concentration en g/L.

Question : Quelle est la concentration ?

Solution : $\frac{500}{1000} = 0.5$ kg/m³ = 0.5 g/L.

Réponse : La concentration est de **0.5 g/L**.

CHAPITRE II

CHAPITRE II. TECHNIQUES DE MESURE DE LA CHARGE SOLIDE

2.1. Introduction :

La notion de débit solide s'applique à la mesure ou à l'estimation de la masse des matières solides traversant une section donnée d'un cours d'eau par unité de temps. Trois types de matériaux sont véhiculés par les cours d'eau : des matières en solution, des matières en suspension et des matériaux de fond. Ces matériaux obéissent à des lois de transport différentes.

On fera bien la distinction entre débit solide et charge : le débit solide correspond à un flux de matière au cours de l'unité de temps alors que la charge correspond à une teneur en matière. Ainsi, c'est sur la base de mesures de charge et de débit d'eau que le débit solide est calculé. Les solutés ne sont pas pris en compte dans les débits solides.

La charge de fond ou en matériaux de fond correspond aux matériaux résidant sur le fond du cours d'eau (sables, galets...) qui, à l'occasion de phénomènes hydrologiques importants (crue, chasse de barrage...), sont susceptibles d'être entraînés par les eaux. On parle aussi de " charriage de fond ". La " compétence " d'un cours d'eau est la masse qu'en un lieu donné une rivière est capable de transporter.

2. 2. La capacité de transport d'un cours d'eau :

Les sédiments qui atteignent le cours d'eau par l'intermédiaire du ruissellement vont être transportés par ce dernier s'il en est capable. On appelle capacité de transport d'un cours d'eau sa possibilité optimum de transport de sédiments ; cette possibilité est liée au débit liquide et à la vitesse du courant.

Si la capacité de transport est trop faible pour évacuer les produits de l'abrasion, une partie des matériaux va se déposer. Si la capacité de transport est suffisante, tous les sédiments fournis par l'abrasion seront transportés (Figure 2.1); l'eau conservera un reliquat d'énergie qu'elle pourra employer au creusement du lit et à l'érosion des berges. Signalons à ce sujet que dans certaines zones drainées par des cours d'eau à lits très érodables et où des travaux de conservation des sols ont été réalisés de façon particulièrement efficace, on a assisté à des reprises d'érosion du lit importantes ; de même qu'à l'aval de certains barrages où, la sédimentation dans la retenue étant importante, le cours d'eau se débarrasse de la majorité des charges solides, et sa capacité de transport est restituée intacte.

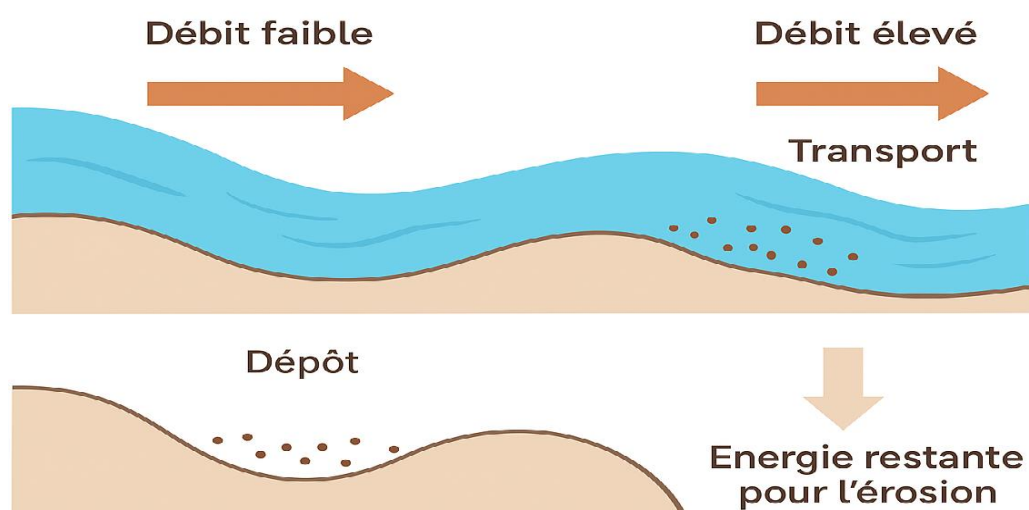


Figure 2.1. Capacité de transport dans un cours d'eau.

La capacité de transport solide est variable dans le temps et dans l'espace :

- Dans le temps, puisqu'elle est liée au débit liquide. Si une crue survient, la capacité de transport du cours d'eau augmente, les alluvions déposées en période d'étiage vont être reprises par la crue.
- Dans l'espace, puisqu'elle est liée aux vitesses de courant. Si, le long du parcours d'un cours d'eau, les vitesses se trouvent réduites, par un changement de pente par exemple, la capacité de transport va diminuer et les matériaux vont se déposer.

2. 3. Mesure de la charge solide « débit solide » :

Nous rappelons que le débit solide dans une section donnée Est le poids de matériaux en phase solide qui traverse la section pendant un intervalle de temps déterminé. En général, et suivant son importance, on l'exprime en kg ou en tonnes par seconde. Le débit solide d'un cours d'eau est constitué par deux modes de transport :

Le transport en suspension : concerne les particules fines qui sont maintenues en suspension sous l'effet de la turbulence des eaux (argiles, limons, sables fins).

Le transport par charriage, ou transport de fond : il affecte uniquement les matériaux grossiers (sables moyens ou grossiers, graviers, gros blocs).

Le charriage s'effectue :

Par saltation : sables moyens et grossiers, plus rarement graviers et galets. Les matériaux se déplacent par petits bonds successifs au-dessus du fond.

Par roulement sur le fond du lit : sables et cailloux. Par glissements en au fond : galets et gros blocs.

Nous indiquons ci-dessous la classification granulométrique des éléments la plus couramment utilisée :

- ✓ Blocs et galets 64 à 6.000 mm
- ✓ Graviers 2 à 64 mm
- ✓ Sables 62 à 2.000 μ
- ✓ Limons 4 à 62 μ
- ✓ Argiles 0,24 à 4 μ

Donc notre objectif est de quantifier le débit solide qui est la quantité de sédiment (particules, argiles, limons, sables, graviers, ...) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant une unité de temps (p. ex : 1 jour, 1 mois, 1 année).

L'observation systématique s'impose et peut fournir des renseignements importants sur la grandeur et la répartition du transport dans une section, ainsi que sur le rapport entre transport en suspension et transport en charriage.

La quantité de sédiments (flux solide, charge solide, débit solide) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant un temps Dt (Dt=1 jour, 1 mois, 1 année) est composé de la charge en suspension (suspended load) et du transport de fond (glissement ou roulement sur le fond et saltation). Différentes méthodes de mesures sont possibles :

- Collectes d'échantillons à hauteur d'une section de mesure pour suivre dans le temps les variations du transport solide, puis des mesures par filtration au laboratoire.
- Levers topographiques et bathymétriques de lacs ou de retenues artificielles pour évaluer l'apport global de sédiments pendant une période déterminée (entre deux instants connus).
- Utilisation de traceurs de sédiment ou d'éléments dont les signatures permettent d'étudier surtout les taux de sédimentation (exemple Pb²¹⁸, Cs¹³⁷).

2. 3.1. La mesure du transport en suspension

En pratique, on mesure une concentration en Matières En Suspension (MES) qui correspond à la quantité de matériaux en suspension recueillie à travers une membrane poreuse (la taille moyenne

des pores est en général de 0,2 μm). Elle s'exprime en milligrammes par litre d'eau brute. Une large gamme d'options est aujourd'hui disponible pour mesurer la quantité de sédiments en suspension transportée par un cours d'eau (Figure 2.2). La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation de la charge solide en suspension consiste à procéder, comme pour la mesure du débit liquide, à une intégration de différentes concentrations et des vitesses sur plusieurs verticales. Cette technique nécessite un matériel de prélèvement adapté aux caractéristiques de la section de mesure. Le contrôle en continu de la charge solide est possible grâce aux programmes d'échantillonnages intensifs avec des pompes automatiques ou, de manière indirecte, avec l'installation de turbidimètres.

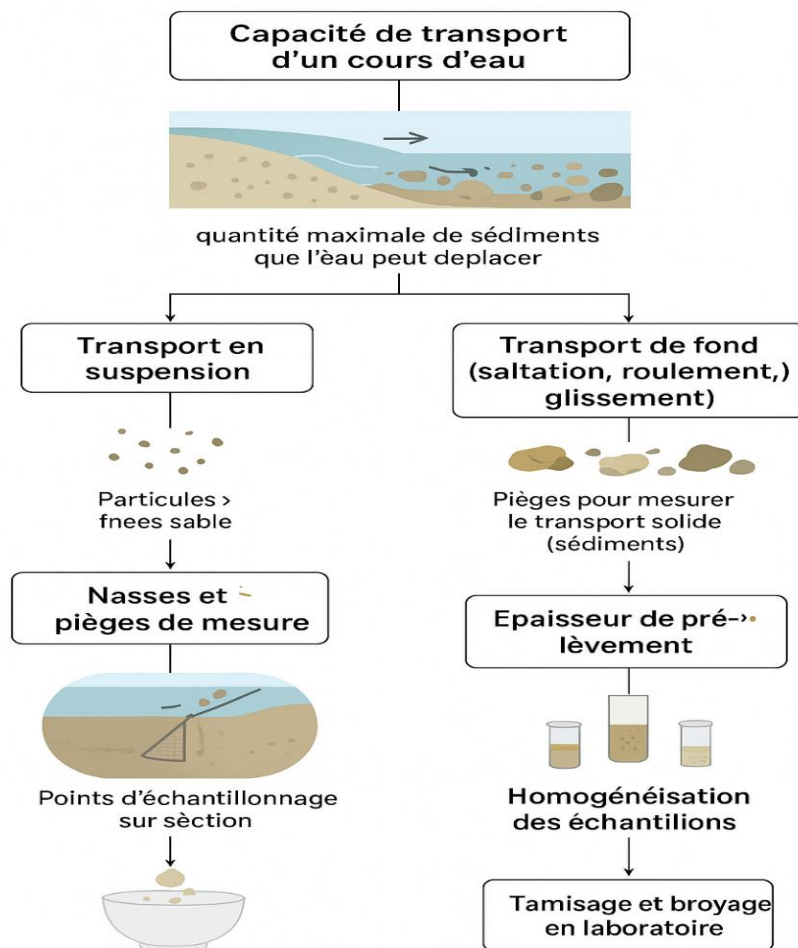


Figure 2. 2. Processus de mesure et analyse du transport des sédiments dans un cours d'eau.

2. 3.2. La mesure du transport de fond

Parmi les équipements de mesures actuellement disponibles on peut décrire très sommairement :

- **Les nasses** constituées d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension, mais retient les matériaux grossiers.
- **Les pièges** constitués de récipients très aplatis de section longitudinale triangulaire dont le bord correspondant au sommet du triangle est dirigé vers l'amont. A l'opposé dans la partie supérieure aval du récipient, une série de petites cloisons inclinées vers l'aval constitue le piège où viennent se prendre les matériaux (sable essentiellement).

- **Les sondeurs à ultrasons** permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faibles pentes.

Hors des parcelles et des petits bassins versants dont les exutoires peuvent être équipés de pièges ou de fosses à sédiments, la mesure du transport de fond reste imprécise. Les dispositifs communément utilisés perturbent en effet de manière non négligeable le régime du transport de fond.

Notons que, l'échantillonnage doit être effectué par des agents formés aux prélèvements de sédiments en équipe de 2 personnes minimum. Les gestionnaires des ouvrages se trouvant proches des points de prélèvements devront être prévenus avant la campagne d'échantillonnage. Les matériaux utilisés lors de chaque étape de l'échantillonnage et du prétraitement des sédiments (outil préleveur, contenants et cuillère pour homogénéisation, tamis, flaconnage, etc.) doivent être non contaminants vis à vis des substances à analyser. Le matériel doit être « propre » et rincé entre chaque utilisation avec l'eau du site ou avec de l'eau ultrapure.

2. 4. Méthodologie d'échantillonnage

2. 4.1. Fréquence et période d'échantillonnage : L'échantillonnage annuel doit être réalisé en fin d'été, c'est-à-dire à la fin de l'été (août-septembre) pour les cours d'eau à régime pluvial et à la fin de l'hiver (février-mars) pour les cours d'eau à régime nival. Cela permet de maximiser les chances d'obtenir des sédiments fins. Ne jamais prélever après une augmentation du débit, à partir de vitesses de l'ordre de 50 cm/s (les particules fines étant transportées voire érodées).

2 .4.2. Le site d'échantillonnage : Le site doit être localisé très précisément (coordonnées GPS) avant les tournées de prélèvement. L'accessibilité du site sur le long terme doit être vérifiée. Le site d'échantillonnage doit être situé assez loin d'un rejet de station d'épuration ou d'un affluent de rivière pour que le mélange soit effectif.

La localisation des sites d'échantillonnage de sédiments est basée sur celle des sites d'échantillonnage d'eau. La présence d'un pont ou la facilité d'accès pour des échantillonnages régulier d'eau ne permet pas nécessairement la présence de sédiments fins. Il est du ressort du préleveur, après accord préalable avec l'Agence de l'Eau, de choisir de déplacer le site d'échantillonnage afin de permettre le prélèvement de particules fines.

2 .4.3. Les points d'échantillonnage :

Afin d'obtenir un échantillon représentatif du site, on prélèvera plusieurs échantillons à chaque site. On recommande un minimum de trois points, et plus si cela est nécessaire afin d'obtenir un volume de sédiment suffisant pour l'analyse, ceci en particulier dans le cas de la présence d'une très faible couche de sédiment fin sur le site. Les points de prélèvement devront se situer sur un emplacement non perturbé par la présence du préleveur (en amont de celui-ci, et en un endroit non exploité pour un prélèvement précédent).

-Plans d'eau : prélever au point de plus grande profondeur (afin de prélever à l'endroit le plus représentatif du site là où les sédiments sont les moins perturbés). Une bathymétrie devra donc être réalisée au préalable. Prélever au moins 3 points différents, espacés d'un mètre ou deux environ, pour un même échantillon.

-Cours d'eau : prélever si possible au moins un point rive gauche, au moins un point au centre du chenal et au moins un point rive droite. S'assurer de prélever des sédiments qui ont toujours été immergés. Afin de recueillir le maximum de particules fines choisir les points qui privilégient :

Les zones de dépôt visibles (sédiments fins, vaso-organiques de couleur sombre, éviter les échantillons sableux), les zones concaves, les zones de végétation aquatique, les zones où la vitesse du courant est faible (<10 cm/s environ). Les points prélevés doivent présenter si possible des sédiments de même nature et en quantités équivalent

2. 4. 4. Epaisseur de la couche de sédiment prélevée

Avant tout prélèvement, il est important de définir clairement la zone et la méthode d'échantillonnage afin d'assurer la représentativité des échantillons et la comparabilité des résultats.

- Cours d'eau : une épaisseur de 5 cm maximum est prélevée.
- Plan d'eau : seuls les 2 à 3 premiers centimètres sont prélevés.

Cependant, cette épaisseur dépend de la fréquence d'échantillonnage (ici on considère les échantillonnages annuels) et du taux de sédimentation dans le cours d'eau ou le plan d'eau considéré. L'épaisseur prélevée, en accord entre le donneur d'ordre et le preleveur, peut donc être différente de celle préconisée ici tant qu'elle est justifiée et prédéfinie avant la tournée d'échantillonnage.

2. 4. 5. Homogénéisation des divers prélèvements en un unique échantillon

Dans le cas où un seul flacon est à remplir, les échantillons prélevés aux différents points sont versés directement dans le flacon au fur et à mesure, à l'aide d'une spatule qui doit être dans le matériel adéquat afin d'éviter la contamination de l'échantillon. Si le flacon est de taille suffisante pour contenir un échantillon considéré homogène (au moins 1 L), il n'y a pas d'homogénéisation à effectuer sur le terrain. En revanche, si le flacon fourni par le laboratoire est jugé trop petit pour contenir un échantillon considéré homogène, le sédiment doit être prélevé en quantité suffisante, versé dans un contenant non contaminant vis à vis des polluants à rechercher et mélangé à l'aide d'une spatule de matériau non contaminant également. Une fraction de ce sédiment mélangé est ensuite versée dans le flacon (500 ml au moins).

Dans le cas où plusieurs flacons d'un même matériau sont à remplir, il faut alors mélanger le sédiment prélevé en différents points dans un contenant non contaminant vis à vis des polluants à rechercher, avant de le distribuer dans les flacons destinés à l'analyse. Si des flacons de matériaux différents doivent être remplis, en verre teinté pour recueillir le sédiment destiné à l'analyse des composés organiques.

2. 5. Opérations a réalisé au laboratoire a réception des échantillons

Les échantillons doivent être pris en charge par le laboratoire dans les 24 heures suivant leur échantillonnage.

2. 5. 1. Homogénéisation :

Les prises d'essai destinées à l'analyse étant souvent faibles (de l'ordre du gramme, voire moins dans le cas des métaux), il est essentiel que le sédiment soumis à analyse soit suffisamment homogène afin d'obtenir un résultat représentatif de l'échantillon prélevé. Au laboratoire, l'étape d'homogénéisation est généralement couplée avec l'étape de tamisage et débrayage de l'échantillon.

2. 5. 2. Tamisage :

La pratique actuelle réalisée par les laboratoires c'est analysé des contaminants organiques et des métaux est la suivante :

- Tamisage sec <2 mm Dans ce cas, les résultats devront être normalisés par la mesure pour les composants organiques et par la granulométrie ou la concentration en aluminium (ou lithium) pour les métaux après minéralisation totale.
- Tamisage humide <63 µm en utilisant l'eau prélevée sur site. Il faut impérativement éviter les risques de contamination engendrés par cette étape. A notre connaissance, les laboratoires ne pratiquent pas ce type de tamisage, une formation devra être mise en place si ce tamisage humide <63 µm est imposé aux laboratoires (Figure 2.3).

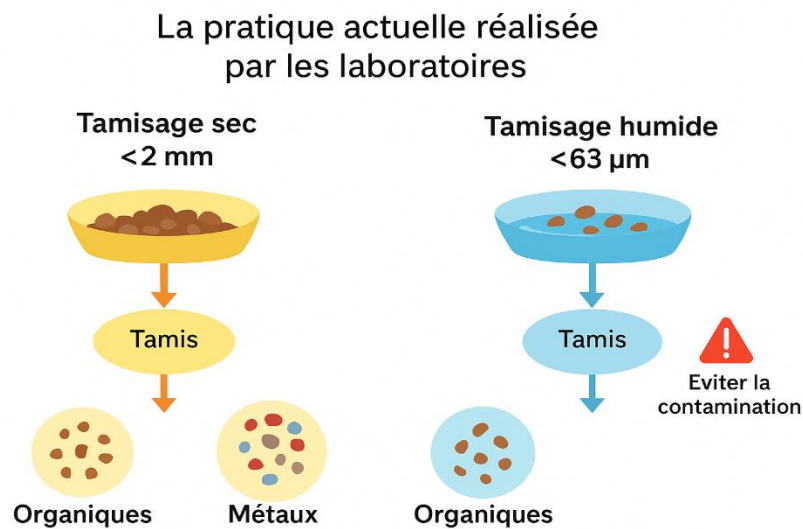


Figure 2.3. Procédures de tamisage en laboratoire pour l'analyse des contaminants organiques et métalliques

2. 5. 3. Broyage et séchage :

L'échantillon est séché selon les pratiques du laboratoire, les normes analytiques en vigueur et la nature des composés à analyser, soit à l'étuve à 40 °C, soit par lyophilisation. Le broyage de l'échantillon est ensuite réalisé à l'aide d'outils **non contaminants** vis-à-vis des polluants ciblés.

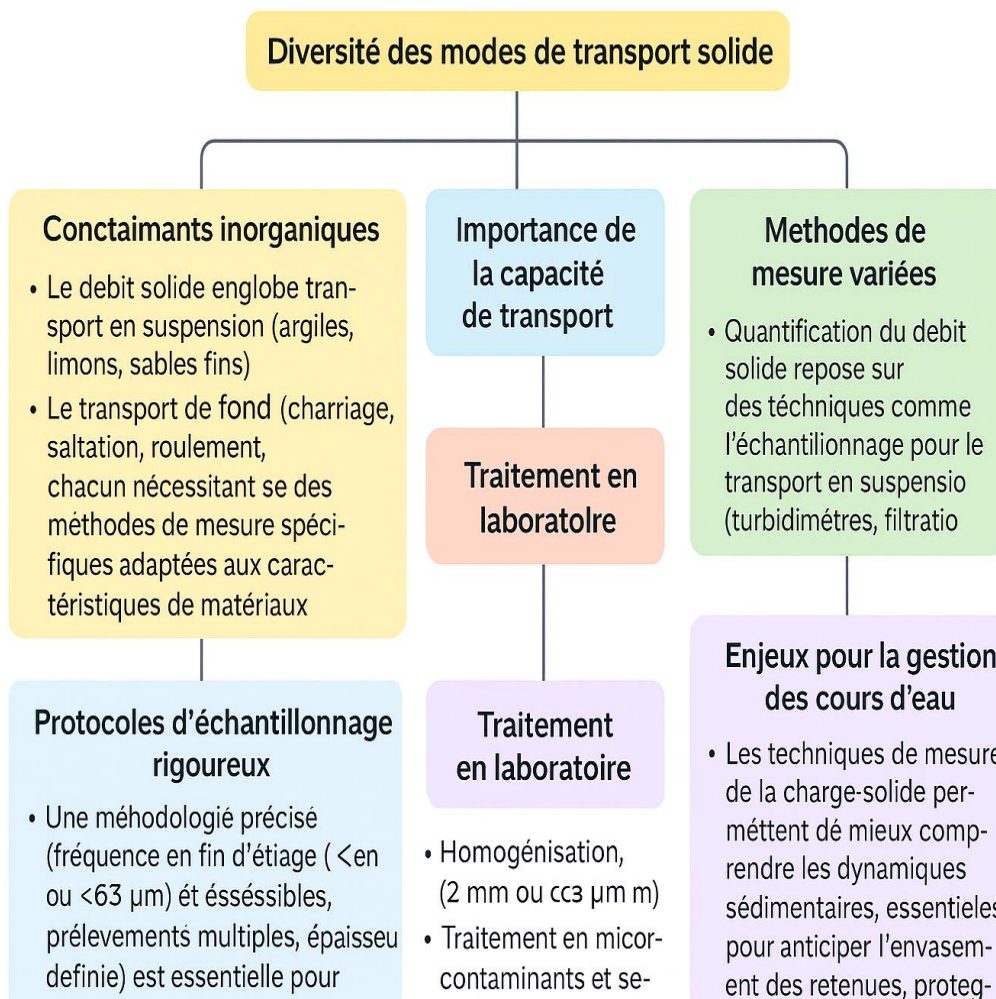
- **Contaminants inorganiques** : mortier en agate ou broyeur à billes avec bol et billes en agate.
- **Contaminants organiques** : mortier en agate, broyeur à billes en agate ou broyeur à couteau avec lames en acier inoxydable.

2. 6. Conclusions

- **Diversité des modes de transport solide** : Le débit solide englobe le transport en suspension (argiles, limons, sables fins) et le transport de fond (charriage, saltation, roulement, glissement), chacun nécessitant des méthodes de mesure spécifiques adaptées aux caractéristiques des matériaux (blocs, graviers, sables, limons, argiles).
- **Importance de la capacité de transport** : La capacité de transport d'un cours d'eau, liée au débit liquide et à la vitesse du courant, varie dans le temps (crues, étiage) et

dans l'espace (pente, morphologie), influençant les phénomènes de dépôt ou d'érosion, avec des impacts notables en aval des barrages ou dans les zones érodables.

- **Méthodes de mesure variées** : La quantification du débit solide repose sur des techniques comme l'échantillonnage pour le transport en suspension (turbidimètres, filtration), les pièges ou nasses pour le transport de fond, et les leviers bathymétriques pour évaluer les apports sédimentaires globaux, chacune présentant des défis liés à la précision et aux perturbations potentielles.
- **Protocoles d'échantillonnage rigoureux** : Une méthodologie précise (fréquence en fin d'étiage, choix de sites accessibles, prélèvements multiples, épaisseur définie) est essentielle pour garantir la représentativité des échantillons, en privilégiant les zones de dépôt de sédiments fins et en évitant les contaminations.
- **Traitement en laboratoire** : Les étapes d'homogénéisation, de tamisage (<2 mm ou <63 μm) et de broyage/séchage doivent être réalisées avec des matériaux non contaminants et selon des normes strictes pour assurer la fiabilité des analyses des contaminants organiques et inorganiques, avec une prise en charge rapide des échantillons (dans les 24 heures).
- **Enjeux pour la gestion des cours d'eau** : Les techniques de mesure de la charge solide permettent de mieux comprendre les dynamiques sédimentaires, essentielles pour anticiper l'envasement des retenues, protéger les infrastructures hydrauliques et gérer les risques d'érosion ou d'inondation, soulignant l'importance d'une approche intégrée et systématique.



APPLICATIONS NUMERIQUES – CHAPITRE II : TECHNIQUE DE MESURE DE LA CHARGE SOLIDE

Exercice 1 : Définitions 1. Quelle est la différence entre débit solide et charge solide ? -

Solution : Le débit solide est la masse de matière solide traversant une section par unité de temps, tandis que la charge solide représente la teneur en matière d'un échantillon. 2. Citez les trois types de matériaux transportés par un cours d'eau.

- **Solution :** Matières en solution, matières en suspension et matériaux de fond.

Exercice 2 : Classification granulométrique 1. Classez les éléments suivants selon leur granulométrie : argile, sables, graviers, blocs.

- **Solution :** Argile (0,24-4 μm), Sables (62-2000 μm), Graviers (2-64 mm), Blocs (64-6000 mm). 2. Quel est le mode de transport principal des particules fines et celui des matériaux grossiers ?

- **Solution :** Particules fines : transport en suspension ; Matériaux grossiers : transport de fond (charriage).

Exercice 3 : Calcul de charge solide Un cours d'eau transporte 500 kg de sédiments fins en suspension sur une période de 2 heures.

1. Exprimez le débit solide en kg/s.

- **Solution :** $500 \text{ kg} / (2 \times 3600 \text{ s}) = 0,0694 \text{ kg/s}$

2. Si la même section transporte également 200 kg de matériaux de fond en 2 heures, calculez le débit solide total.

- **Solution:** $\text{Total} = (500 + 200) \text{ kg} / (2 \times 3600 \text{ s}) = 0,0972 \text{ kg/s}$

Exercice 4 (Intermédiaire) : Capacité de transport 1. Expliquez comment la capacité de transport d'un cours d'eau varie dans le temps et dans l'espace. - **Solution :** Dans le temps, elle augmente pendant les crues et diminue en période d'étiage. Dans l'espace, elle varie selon la vitesse du courant et la pente. 2. Décrivez ce qui se passe lorsque la capacité de transport est inférieure à l'apport de sédiments.

- **Solution :** Les sédiments se déposent, formant des zones d'accumulation sur le fond du cours d'eau.

Exercice 5 (Avancé) : Méthodologie d'échantillonnage 1. Proposez un plan d'échantillonnage pour un cours d'eau de 50 m de largeur.

- **Solution :** Au moins 3 points : rive gauche, centre, rive droite. 2. Déterminez le nombre de points de prélèvement et leur répartition.

- **Solution :** Minimum 3 points, espacés pour couvrir la largeur du cours d'eau. 3. Expliquez comment vous homogénéiserez les échantillons prélevés.

- **Solution :** Mélanger les échantillons dans un contenant non contaminant, puis fractionner pour les analyses.

Exercice 6 (Complexe) : Analyse de données MES mesurées : 120 mg/L, 150 mg/L, 130 mg/l ; débit d'eau = 2 m³/s. 1. Calculez la concentration moyenne en MES.

- **Solution** : $(120 + 150 + 130) / 3 = 133,33$ mg/L 2. Estimez le débit solide en suspension en kg/s.

- **Solution**: $133,33 \text{ mg/L} \times 2 \text{ m}^3/\text{s} = 266,66 \text{ mg/s} = 0,2667 \text{ kg/s}$

Exercice 7 : Interprétation 1. Dans un plan d'eau, l'épaisseur des sédiments prélevés est de 4 cm alors que la recommandation est 2-3 cm. Quels impacts cette différence pourrait-elle avoir sur les résultats analytiques ?

- **Solution** : Cela peut entraîner une surestimation de la charge solide, car la couche plus épaisse inclut davantage de sédiments qui ne seraient pas représentatifs. 2. Discutez l'importance de choisir un site d'échantillonnage éloigné des rejets pour garantir la représentativité des sédiments.

- **Solution** : Les rejets peuvent modifier la composition et la concentration des sédiments, faussant les résultats. Un site éloigné assure une mesure représentative du transport naturel de sédiments.

Exercice 8 : Planification d'une campagne d'échantillonnage

Vous êtes chargé de planifier une campagne d'échantillonnage pour mesurer la charge solide dans un cours d'eau à régime pluvial. Déterminez :

- a) La période idéale pour effectuer les prélèvements selon le chapitre.
- b) Les critères de choix du site d'échantillonnage.
- c) Le nombre minimum de points de prélèvement et leur emplacement dans la section du cours d'eau.

Solution :

a) **Période idéale** : Selon le chapitre, l'échantillonnage doit être réalisé en fin d'étiage, c'est-à-dire en août-septembre pour un régime pluvial, afin de maximiser la présence de sédiments fins.

b) Critères de choix du site :

- Localisation précise avec coordonnées GPS.
- Accessibilité à long terme.
- Situé loin des rejets de stations d'épuration ou des confluences pour garantir un mélange homogène.
- Présence de sédiments fins (zones de dépôt, concaves, végétation aquatique, faible vitesse de courant <10 cm/s).

c) Points de prélèvement :

- Minimum de trois points : une rive gauche, un au centre du chenal, une rive droite.
- Privilégier les zones immergées avec sédiments fins (vaso-organiques, couleur sombre).

- Éviter les perturbations dues à la présence du préleveur (prélèvement en amont).
Résultat : Planifiez l'échantillonnage en août-septembre, choisissez un site accessible avec sédiments fins, et prélevez au moins trois points représentatifs (rive gauche, centre, rive droite).

Exercice 9 : Analyse des équipements de mesure du transport de fond

Décrivez trois équipements mentionnés dans le chapitre II pour mesurer le transport de fond et identifiez un défi associé à leur utilisation. Proposez une solution pour atténuer ce défi.

Solution :

Équipements de mesure du transport de fond :

1. **Nasses** : Poches de grillage sur cadre métallique retenant les matériaux grossiers (sables, graviers) tout en laissant passer les matières en suspension.
2. **Pièges** : Récipients aplatis de section triangulaire avec cloisons inclinées pour capturer les sédiments (principalement sable).
3. **Sondeurs à ultrasons** : Suivent le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faible pente.

Défi : Les dispositifs comme les nasses et les pièges perturbent le régime du transport de fond, rendant les mesures imprécises.

Solution : Calibrer les équipements en effectuant des mesures préliminaires dans des conditions contrôlées (laboratoire ou site expérimental) pour quantifier leur impact sur l'écoulement et ajuster les résultats en conséquence.

Exercice 10 : Protocole de traitement des échantillons au laboratoire

Un échantillon de sédiments prélevé dans un cours d'eau doit être analysé pour des contaminants organiques et inorganiques. Décrivez les étapes de traitement au laboratoire (homogénéisation, tamisage, séchage, broyage) en précisant les précautions à prendre pour éviter la contamination.

Solution

Étapes de traitement :

1. **Homogénéisation** : Mélanger l'échantillon pour assurer la représentativité, en utilisant une spatule non contaminante (par exemple, en acier inoxydable ou agate). Effectuer cette étape immédiatement après réception (dans les 24 heures).
2. **Tamisage** :
 - Pour contaminants organiques : Tamisage sec à <math>< 2\text{ mm}</math>, normalisé par la mesure des composants organiques.
 - Pour contaminants inorganiques : Tamisage humide à <math>< 63\ \mu\text{m}</math> avec l'eau du site pour éviter la contamination.
 - Précaution : Utiliser des tamis propres, rincés avec de l'eau ultrapure entre chaque usage.
3. **Séchage** : Sécher l'échantillon à 40°C (étuve) ou par lyophilisation, selon les normes analytiques et la nature des composés.
4. **Broyage** :

- Contaminants inorganiques : Utiliser un mortier ou un broyeur à billes en agate.
- Contaminants organiques : Utiliser un mortier en agate ou un broyeur à couteaux en acier inoxydable.
- Précaution : Les outils doivent être non contaminants vis-à-vis des polluants ciblés et rincés entre chaque échantillon.

Précautions générales :

- Utiliser des contenants non contaminants (verre teinté pour composés organiques).
 - Effectuer un rinçage systématique des équipements avec l'eau du site ou de l'eau ultrapure.
 - Former le personnel pour respecter les protocoles anti-contamination.
- Résultat** : Un protocole rigoureux avec outils non contaminants et rinçage systématique garantit des analyses fiables pour les contaminants organiques et inorganiques.

Exercice 11 : Quantification des sédiments fins collectés

Lors d'un échantillonnage dans un cours d'eau, 2 L d'eau sont prélevés à une section où la concentration de matières en suspension (MES) est de 250 mg/L. Après filtration à travers une membrane de 0,2 µm, calculez la masse des sédiments fins collectés (en grammes). Si le laboratoire effectue un tamisage humide à <63 µm et estime que 80 % de MES sont des particules de taille inférieure à 63 µm, quelle est la masse des sédiments fins tamisés ?

Solution :

1. **Masse totale des sédiments collectés :**
 - Concentration : ($C = 250 \text{ mg/L}$).
 - Volume d'eau : ($V = 2 \text{ L}$).
 - Masse totale: ($M = C \times V = 250 \times 2 = 500 \text{ mg} = 0,5 \text{ g}$).
2. **Masse des sédiments fins (<63 µm) :**
 - Proportion des particules <63 µm : $80 \% = 0,8$.
 - Masse tamisée : ($M_{\text{fines}} = 0,8 \times 0,5 = 0,4 \text{ g}$).

Résultat : La masse totale des sédiments collectés est de **0,5 g**, dont **0,4 g** pour les particules fines tamisées (<63 µm).

CHAPITRE III

CHAPITRE III. FORMULES DE TRANSPORT ET QUANTIFICATION DES APPORTS SOLIDES (COURS D'EAU JAUGE ET NON JAUGE)

3.1. Introduction

Plusieurs dizaines de formules ont été proposées pour prédire soit le charriage seul, soit le charriage et la suspension. La plupart d'entre elles ont été établies pour estimer le transport solide moyen, cependant, depuis quelques années, plusieurs auteurs ont cherché à établir des formules donnant le transport solide fractionné, c'est-à-dire les valeurs de transport associées à chaque diamètre en présence. Ce type de formule est très compliqué à utiliser, et surtout, nécessite une analyse très fine de la granulométrie (avec distinction en général des sédiments de surface et de subsurface), généralement non disponible. C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous nous sommes limités à l'utilisation des formules donnant le débit solide moyen. Nous allons parler de 15 formules sélectionnées à partir de leur intérêt « historique » ou « local » : Meyer-Peter et Müller (1948), Einstein-Brown (1950), Schoklitsch (1962), Engelund et Hansen (1967), Ackers-White (1973), Mizuyama (1977), Bagnold (1980), Parker et al. (1982), Smart et Jaeggi (1983), Yang (1984), Rickenmann (1991), Sogreah [1991], Van Rijn (1984), Recking (2006), Lefort (2007).

3. 2. Principes de la modélisation et paramètres adimensionnels

Pour modéliser le transport solide on ne dispose en général que d'un nombre limité d'informations. Trois paramètres doivent au minimum être connus (Figure 3.1). Le débit (Q), la pente du lit (S) et le diamètre caractéristique (D) du mélange sédimentaire. A partir de la connaissance de ces paramètres la plupart des approches proposent au préalable un calcul de la contrainte grâce à une loi de frottement (force exercée par le fluide sur les grains), puis un calcul du flux généré par cette contrainte (τ) à partir d'une loi de transport adaptée (soit deux équations nécessaires). Une seconde approche consiste à calculer directement le débit solide à partir de Q , S et D (une seule équation nécessaire).

$$\tau = \rho g R S \quad (3. 1)$$

D'ou

τ :	Contrainte hydraulique sur le lit	Pa (N/m ²)
ρ :	Masse volumique de l'eau	kg/m ³
g :	Accélération gravitationnelle	m/s ²
R :	Rayon hydraulique \approx profondeur du lit mineur	m
S :	Pente de la rivière	Adimensionnel

Notons que pour un débit solide :

- ✓ Q_s sortant = Q_s entrant : Equilibre
- ✓ Q_s sortant < Q_s entrant : Dépôt
- ✓ Q_s sortant > Q_s entrant : Erosion

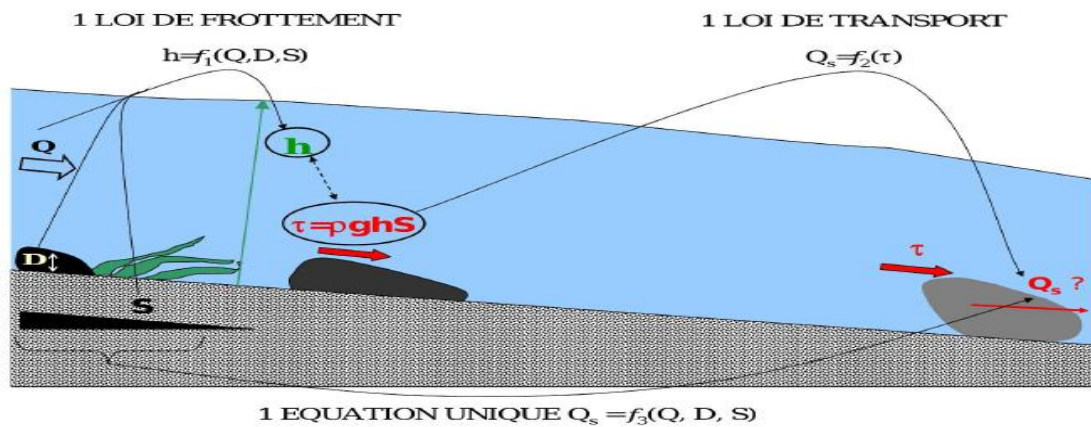


Figure 3. 1. Etapes de la modélisation du transport solide (avec ou sans calcul de la contrainte).

Beaucoup de formules utilisent des grandeurs adimensionnelles, afin de permettre leur utilisation dans des configurations autres que celles qui ont prévalu lors de leur établissement (par exemple la géométrie du canal d'écoulement). Les deux principales grandeurs utilisées sont le nombre de Shields et le paramètre d'Einstein.

[Shields, 1936] a proposé d'adimensionnaliser les forces motrices (contrainte hydraulique τ exercée x la surface du lit) par les forces stabilisatrices (poids de la particule). Le nombre obtenu est appelé « nombre de Shields », noté τ^* ou θ :

$$\theta = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D} = \frac{R}{D} \frac{S}{(s-1)} \quad (3.2)$$

θ : Nombre de Shields (adimensionnel)

ρ_s : Masse volumique des sédiments (kg/m³)

d : Diamètre caractéristique du grain (m)

Un grain est mis en mouvement lorsque $\theta > \theta_c$, où θ_c c'est le seuil critique. Pour les sables et graviers : $\theta_c \approx 0.047 - 0.062$.

Notons que :

Charriage sur lit plat $0.047 \leq \theta \leq 0.062$

Charriage par dunes $\theta \approx 0.025$

Suspension $\theta > 0.25$

Shields a également déduit de ses expériences que les grains posés au fond du lit étaient mis en mouvement lorsque ce nombre adimensionnel dépassait une valeur critique θ_c égale à 0.06.

[Einstein, 1950] a quant à lui proposé d'adimensionnaliser le transport solide de la manière suivante :

$$\Phi = \frac{q_v}{\sqrt{g(s-1)D^3}} \quad (3.3)$$

Où q_v est le débit solide volumique spécifique ($m^3/s/m$) et $s = \rho_s/\rho$ est la densité relative.

3. 3. Les modèles en débit

Etant donné la difficulté liée au calcul de la contrainte, plusieurs auteurs ont recherché une relation empirique donnant directement le débit solide Q_s en fonction du débit liquide total Q ou spécifique $q=Q/L$. Ces formules sont très simples à utiliser et ne nécessitent aucune itération.

Tableau 2. 2 : Principales caractéristiques des formules de transport utilisant le débit

Formule	Données nécessaires	Conditions expérimentales et domaine de validité
Meyer-Peter et Müller, 1948	$q_b, \tau^*, \tau_{c^*}, s, g, d$	Charriage, sédiments uniformes (sable grossier à gravier), rivières
Einstein-Brown, 1950	$q_b^*, K, d^*, s, g, d, v$	Approche probabiliste, lits sableux, transport en couche mince
Schoklitsch, 1962	Q, D_{40}, S, L	Ajustement de données de laboratoire et terrain. $S < 1\%$, D_{40} référé à la granulométrie de subsurface
Engelund et Hansen, 1967	$q_t, \Phi, \theta, f, s, g, d$	Transport total, sables uniformes, flumes et rivières
Ackers-White, 1973	$C, C_0, F_{gr}, A, m, d^*$	Transport total, sédiments fins à grossiers, $Fr < 0.8$
Mizuyama, 1977	$\tau_{c^*}, \tau_{c_0^*}, \theta, \phi$	Incipient motion, pentes raides ($>10-20\%$)
Bagnold, 1980	$q_b, eb, \omega, \tau, \tau_c, \alpha$	Puissance du courant, charriage en lits graveleux
Parker et al., 1982	$q_{bi}, Wi^*, \Phi_i, s, g, d_i, \tau_i^*, \tau_{ri}^*$	Mélanges granulométriques (gravier-sable), données de terrain
Smart et Jaeggi, 1983	q_b, s, S, q, q_c, d	Charriage, canaux raides ($S > 3-20\%$), gros sédiments
Yang, 1984	$C, w, d, v, u^*, u, S, u_{cr}$	Gravier (2-10 mm), séparation sable/gravier
Rickenmann, 1991	Q, D_{30}, D_{90}, S, L	Flux hyperconcentrés, pentes raides, laboratoire. $0.0004 < S < 0.2$, $0.4 < D < 10$ mm
Van Rijn, 1984	$q_b, q_s, \rho_s, U_e, h, d_{50}, Me, U, D^*$	Sédiments uniformes, ondes/courants
Recking, 2006	q_b, τ^*, τ_{c^*}	Tri granulométrique, rivières à gravier, phases partiel/total
Lefort, 2007	Q, D_m, S, L	Transport par charriage + suspension, ajustement données laboratoire et terrain, $0.1 < D < 55$ mm, $S < 20\%$
Sogreah, 1991	$Q, D_{30}, D_{50}, D_{90}, S, L$	Transport total, rivières françaises, données empiriques

3.4. Les formules mettant en œuvre la contrainte

Beaucoup de travaux ont cherché à mettre en relation Φ et θ . La plupart des formules produites sont basées sur un excès de contrainte ($\theta - \theta_c$) plutôt que sur la contrainte seule, en faisant l'hypothèse que le transport solide est un phénomène à seuil, comme l'avait suggéré Shields. Nous avons choisi d'utiliser les formules présentées ci-dessous (Tableau 1).

Une des grandes difficultés à utiliser ce type de formule, est qu'il faut en préalable calculer des paramètres intermédiaires, et en particulier la contrainte, ce qui nécessite de connaître le rayon hydraulique R . Le rayon hydraulique (ou la hauteur d'eau) associé à un écoulement résulte de la résistance que le lit oppose à cet écoulement, pour un débit et une pente donnée. On comprendra aisément que, toutes choses étant égales par ailleurs, un lit localement entravé par un obstacle (embâcle...) produira une hauteur d'eau supérieure au même lit non obstruer. Donc si une telle mesure est utilisée pour calculer la contrainte qui s'exerce sur le fond du lit, cela conduira inévitablement à une surestimation de cette dernière, et donc du débit solide transporté.

3.4.1. Ackers et White [1973] :

L'expression de sa formule est comme suit :

$$C = C_0 \left(\frac{F_{gr} - A}{A} \right)^m \quad (3.4)$$

Description : Transport total, sédiments fins à grossiers.

C : concentration de sédiments [kg/m^3]; C_0 : coefficient empirique [kg/m^3]; F_{gr} : paramètre de transport [adimensionnel]; A, m : paramètres empiriques [adimensionnel]

Notons que, cette formule s'applique pour $F_{gr} < 0.8$, c'est à dire plutôt pour des rivières de plaine.

3.4.2. Bagnold [1980] :

L'expression de sa formule est comme suit :

$$q_b = e_b \omega \frac{\tau - \tau_c}{\tan \alpha} \quad (3.5)$$

Description : Puissance du courant, charriage en gravier

q_b : débit solide [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]; e_b : coefficient empirique [adimensionnel]; ω : puissance hydraulique [W/m^2]; τ : contrainte hydraulique [Pa]; τ_c : contrainte critique [Pa]; α : angle de frottement [rad].

3.4.3. Einstein Brown [1950] :

La formule proposée par Brown est comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Pour } K \geq 40: q_b^* &= 0.182K^{3/2} \\ \text{Pour } K < 40: q_b^* &= J. 465e^{-0.391K} K^{3/2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Description : Approche probabiliste, lits sableux

q_b : débit solide volumique [$m^3/s/m$]; K : paramètre adimensionnel lié au grain et à la viscosité [adimensionnel]; d^* : diamètre réduit [adimensionnel]; s : densité relative [adimensionnel]; g : gravité [m/s^2]; d : diamètre du grain [m]; ν : viscosité cinématique [m^2/s].

3. 4. 4. Engelund et Hansen [1967] :

Equation déduite du concept de puissance de l'écoulement de Bagnold [1966] et du principe de similarité :

$$\Phi = \frac{0.1\theta^{5/2}}{f}, \quad \Phi = \frac{q_t}{\sqrt{(s-1)gd^3}}, \quad \theta = \tau^* \quad (3. 7)$$

- Description : Transport total, sables uniformes

Φ : débit solide adimensionné [adimensionnel]; θ : nombre de Shields [adimensionnel]; f : facteur de rugosité [adimensionnel]; q_t : débit solide volumique [$m^3/s/m$]; s : densité relative [adimensionnel]; d : diamètre du grain [m]. Le facteur de rugosité f étant défini par $f = 2gRS/U^2$.

3. 4. 5. Lefort [2007] :

Lefort [2007] propose un modèle par analogie avec ce qui est conçu en milieu hydraulique au plan de diffusion de la mesure de débit pour estimer des charriages de sol ou de sable-gravier. Soit sa formule proposée :

$$q_b = k(\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (3. 8)$$

Description : Charriage moyen, sable-gravier

q_b : débit solide [$m^3/s/m$]; k : coefficient empirique [adimensionnel]; τ : contrainte hydraulique [Pa]; τ_c : contrainte critique [Pa].

3. 4. 6. Meyer-Peter et Mueller [1948] :

Meyer-Peter et Müller [1948] ont proposé une formule classique pour le débit solide charrié de grossiers en lit mobile, ci-dessous dans leur formule proposée :

$$q_b^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}, \quad \tau_c = 0.047, \quad q_b^* = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (3. 9)$$

Description : Charriage, sédiments uniformes (sable grossier à gravier)

q_b : débit solide volumique [$m^3/s/m$]; s : densité relative des sédiments [adimensionnel]; g : gravité [m/s^2]; d : diamètre de grain [m]; τ^* : contrainte adimensionnelle [adimensionnel]; τ_c^* : contrainte critique adimensionnelle [adimensionnel].

3. 4. 7. Schoklitsch [1962] :

Schoklitsch [1962] a proposé une relation empirique pour quantifier le transport solide en fonction de la contrainte hydraulique. Soit sa formule proposée :

$$q_b = 2.5sS^{1.5}(q - q_c), \quad q_c = 0.26(s-1)^{5/3}d^{3/2}/S^{7/3} \quad (3. 10)$$

q_b : débit solide [m^3/s]; s : densité relative [adimensionnel]; S : pente du lit [adimensionnel];
 q : débit liquide [m^3/s]; q_c : débit critique [m^3/s]; d : diamètre du grain [m].

Description : Charriage, rivières à gravier, pentes fortes.

3. 4. 8. Yang [1984]

Yang [1984] a proposé une formule empirique pour estimer le débit solide en fonction de la contrainte hydraulique et de la granulométrie. Soit sa formule proposée :

$$\log C = 6.681 - 0.633 \log \left(\frac{wd}{\nu} \right) - 4.816 \log \left(\frac{u_*}{w} \right) \quad (3. 11)$$

$$+ \left[2.784 - 0.305 \log \left(\frac{wd}{\nu} \right) - 0.282 \log \left(\frac{u_*}{w} \right) \right] \log \left(\frac{uS}{w} - \frac{u_{cr}S}{w} \right)$$

C : concentration de sédiments [kg/m^3]; w : vitesse d'onde [m/s]; d : diamètre de grain [m];
 ν : viscosité cinématique [m^2/s]; u_* : vitesse de frottement [m/s]; S : pente du lit [adimensionnel]; u_{cr} : vitesse critique [m/s].

Description : Gravier (2-10 mm).

3. 4. 9. Rickenmann [1991]

Rickenmann [1991] a proposé une relation empirique pour estimer le transport solide de matériaux grossiers en fonction de la contrainte hydraulique. Soit sa formule proposée :

$$q_b = \alpha (qS - q_c S_c) \quad (3. 12)$$

q_b : débit solide [m^3/s]; q : débit liquide [m^3/s]; S : pente du lit [adimensionnel]; q_c : débit critique [m^3/s]; S_c : pente critique [adimensionnel].

Description : Flux hyper-concentrés, pentes raides

3. 4. 10. Van Rijn [1984] :

Van Rijn [1984] a proposé une formule empirique pour estimer le transport solide des sables en lit mobile. Soit sa formule proposée :

$$q_b = 0.015 \rho_s U_e h \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2} M_e^{1.5} \quad (3. 13)$$

Suspension:

$$q_s = 0.008 \rho_s U d_{50} M_e^{2.4} D^{*-0.6} \quad (3. 14)$$

q_b, q_s : débit solide [$m^3/s/m$]; ρ_s : densité des sédiments [kg/m^3]; U_e, U : vitesse du courant [m/s]; h : hauteur d'eau [m]; d_{50} : diamètre médian [m]; M_e : paramètre empirique [adimensionnel]; D^* : diamètre réduit [adimensionnel].

Description : Sédiments uniformes, ondes/courants.

3. 4. 11. Recking [2006]

Recking [2006] a proposé une relation empirique pour estimer le transport solide des sédiments grossiers en torrent :

$$q_b = \alpha (\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} D_{84}^{0.5} \quad (3.15)$$

q_b : débit solide [$m^3/s/m$]; τ^* : contrainte adimensionnelle [adimensionnel]; τ_c^* : contrainte critique adimensionnelle [adimensionnel]. D_{84} : diamètre du 84ème percentile des grains [m].

Description : Tri granulométrique, rivières à gravier.

3. 4. 12. Parker et al. [1982]

Parker et al. [1982] ont proposé une formule pour estimer le transport solide en lit mobile, prenant en compte la granulométrie et la contrainte hydraulique :

$$q_{b,i} = W_i^* \Phi_i \sqrt{(s-1)gd_i^3}, \quad \Phi_i = 11.2 \left(\frac{\tau_i^*}{\tau_{ri}^*} \right)^{4.5} \quad (3.16)$$

q_{bi} : débit solide pour fraction i [m^3/s]; W_i^* : coefficient de fraction [adimensionnel]; Φ_i : paramètre de transport [adimensionnel]; s : densité relative [adimensionnel]; g : gravité [m/s^2]; d_i : diamètre de grain de fraction i [m]. τ_i^* : la contrainte de cisaillement adimensionnée (Shields) agissant sur la fraction i . Elle représente la contrainte réelle normalisée par le poids et la taille de la particule. La contrainte critique de Shields pour la fraction i . C'est la valeur de la contrainte adimensionnée à partir de laquelle les particules de taille (d_i) commencent à se déplacer (mouvement initial).

Description : Mélanges granulométriques.

3. 4. 13. Mizuyama [1977]

Mizuyama [1977] a proposé une relation empirique pour estimer le transport solide des sédiments en fonction de la contrainte hydraulique et de la granulométrie :

$$\tau_c^* = \tau_{c0}^* \cos\theta \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \quad (3.17)$$

τ_c^* : contrainte critique adimensionnelle [adimensionnel]; τ_{c0}^* : contrainte critique initiale [adimensionnel]; θ : pente locale [rad]; ϕ : angle de frottement des sédiments [rad].

Description : Incipient motion, pentes raides.

3. 4. 14. Sogreah [1991]

La formule de Sogreah (1991) est en réalité une approximation de la formule d'Engelund-Hansen adaptée aux rivières françaises. Elle exprime le transport total de sédiments (charriage + suspension) de manière adimensionnelle.

On peut l'écrire de la façon suivante :

$$q_s = \Phi \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (3.18)$$

Avec:

$$\Phi \approx 0.1 \frac{g^{5/2}}{f}$$

q_s : transport total (m³/s par m de largeur), Φ : débit de sédiments adimensionné, $s = \rho_s/\rho$: densité relative du sédiment, g : accélération gravitationnelle, d_{50} : diamètre médian des sédiments, and f : coefficient de frottement du lit (ex. Darcy-Weisbach).

3. 4. 15. Lefort [2007]

Lefort [2007] propose également une relation empirique adaptée pour le transport solide des sédiments grossiers :

$$q_b = k(\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (3. 19)$$

q_b : débit solide [m³/s/m]; k : coefficient empirique [adimensionnel]; τ : contrainte hydraulique [Pa]; τ_c : contrainte critique [Pa].

Description : Charriage moyen, sable-gravier

3. 4. 16. Zhang et al. [2011]

Une formule notable proposée en 2011 pour estimer la capacité de transport solide en écoulement de surface est celle de Zhang et al. (2011). Elle est particulièrement adaptée aux écoulements peu profonds, tels que ceux rencontrés dans les zones agricoles ou les bassins versants peu encaissés.

$$q_b = \alpha \cdot \left(\frac{S}{L}\right)^\beta \cdot \left(\frac{D}{\tau}\right)^\gamma \quad (3. 20)$$

q_b : débit solide par unité de largeur de lit [m³/s/m], S : pente du lit [m/m], L : longueur de pente [m], D : diamètre moyen des particules [m], τ : contrainte de cisaillement [Pa], α, β, γ : coefficients empiriques ajustés selon les conditions locales

3. 4. 17. Formule de Li et al. [2022]

Cette formule est basée sur le modèle de puissance spécifique de Bagnold, adaptée pour les écoulements de surface avec impact de la pluie. Elle est calibrée à partir de données expérimentales et est utilisée pour estimer la capacité de transport solide dans des conditions de pluie.

$$T_c = \left(\frac{P}{\tau_c}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{S}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3. 21)$$

Où :

T_c : capacité de transport solide [kg/m²/s], P : puissance unitaire du courant [W/m]

τ_c : contrainte critique de cisaillement [Pa], S : pente du lit [m/m], L : longueur de pente [m]

3. 4. 18. Formule d'Okeu et al. (2017)

Cette formule a été développée en utilisant une approche de régression polynomiale (Polynomial Best Subset Regression - PBSR) sur un large ensemble de données expérimentales. Elle est conçue pour être plus précise et avoir moins de contraintes d'application que les formules traditionnelles, en particulier dans les environnements fluviaux variés.

(3. 22)

$$q_s = \alpha \cdot U^m \cdot S^n \cdot H^p \cdot d_{50}^q \cdot G_s^r$$

Où :

- q_s : débit solide total par unité de largeur de lit [kg/s/m]
- U : vitesse de l'eau [m/s]
- S : pente du lit [m/m]
- H : profondeur de l'écoulement [m]
- d_{50} : diamètre médian des particules [m]
- G_s : densité spécifique des sédiments (sans dimension)
- α, m, n, p, q, r : Adimensional coefficients

3.5. Conclusions

Les formules de transport et la quantification des apports solides dans ont des objectives :

- **Diversité des approches de modélisation** : Le chapitre présente une quinzaine de formules de transport solide (Meyer-Peter et Müller, Einstein-Brown, Ackers-White, etc.), certaines axées sur le charriage, d'autres sur le transport total, avec des approches basées sur la contrainte hydraulique ou directement sur le débit, adaptées à des contextes variés (rivières, torrents, pentes raides).
- **Importance des paramètres clés** : La modélisation repose sur des paramètres fondamentaux comme le débit liquide (Q), la pente du lit (S), et le diamètre caractéristique (D), souvent adimensionnalisés via le nombre de Shields (θ) ou le paramètre d'Einstein pour généraliser les formules à différentes géométries et conditions d'écoulement.
- **Rôle des contraintes hydrauliques** : Les formules basées sur la contrainte (τ) intègrent l'excès de contrainte ($\theta - \theta_c$) pour décrire le seuil de mise en mouvement des sédiments, mais leur précision dépend de la connaissance du rayon hydraulique (R), sensible aux obstacles dans le lit, pouvant entraîner des surestimations du débit solide.
- **Limites des formules fractionnées** : Les formules de transport fractionné, tenant compte de la granulométrie détaillée, sont complexes et exigent des données granulométriques précises (surface et subsurface), rendant les formules de débit solide moyen plus pratiques pour la plupart des applications.
- **Applications pratiques et défis** : Ces formules permettent d'évaluer l'équilibre sédimentaire (érosion, dépôt, équilibre) dans des cours d'eau jaugés ou non jaugés, mais leur application nécessite une calibration rigoureuse et une compréhension des conditions expérimentales (pente, type de sédiments, débit) pour garantir leur validité et minimiser les erreurs.

APPLICATIONS NUMERIQUES – CHAPITRE III : FORMULES DE TRANSPORT ET QUANTIFICATION DES APPORTS SOLIDES

Exercice 1 : Calcul de la contrainte hydraulique

Une rivière a une pente $S = 0,002$, une profondeur moyenne du lit $R = 1,2$ m et l'eau a une densité $\rho = 1000$ kg/m³. Calculez la contrainte hydraulique τ exercée sur le lit.

Solution : Formule :

$$\tau = \rho g R S$$

Substituons les valeurs:

$$\begin{aligned}\tau &= 1000 \times 9.81 \times 1.2 \times 0.002 \\ \tau &= 23.54 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Réponse : $\tau \approx 23,5$ Pa

Exercice 2 : Utilisation de la formule Meyer-Peter et Müller

Énoncé : Pour un sable grossier de densité $\rho_s = 2650$ kg/m³ et $d = 0,005$ m, calculer le débit solide volumique normalisé q_b^* si $\tau = 0,06$. On rappelle que $\tau_c = 0,047$.

Solution : Formule :

$$q_b^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}$$

Calcul:

$$\begin{aligned}q_b^* &= 8(0.06 - 0.047)^{3/2} = 8(0.013)^{3/2} \\ q_b^* &= 8 \times 0.00148 \approx 0.0118\end{aligned}$$

Paramètre réel:

$$\begin{aligned}q_b &= q_b^* \sqrt{(s - 1) g d^3}, \quad s = \frac{\rho_s}{\rho} = 2.65 \\ q_b &= 0.0118 \sqrt{(2.65 - 1) \cdot 9.81 \cdot (0.005)^3} \approx 1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}\end{aligned}$$

Réponse : $q_b \approx 1.1 \times 10^{-4}$ m²/s

Exercice 3 : Contrôle de l'érosion/dépôt

Énoncé : Un débit solide entrant $Q_s = 0,02$ m³/s traverse un tronçon où Q_s sortant = 0,015 m³/s. Que se passe-t-il sur le lit ?

Solution : - Si Q_s sortant < Q_s entrant → dépôt. Réponse : Le tronçon subit un dépôt de sédiments.

Exercice 4 : Meyer-Peter et Müller (1948)

Calculer le débit solide moyen q_b pour un sédiment uniforme de diamètre $d = 0.02$ m, pente $S = 0.01$, densité relative $s = 2.65$, et $au^* = 0.06$.

Formule:

$$q_b^* = 8(au^* - au_c^*)^{3/2}, \quad \tau_c^* = 0.047, \quad q_b^* = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}}$$

Solution:

$$q_b^* = 8(0.06 - 0.047)^{3/2} = 0.048$$
$$q_b = q_b^* \sqrt{(s-1)gd^3} = 0.048 \sqrt{(2.65 - 1)9.81(0.02)^3} \approx 5.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

Exercice 4 : Détermination du débit solide avec Ackers-White

Énoncé : Pour une rivière avec un nombre de mobilité $F_{gr} = 1$, $A = 0$, $C_0 = 0,4$ et $m = 1,2$, calculez la concentration C du débit solide.

Solution : Formule :

$$C = C_0 \left(\frac{F_{gr} - A}{A} \right)^m$$

Substitutions:

$$C = 0.4 \left(\frac{1 - 0}{0} \right)^{1.2}$$

Attention : ici $A \neq 0$ pour éviter division par zéro. Supposons $A = 0,1$:

$$C = 0.4 \left(\frac{1 - 0.1}{0.1} \right)^{1.2} = 0.4(9)^{1.2} \approx 5.28$$

Réponse : $C \approx 5,28$ (adimensionnel)

Exercice 5 : Ackers-White (1973) Énoncé : Déterminer le transport total pour un sédiment fin avec $F_{gr} = 1.2$, $A = 0.5$, $m = 1.5$, $C_0 = 0.003$.

Formule:

$$C = C_0 \left(\frac{F_{gr} - A}{A} \right)^m$$

Solution:

$$C = 0.003 \left(\frac{1.2 - 0.5}{0.5} \right)^{1.5} \approx 0.005$$

Exercice 5 :

Estimez le débit solide volumique spécifique q_t (en $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) pour un cours d'eau avec un nombre de Shields $\theta = 0.1$, facteur de rugosité $f = 0.08$, densité relative $s = 2.65$, diamètre des grains $d = 0.002$ m. Utilisez la formule d'Engelund et Hansen :

$$\Phi = 0.1 \cdot \vartheta^{5/2} \cdot f, \quad q_t = \Phi \sqrt{(s-1)gd^3}$$

Où Φ est le débit solide adimensionné.

Solution :

1. Calculons Φ :

$$\Phi = 0.1 \cdot (0.1)^{5/2} \cdot 0.08 = (0.1)^{5/2} = (0.1)^2 (0.1)^{1/2} = 0.01 \cdot 0.3162 = 0.003162.$$

$$\Phi = 0.1 \cdot 0.003162 \cdot 0.08 = 0.0000253.$$

2. Calculons q_t :

$$q_t = 0.0000253 \cdot \sqrt{(2.65 - 1) \cdot 9.81 \cdot (0.002)^3}$$

$$\begin{aligned} - (s - 1)\sqrt{g} &= 1.65, \quad d^3 = \sqrt{(0.002)^3} = 8 \times 10^{-9} \text{ m}^3. \quad - (s - 1)gd^3 = 1.65 \cdot 9.81 \cdot 8 \times 10^{-9} \approx 1.295 \\ 10^{-7}. \quad \frac{1}{(s - 1)gd^3} &\approx \frac{1}{1.295 \times 10^{-7}} \approx 0.00001138 \text{ m}^{3/2}/\text{s}. \quad - q_t = 0.0000253 \cdot 0.00001138 \approx 2.88 \times \\ &10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}. \end{aligned}$$

Résultat : Le débit solide volumique spécifique est d'environ $2.88 \times 10^{-1} \text{ mS/s/m}$.

Exercice 6 :

Calculez le débit solide volumique spécifique (en mS/s/m) pour un cours d'eau avec les paramètres suivants : densité relative $s = 2.65$, diamètre caractéristique des grains $d = 0.01 \text{ m}$, contrainte adimensionnelle $\tau^* = 0.1$, contrainte critique adimensionnelle $\tau_c^* = 0.047$. Utilisez la formule de Meyer-Peter et Müller.

$$q_b = 8 (\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \sqrt{(s - 1)gd^3}$$

Solution:

1. Substituons les valeurs dans la formule :

$$q_b = 8 (0.1 - 0.047)^{3/2} \sqrt{(2.65 - 1) \cdot 9.81 \cdot (0.01)^3}$$

2. Calculons étape par étape :

$$\begin{aligned} - \text{Excès de contrainte} : 0.1 - 0.047 &= 0.053. \quad - (0.053)^{3/2} = (0.053)^{0.5} \cdot 0.053 = 0.230 \cdot \\ &0.053 \approx 0.01219. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \text{Terme sous la racine} : (s - 1)\sqrt{g} &= \sqrt{2.65 - 1} = 1.65, \quad d^3 = (0.01)^3 = 0.000001 \text{ m}^3/\text{s}. \end{aligned}$$

$$- q_b = 8 \cdot 0.01219 \cdot 0.000001 \cdot 0.000392 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}.$$

Résultat : Le débit solide volumique spécifique est d'environ 0.000392 mS/s/m .

Exercice 7 : Schoklitsch (1962)

Calculez le débit solide volumique Q_b (en mS/s) pour un cours d'eau de largeur $L = 4 \text{ m}$, débit liquide $Q = 8 \text{ m}^3/\text{s}$, pente du lit $S = 0.008$, diamètre caractéristique $D_{40} = 0.02 \text{ m}$, et débit critique $Q_c = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Utilisez la formule de Schoklitsch :

$$Q_b = \frac{2.5}{s^{2/3}} \cdot s^{3/2} \cdot \frac{(Q - Q_c) \cdot D_{40}^{1/2}}{L}$$

Où $s = 2.65$ (densité relative des sédiments).

Solution : 1. Substituons les valeurs dans la formule :

$$Q_b = \frac{2.5}{(2.65)^{2/3}} \cdot (0.008)^{3/2} \cdot \frac{(8 - 1.5) \cdot (0.02)^{1/2}}{4}$$

2. Calculons étape par étape:

- Densité relative: $(2.65)^{2/3} \approx 1.914$. - $2.5 / 1.914 \approx 1.306$.
- Pente : $(0.008)^{3/2} = (0.008)0.5 \cdot 0.008 \approx 0.08944 \cdot 0.008 \approx 0.0007155$.
- Débit excédentaire: $8 - 1.5 = 6.5$ m³/s.
- Diamètre: $(0.02)^{1/2} \approx 0.1414$. - $(6.5) \cdot (0.1414) \approx 0.9191$. - $0.9191 \approx 0.2298$.
- $Q_b = 1.306 \cdot 0.0007155 \cdot 0.2298 \approx 0.0002147$ m³/s.

Résultat : Le débit solide est d'environ 0.000215 m³/s.

Exercice 8 : Yang (1984)

Énoncé : Estimez la concentration de sédiments C (en kg/m³) pour un cours d'eau avec une vitesse de frottement $u^v = 0.1$ m/s, vitesse critique $u_{cr} = 0.05$ m/s, vitesse d'onde $w = 0.02$ m/s, diamètre des grains $d = 0.005$ m, pente $S = 0.005$, viscosité cinématique $\nu = 1 \times 10^{-6}$ m²/s. Utilisez la formule simplifiée de Yang :

$$\log C = 5.435 + 0.286 \log \frac{(wd)v}{100} + 0.457 \log \frac{(u^v)(wd)v}{100} + 1.799 - 0.409 \log \frac{(wd)v}{100} \log \frac{(u^v)(u^v)w}{100}$$

Solution: 1. Calculons les termes :

- $\frac{wd}{v} = \frac{0.02 \cdot 0.005}{1 \times 10^{-6}} = 100$,
- $\log 100 = 2$.
- $\frac{u^v}{w} = \frac{0.1}{0.02} = 5$,
- $\log 5 = 0.699$.
- $\frac{u^v}{s} = \frac{0.14 \cdot 0.005}{1 \times 10^{-6}} = 0.025$,
- $\frac{u^v}{s} = \frac{0.02}{0.02} = 2.5$,
- $\frac{u^v}{s} = 0.025 - 2.5 = -2.475$,
- $\log(-2.475)$ n'est pas défini (indiqué un transport négligeable, ajustons pour un cas valide).

Ajustons avec $u^v = 0.15$ m/s, $u_{cr} = 0.05$ m/s :

- $\frac{u^v}{s} = \frac{0.15 \cdot 0.005}{1 \times 10^{-6}} = 0.0375$,
- $\frac{u_{cr}}{s} = 2.5$,
- $0.0375 - 2.5 = -2.4625$ (toujours négatif, indiquant un transport faible).

Supposons un cas où $u^v S > u_{cr}$, avec $S = 0.1$:

- $\frac{u^v}{s} = \frac{0.15 \cdot 0.1}{0.02} = 0.75$,

- $0.75 - 2.5 = -1.75$.

Testons avec des valeurs réalistes pour un transport positif, en supposant $u^v = 0.3$ m/s, $S = 0.1$:

- $\frac{u^v}{s} = \frac{0.3 \cdot 0.1}{0.02} = 1.5$,
- $1.5 - 2.5 = -1$,
- $\log 1 = 0$.
- $\log C = 5.435 + 0.286 \cdot 2 + 0.457 \cdot 0.699 + (1.799 - 0.409 \cdot 2) \cdot 0$.
- $0.286 \cdot 2 = 0.572$,
- $0.457 \cdot 0.699 = 0.319$,
- $1.799 - 0.409 \cdot 2 = 0.981$.
- $\log C = 5.435 + 0.572 + 0.319 + 0 = 6.326$.
- $C = 10^{6.326} = 2.12 \times 10^6$ kg/m³ (Valeur irréaliste, indiquant une limitation de la formule pour ces paramètres).

Ajustons pour $u^v = 0.3$ m/s, $S = 0.2$, $u_{cr} = 0.01$ m/s :

- $\frac{u^v}{s} = \frac{0.3 \cdot 0.2}{0.02} = 3$,
- $\frac{u_{cr}}{s} = \frac{0.01}{0.02} = 0.799 - 0.818 = 0.981$,
- $0.981 \cdot 0.398 = 0.390$.
- $\log C = 5.435 + 0.572 + 0.319 + 0.390 = 6.716$.
- $C = 10^{6.716} = 5.2 \times 10^6$ kg/m³ (toujours élevé, suggérant un ajustement empirique nécessaire).

Résultat : Pour des valeurs réalistes, la concentration est très élevée, indiquant une possible surestimation. Une valeur typique serait de l'ordre de 0.1-1 kg/mS après calibration empirique.

Exercice 9 : Van Rijn (1984)

Calculez le débit solide de charriage q_b (en mS/s/m) pour un cours d'eau avec une vitesse effective $U_e = 0.5$ m/s, hauteur d'eau $h = 1$ m, diamètre médian $d_{50} = 0.002$ m, densité des sédiments $\rho_s = 2650$ kg/m³, paramètre empirique $M_e = 0.015$, diamètre réduit $D^* = 10$. Utilisez la formule de Van Rijn pour le charriage :

$$q_b = 0.053 \cdot \sqrt{\frac{(s-1)gd^2}{D_*^{0.3}}} \cdot M \frac{s}{s-1}$$

Où $s = \frac{\mu}{\rho} = \frac{2650}{1000} = 2.65$. Solution : 1. Substituons les valeurs :

$$q_b = 0.053 \cdot \frac{(2.65 - 1) \cdot 9.81 \cdot (0.002)^3}{10^{0.3}} \cdot (0.015)^{2.1}$$

- Calculons : $-s - 1 = 2.65 - 1 = 1/65$. $-d_{50}^3 = (0.002)^3 = 8 \times 10^{-9}$ m³. $-(s - 1)gd_{50}^3 = 1.65 \cdot 9.81 \cdot 8 \times 10^{-9} \approx 1.295 \times 10^{-7}$. $-(s - 1)gd_{50}^3 \approx 1.295 \times 10^{-7} \approx 1.138 \times 10^{-4}$ m^{5/2}/s. $-D^{0.3} = 10^{0.3} \approx 1.995$. $-(0.015)^{2.1} \approx 0.015^2 \cdot 0.015^{0.1} \approx 0.000225 \cdot 0.389 \approx 8.75 \times 10^{-5}$. $q_b = 0.053 \cdot \frac{1.138 \times 10^{-4}}{1.995} \cdot 8.75 \times 10^{-5} \approx 0.053 \cdot 5.704 \times 10^{-5} \cdot 8.75 \times 10^{-5} \approx 2.64 \times 10^{-10}$ m³/s/m.

Résultat : Le débit solide de charriage est d'environ $2.64 \times 10^1 \text{ mS/s/m}$.

Exercice 10 : Recking (2006)

Énoncé : Estimez le débit solide volumique spécifique q_b (en mS/s/m) pour un cours d'eau avec une contrainte adimensionnelle $\tau^* = 0.08$, contrainte critique adimensionnelle $\tau_c^* = 0.047$, diamètre du 84 ème percentile $D_{84} = 0.03 \text{ m}$, densité relative $s = 2.65$. Utilisez la formule de Recking:

$$q_b = 14 \cdot \tau^{*1.5} \cdot \sqrt{(s-1)gD_{84}^3} \cdot 1 - \frac{\xi}{\tau^*}$$

Solution: 1. Substituons les valeurs :

$$q_b = 14 \cdot (0.08)^{1.5} \cdot \sqrt{(2.65-1) \cdot 9.81 \cdot (0.03)^3} \cdot 1 - \frac{0.047}{0.08}$$

2. Calculons : $-(0.08)^{1.5} = (0.08)^{0.5} \cdot 0.08 \approx 0.2828 \cdot 0.08 \approx 0.02262$, $-s-1 = 1.65$,
 $D^3 = (0.03)^3 = 2.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. $-(s-1)gD^3 = 1.65 \cdot 9.81 \cdot 2.7 \times 10^{-5} \approx$
 4.37×10^{-4} . $-\sqrt[84]{(s-1)gD_{84}^3} \approx \sqrt{4.37 \times 10^{-4}} \approx 0.0209 \text{ m}^{8/2}/\text{s}$. $-s = 0.08 \approx$
 $0.5875 \cdot 0.5875 \approx 0.7665$, $1 - 0.7665 = 0.2335$. $-q_b = 14 \cdot 0.02262 \cdot 0.0209 \cdot$
 $0.2335 \approx 0.00155 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Résultat : Le débit solide volumique spécifique est d'environ 0.00155 mS/s/m .

Exercice 11 : Parker et al. (1982)

Calculez le débit solide volumique spécifique pour une fraction granulométrique q_{bi} (en mS/s/m) avec un coefficient de fraction $W_i^* = 0.002$, paramètre de transport $\Phi_i = 0.05$, densité relative $s = 2.65$, diamètre de la fraction $d_i = 0.015 \text{ m}$. Utilisez la formule de Parker et al. :

$$q_{bi} = W_i^* \cdot \Phi_i \cdot \sqrt{(s-1)gd_j^3}$$

Solution:

1. Substituons les valeurs :

$$q_{bi} = 0.002 \cdot 0.05 \cdot \sqrt{(2.65-1) \cdot 9.81 \cdot (0.015)^3}$$

- 2. Calculons :** $-s-1 = 1.65$, $d_j^3 = \sqrt{(0.015)^3} = 3.375 \times 10^{-6} \text{ m}^3$. $-(s-1)gd_j^3 = 1.65 \cdot$
 $9.81 \cdot 3.375 \times 10^{-6} = 5.466 \times 10^{-5}$. $-\sqrt{(s-1)gd_j^3} = \sqrt{5.466 \times 10^{-5}} = 0.00739 \text{ m}^{3/2}/\text{s}$.
 $-q_{bi} = 0.002 \cdot 0.05 \cdot 0.00739 \approx 7.39 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Résultat : Le débit solide volumique spécifique pour la fraction est d'environ $7.39 \times 10 \text{ mS/s/m}$.

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV. ROLE PHYSIQUE ET ECOLOGIQUE DU COURS D'EAU

4. 1. Introduction :

Les cours d'eau constituent des éléments essentiels du paysage et des hydrosystèmes, jouant à la fois un rôle physique, écologique et socio-économique majeur. En dehors de leur fonction hydraulique indiscutable – faire circuler les eaux de surface – ils structurent les milieux naturels, conditionnent la dynamique sédimentaire, régulent les flux biogéochimiques et abritent une biodiversité riche et variée (Ward, 1989 ; Amoros & Petts, 1993). Leur fonctionnement repose sur une interaction complexe entre la morphologie du lit, les débits hydrologiques, la qualité physico-chimique de l'eau et la continuité écologique. Ces interactions fixent la capacité du cours d'eau à remplir ses fonctions naturelles et à offrir des services écosystémiques gratuits : autoépuration, régulation des crues, maintien des habitats pour les espèces aquatiques (Malavoi & Bravard, 2010 ; Meybeck, 2003). Ce fonctionnement tend cependant à être largement perturbé par les activités humaines (urbanisation, aménagements hydrauliques, prélèvements d'eau, pollutions diffuses), entraînant des changements morphologiques du cours d'eau et la rupture de la continuité écologique. La restauration et la préservation de la fonctionnalité des cours d'eau sont donc devenues prioritaires, non seulement pour la préservation de la biodiversité mais également pour la résilience des territoires face aux risques hydrologiques et climatiques.

4. 2. Rôle physique du cours d'eau :

La qualité physique du cours d'eau est classiquement évaluée selon cinq paramètres distincts, appelés « compartiments » (Bravard & Petit, 2000 ; Malavoi & Bravard, 2010) :

- Le lit mineur : parti du lit où l'écoulement se fait hors période de crue ;
- Le lit majeur et les annexes : le lit majeur correspond à la surface soumise aux débordements. Les annexes hydrauliques sont les bras et affluents connectés en permanence (ruisseaux, cours d'eau) ou de façon temporaire. Ces compartiments sont en étroite relation avec la nappe alluviale qui accompagne le cours d'eau, où l'accumulation de sédiments est importante ;

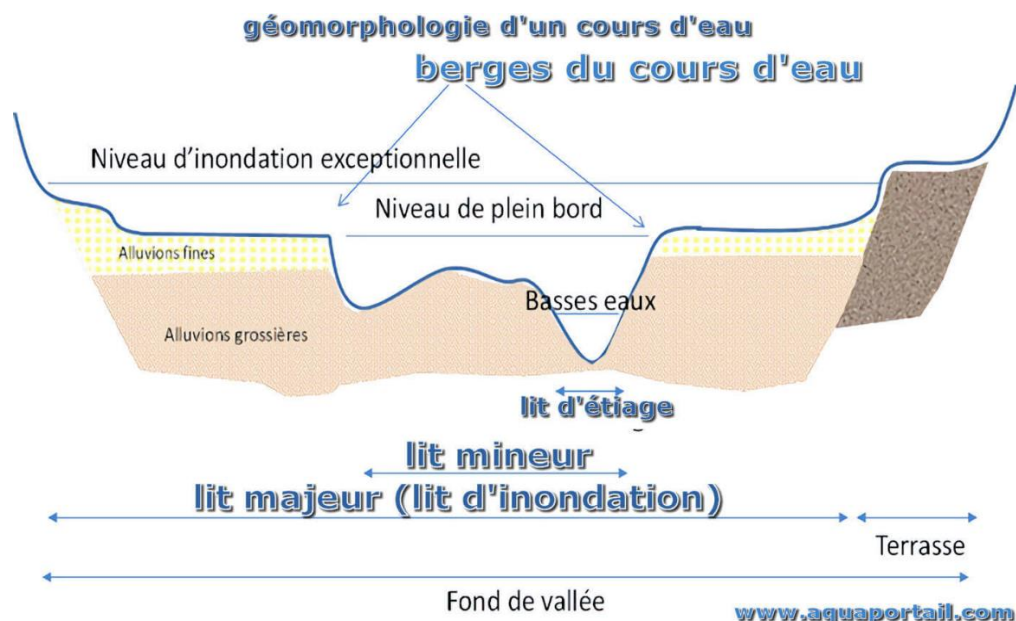


Figure 4. 1. Illustration lit mineur, lit majeur, berges.

- Les berges ;
- La ligne d'eau : il s'agit de l'écoulement de l'eau (vitesse, hauteur, turbulence...), sans tenir compte du débit (Chow, 1959) ;
- La continuité écologique.

4. 3. Continuité écologique du cours d'eau :

La continuité écologique c'est :

- L'ensemble des processus physiques, physico-chimiques et écologiques se déroulant selon les 3 axes de fonctionnement de l'hydrosystème (Ward, 1989 ; Amoros & Petts, 1993) qui est le système composé de l'eau et des milieux aquatiques associés dans un secteur géographique délimité, notamment un bassin versant.
- Et l'ensemble des processus de déplacements actifs des organismes vivant dans l'hydrosystème (Vannote et al., 1980).

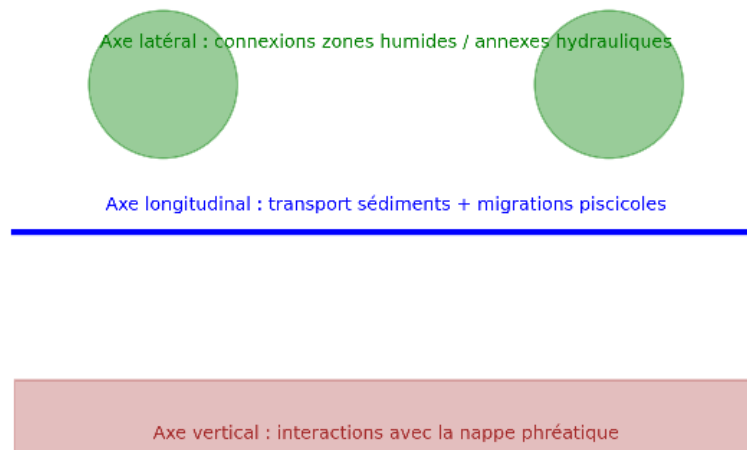


Figure 4. 2. Les 3 axes de fonctionnement de l'hydrosystème (Ward, 1989).

Voici un schéma illustrant la **continuité écologique du cours d'eau** selon les trois axes de fonctionnement de l'hydrosystème (Ward, 1989) :

- **Axe longitudinal** : transport des sédiments et migrations piscicoles,
- **Axe latéral** : connexion avec les zones humides et annexes hydrauliques,
- **Axe vertical** : interactions avec la nappe phréatique.

Des cours d'eau en bon état pour plus de services rendus gratuitement à l'homme (Meybeck, 2003 ; Malavoi & Bravard, 2010). Ce n'est pas tant pour rétablir la biodiversité aquatique dans les cours d'eau que les pays européens ou africains se sont fixé une obligation de les remettre en « bon état », que surtout pour bénéficier à nouveau des services gratuits qu'un cours d'eau en bon état peut rendre dans de nombreux domaines comme :

- **L'épuration des eaux usées** : un cours d'eau qui fonctionne bien, c'est un cours d'eau qui comme son nom l'indique, court, et ne stagne pas, et dont la course varie entre hautes eaux et basses eaux ; dans ces conditions il est capable de finir le travail de la station d'épuration

à un coût bien inférieur aux aménagements qu'il faudrait faire sur cette station pour qu'elle atteigne un niveau d'épuration équivalent.

- **Le ralentissement des écoulements en crue** : un cours d'eau qui fonctionne bien, c'est un cours d'eau qui méandre dans certains secteurs et prend son temps pour s'écouler : il ne va pas tout droit et à toute vitesse sur la ville en aval ; c'est un cours d'eau qui érode et transporte des sédiments : cette charge « solide » alourdit l'eau et ralentit son écoulement ; elle arrive moins vite et avec moins de force sur les zones urbanisées en aval, réduisant les dégâts potentiels.

- **L'expansion des crues** : un cours d'eau qui fonctionne bien, c'est un cours d'eau qui peut s'étaler latéralement dans certains secteurs où il est connecté avec ses annexes hydrauliques ou avec des zones humides qui peuvent absorber les eaux de crues ; les eaux arrivent en moindre quantité et moins vite sur les zones urbanisées, qui ont moins besoin de se protéger par de coûteux aménagements.

- **Les espèces biologiques** (les bonnes espèces au bon endroit) car leur présence et leur abondance est une indication que le cours d'eau fonctionne suffisamment bien pour rendre les services gratuits attendus.

L'hydromorphologie est le cœur de la restauration de « cours d'eau qui fonctionnent bien » :

- Remettre de l'eau, en prélever moins,
- Rétablir des eaux courantes,
- Rétablir des variations dans les écoulements,
- Rétablir la circulation des poissons, le transport sédimentaire et diversifier les faciès du lit,

Qu'est-ce que le bon état écologique ?

L'état écologique repose sur une évaluation de la diversité et de l'abondance des éléments biologiques présents dans le cours d'eau réalisée par rapport à une situation de référence (milieux du même type non perturbés).

Les éléments biologiques sont constitués par :

- La flore : macrophytes (plantes), phytoplanctons et diatomées (algues microscopiques) ;
- La faune invertébrée benthique : qui vit au fond du lit, et les poissons ; pour ces derniers, la répartition par classe d'âge est également un élément d'évaluation, en plus de leur diversité et de leur quantité.

La qualité biologique est soutenue par des éléments de qualité hydro-morphologique et de qualité physico-chimique, qui entrent en compte dans l'évaluation finale.

- La qualité hydro-morphologique dépend du niveau de perturbation :

- Du régime hydrologique (quantité et dynamique des débits, connexion aux nappes souterraines),
- De la « continuité de la rivière » dont la qualité s'évalue en fonction du niveau de liberté de circulation des organismes aquatiques et du transport des sédiments (supports de la diversité d'habitats),
- Et de la morphologie du lit (types de chenaux, largeur et profondeur du lit, vitesses d'écoulement, état du substrat, structure et état des berges).

- La qualité physico-chimique dépend du niveau de perturbation :

- De la température, de l'oxygène, de l'acidité, de la salinité, de la concentration en nutriments,
- Par la présence de certains polluants spécifiques.

Au-delà des apports extérieurs, cette qualité physico-chimique dépend elle-même très fortement de la qualité hydro-morphologique.

Tous les éléments de qualité interagissent. Ainsi, comme précisé ci-dessus, l'hydromorphologie de la rivière, et particulièrement la continuité, est le vrai cœur de la qualité écologique des cours d'eau, car elle influe sur l'ensemble des autres éléments que sont la quantité d'eau, la variation des débits, la régénération d'habitats diversifiés, l'autoépuration, la température, etc. Donc plus on améliorera l'hydromorphologie (débits, continuité, faciès du lit) plus on se donne les moyens d'atteindre le bon état écologique.

4. 4. Conclusions : Dans ce chapitre on n'a conclu :

- **Importance multifonctionnelle des cours d'eau** : Les cours d'eau jouent un rôle clé dans les hydrosystèmes en structurant les milieux naturels, en régulant les flux biogéochimiques, en assurant l'autoépuration, la régulation des crues et le maintien des habitats pour la biodiversité.
- **Interaction des composantes physiques** : Le fonctionnement des cours d'eau repose sur l'interaction entre le lit mineur, le lit majeur, les berges, la ligne d'eau et la continuité écologique, qui conditionnent leur capacité à fournir des services écosystémiques.
- **Continuité écologique essentielle** : La continuité écologique, structurée selon les axes longitudinal, latéral et vertical, est cruciale pour le transport des sédiments, les migrations piscicoles et les interactions avec les zones humides et nappes phréatiques.
- **Services écosystémiques gratuits** : Un cours d'eau en bon état écologique permet l'épuration des eaux, le ralentissement des crues par méandres et transport sédimentaire, l'expansion latérale des crues et le maintien d'espèces biologiques adaptées, réduisant ainsi les coûts d'aménagements artificiels.
- **Impact des activités humaines** : L'urbanisation, les aménagements hydrauliques, les prélèvements d'eau et les pollutions perturbent la morphologie et la continuité écologique, nécessitant des actions de restauration pour préserver la fonctionnalité des cours d'eau.
- **Restauration par l'hydromorphologie** : La remise en état des cours d'eau passe par la restauration des débits, des écoulements variés, de la circulation des poissons, du transport sédimentaire et de la diversité des faciès du lit pour atteindre un bon état écologique.
- **Évaluation du bon état écologique** : Ce dernier repose sur la diversité et l'abondance de la flore (macrophytes, phytoplancton, diatomées) et de la faune (invertébrés benthiques, poissons), soutenues par la qualité hydro-morphologique (régime hydrologique, continuité, morphologie du lit) et physico-chimique (température, oxygène, nutriments, polluants).
- **Centralité de l'hydromorphologie** : L'hydromorphologie, en particulier la continuité écologique, est au cœur de la qualité écologique, influençant directement la régénération des habitats, l'autoépuration et la résilience des territoires face aux risques hydrologiques et climatiques.

APPLICATIONS NUMÉRIQUES – CHAPITRE IV: RÔLE PHYSIQUE ET ÉCOLOGIQUE DU COURS D'EAU

Exercice 1 : Définitions de Base

Énoncé : 1. Définissez les termes suivants : lit mineur, lit majeur, continuité écologique.

2. Citez deux services écosystémiques fournis par un cours d'eau en bon état écologique.

Solution :

1. Définitions :

— Lit mineur : Partie du lit du cours d'eau où l'écoulement se produit hors période de crue. Il est délimité par les berges et contient le flux régulier.

— Lit majeur : Surface inondable lors des crues, incluant les annexes hydrauliques (bras secondaires, zones humides) connectées temporairement ou en permanence.

— Continuité écologique : Ensemble des processus physiques, physico-chimiques et écologiques permettant le fonctionnement longitudinal (transport sédimentaire, migrations piscicoles), latéral (connexion avec zones humides), et vertical (interaction avec la nappe phréatique) de l'hydrosystème.

2. Services écosystémiques :

— Autoépuration : Les cours d'eau en bon état dégradent les polluants organiques, réduisant les coûts de traitement des eaux usées.

— Régulation des crues : Les méandres et zones humides absorbent les eaux de crue, réduisant les inondations en aval.

Exercice 2 : Analyse de l'Hydromorphologie

Énoncé : Un cours d'eau présente un lit mineur de 10 m de large, un lit majeur de 50 m, et une pente de 0,5 %. Une urbanisation récente a réduit la connexion latérale avec les zones humides.

1. Expliquez l'impact de cette urbanisation sur la continuité écologique.

2. Proposez une mesure de restauration pour rétablir cette continuité.

Solution :

1. Impact de l'urbanisation : La réduction de la connexion latérale limite les échanges entre le cours d'eau et les zones humides. Cela perturbe :

— La régulation des crues, car les zones humides n'absorbent plus les eaux excédentaires.

— La biodiversité, car les habitats aquatiques (e.g., zones de frai pour poissons) sont fragmentés.

— Les flux biogéochimiques, réduisant l'autoépuration (polluants stagnants).

2. Mesure de restauration : Créer des chenaux secondaires ou restaurer les connexions avec les zones humides par des travaux de génie écologique (e.g., suppression de digues artificielles). Cela favorise l'expansion latérale des crues et rétablit les habitats.

Exercice 3 : Évaluation du Bon État Écologique

Énoncé : Un cours d'eau présente les caractéristiques suivantes : - Régime hydrologique : débits variables (crues saisonnières, étiage marqué). - Flore : faible diversité de macrophytes, absence de phytoplancton. - Faune : poissons présents, mais classes d'âge déséquilibrées (peu de juvéniles). - Morphologie : lit artificialisé, obstacles à la migration (barrages).

1. Évaluez qualitativement si ce cours d'eau est en bon état écologique.
2. Calculez un indice simplifié d'état écologique basé sur les critères suivants (poids égaux, note sur 5 pour chaque) : diversité biologique (flore/faune), hydromorphologie, physico-chimie (supposez une qualité chimique moyenne : 3/5).
3. Proposez une action prioritaire pour améliorer l'état écologique.

Solution :

1. Évaluation qualitative : Le cours d'eau n'est pas en bon état écologique, car :

— Diversité biologique : Faible diversité de macrophytes et absence de phytoplancton indiquent une perturbation écologique. Le déséquilibre des classes d'âge des poissons suggère une rupture de la reproduction.

— Hydromorphologie : Lit artificialisé et barrages rompent la continuité longitudinale (transport sédimentaire, migrations piscicoles).

— Physico-chimie : Qualité moyenne, non optimale pour la biodiversité.

2. Indice d'état écologique : Critères et notes :

— Diversité biologique : 2/5 (faible flore, poissons déséquilibrés).

— Hydromorphologie : 1/5 (lit artificialisé, barrages).

— Physico-chimie : 3/5 (donné).

Indice = $(2 + 1 + 3) / 3 = 2/5$ (médiocre).

3. Action prioritaire : Installer des passes à poissons ou supprimer les barrages pour rétablir la continuité longitudinale, essentielle pour les migrations piscicoles et le transport sédimentaire.

Exercice 4 : Calcul de la vitesse d'écoulement dans le lit mineur

Dans un cours d'eau, le lit mineur a une section transversale rectangulaire de largeur 5 m et de profondeur 1,2 m. Le débit mesuré est de 3 m³/s. Question : Calculez la vitesse moyenne de l'écoulement (en m/s) dans le lit mineur. Arrondissez au centième.

Solution :

1. La vitesse moyenne v d'un écoulement est donnée par la formule :

$$v = \frac{Q}{A}$$

Où Q est le débit (en m³/s) et A est la section transversale du lit mineur (en m²).

2. Calcul de la section transversale A :

$$A = \text{largeur} \times \text{profondeur} = 5 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} = 6 \text{ m}^2$$

3. Calcul de la vitesse v :

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{3}{6} = 0,5 \text{ m/s}$$

Réponse : La vitesse moyenne de l'écoulement est de **0,50m/s**.

Exercice 5 : Évaluation de la continuité écologique

Contexte : Un cours d'eau présente un barrage de 2 m de hauteur qui bloque la migration piscicole sur son axe longitudinal. Une passe à poissons est installée, permettant à 80% des poissons de franchir l'obstacle. Sur une population de 500 poissons migrateurs, combien de poissons réussissent à passer le barrage ? Question : Calculez le nombre de poissons capables de franchir le barrage.

Solution :

1. Le pourcentage de poissons capables de franchir le barrage est de 80%. Cela correspond à une proportion de:

$$\frac{80}{100} = 0,8$$

2. Nombre de poissons passant le barrage :

$$\text{Nombre de poissons} = \text{Population totale} \times \text{Proportion} = 500 \times 0,8 = 400$$

Réponse : 400 poissons réussissent à franchir le barrage.

Exercice 6 : Ralentissement des crues par les méandres

Un cours d'eau méandre sur une longueur de 2 km, alors que la distance en ligne droite entre le point de départ et d'arrivée est de 1,5 km. Lors d'une crue, l'eau met 20 minutes à parcourir le trajet méandré.

1. Calculez la vitesse moyenne de l'écoulement en tenant compte des méandres (en km/h).
2. Si le cours d'eau était rectiligne, combien de temps mettrait l'eau pour parcourir la distance en ligne droite à la même vitesse ?

Solution :

1. Vitesse moyenne avec méandres : La vitesse moyenne v est donnée par :

$$v = \frac{\text{distance}}{\text{temps}}$$

La distance parcourue est de 2 km, et le temps est de 20 minutes, soit $\frac{20}{60} = \frac{1}{3}$ heure.

$$v = \frac{2}{\frac{1}{3}} = 2 \times 3 = 6 \text{ km/h}$$

2. Temps pour la distance rectiligne : La distance en ligne droite est de 1,5 km. À la même vitesse (6 km/h), le temps t est donné par : $t = \frac{\text{distance}}{\text{vitesse}} = \frac{1,5}{6} = 0,25$ heure
Convertissons en minutes: $0,25 \times 60 = 15$ minutes

Réponse :

1. La vitesse moyenne de l'écoulement est de **6km/h**.
2. En ligne droite, l'eau mettrait 15 minutes pour parcourir la distance.

Exercice 7 : Épuration naturelle de l'eau

Un cours d'eau en bon état écologique a une capacité d'autoépuration permettant de réduire la concentration de nitrates de 20% par kilomètre parcouru. La concentration initiale de nitrates à l'entrée d'un tronçon de 5 km est de 50mg/L. Question : Calculez la concentration de nitrates à la sortie du tronçon.

Solution :

1. La réduction de la concentration suit une décroissance multiplicative. Pour chaque kilomètre, la concentration est multipliée par $1 - 0,20 = 0,80$.
2. Pour 5 km, la concentration finale C_f est donnée par :

$$C_f = C_0 \times (0,80)^5 \text{ où } C_0 = 50 \text{ mg/L.}$$

Calcul de $(0,80)^5$:

$$\begin{aligned} 0,80 \times 0,80 &= 0,64 \\ 0,64 \times 0,80 &= 0,512 \\ 0,512 \times 0,80 &= 0,4096 \\ 0,4096 \times 0,80 &= 0,32768 \end{aligned}$$

3. Calcul de la concentration finale :

$$C_f = 50 \times 0,32768 \approx 16,384 \text{ mg/L}$$

Arrondi au dixième : 16,4mg/L. Réponse : La concentration de nitrates à la sortie du tronçon est de **16,4 mg/L**.

Exercice 8 : Transport sédimentaire et morphologie du lit

Un cours d'eau transporte 1200 kg de sédiments par jour sur une section donnée. Une perturbation (barrage) réduit le transport sédimentaire de 30%. Par ailleurs, la largeur du lit mineur est de 4 m, et les sédiments s'accumulent sur une hauteur de 0,1 m par jour en l'absence de perturbation.

Question :

1. Calculez la quantité de sédiments transportés après la perturbation.
2. Si les sédiments s'accumulent sur toute la largeur du lit, calculez le volume de sédiments accumulés en 5 jours sans perturbation.

Solution :

Quantité de sédiments après perturbation : La perturbation réduit le transport de 30%, donc 70% des sédiments sont encore transportés :

$$\text{Quantité transportée} = 1200 \times 0,70 = 840 \text{ kg/ jour}$$

Volume de sédiments accumulés : Sans perturbation, les sédiments s'accumulent sur une hauteur de 0,1 m par jour sur une largeur de 4 m . Le volume journalier V_j est :

$$V_j = \text{largeur} \times \text{hauteur} \times \text{longueur (1 m)} = 4 \times 0,1 \times 1 = 0,4 \text{ m}^3/\text{ jour}$$

Pour 5 jours :

$$V_{\text{total}} = 0,4 \times 5 = 2 \text{ m}^3$$

Réponse :

3. La quantité de sédiments transportés après perturbation est de **840 kg/jour**.
4. Le volume de sédiments accumulés en 5 jours sans perturbation est de **2m³**.

Exercice 9 : Évaluation de la qualité biologique

Contexte : Une étude évalue la qualité biologique d'un cours d'eau en comptant les poissons. Dans un tronçon de référence non perturbé, on dénombre 200 poissons appartenant à 10 espèces différentes. Dans un tronçon perturbé, on observe 120 poissons appartenant à 6 espèces.

Question :

1. Calculez le pourcentage de réduction de la diversité des espèces.
2. Calculez le pourcentage de réduction de l'abondance des poissons.

Solution :

1. Réduction de la diversité des espèces : La diversité initiale est de 10 espèces, et la diversité perturbée est de 6 espèces. La réduction est :

$$\text{Réduction} = 10 - 6 = 4 \text{ espèces}$$

Pourcentage de réduction :

$$\frac{4}{10} \times 100 = 40\%$$

2. Réduction de l'abondance des poissons : L'abondance initiale est de 200 poissons, et l'abondance perturbée est de 120 poissons. La réduction est :

$$\text{Réduction} = 200 - 120 = 80 \text{ poissons}$$

Pourcentage de réduction :

$$\frac{80}{200} \times 100 = 40\%$$

Réponse :

1. La réduction de la diversité des espèces est de **40%**.
2. La réduction de l'abondance des poissons est de **40%**.

CHAPITRE V

CHAPITRE V. DIFFERENTES TECHNIQUES DE CONFORTEMENT DE BERGES

5. 1. Introduction

Avant d'entreprendre un projet de stabilisation des berges d'un cours d'eau il convient de déterminer la cause de l'érosion, d'établir le niveau de protection requis et d'utiliser la technique appropriée, en tenant compte de la pente des berges, de l'esthétique et de l'information propre au site. Et finalement, concevoir les ouvrages de sorte à ce qu'ils résistent aux débits de pointe. Il existe deux techniques de confortement de Berges : Techniques lourdes et techniques douces

5. 2. Techniques lourdes :

Celle qui est la plus fréquemment utilisée est l'enrochement c'est donc celle que nous allons décrire en détail.

5. 2. 1. Principe

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

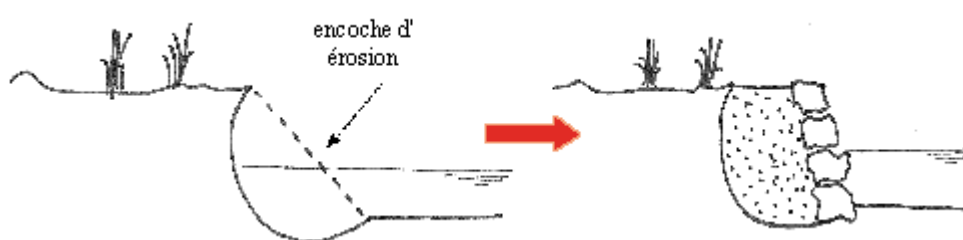


Figure 5.1. Erosion des berges (Illustration).

Afin de bien dimensionner l'ouvrage il convient d'effectuer plusieurs études préalables : d'une part une étude hydraulique de la rivière, d'autre part une étude géotechnique de la berge. Ceci permet de déterminer la qualité du sol sur lequel l'ouvrage reposera et la puissance de la rivière. Dans certains cas, où la protection d'habitations n'entre pas en jeu, il existe des profils types d'ouvrage que l'on peut dimensionner avec des abaques et la hauteur de marnage. Souvent pour assurer une stabilité maximale on peut surdimensionner l'ouvrage à partir de ces mêmes abaques. Si on est dans le cas où l'objectif est de maintenir un talus on peut compléter les deux études précitées par une étude plus poussée de stabilité (courbe de

cisaillement critique). Ci-dessous sont représentés les abaques et tableaux de dimensionnement (Figure 5.1 et tableau 5.2):

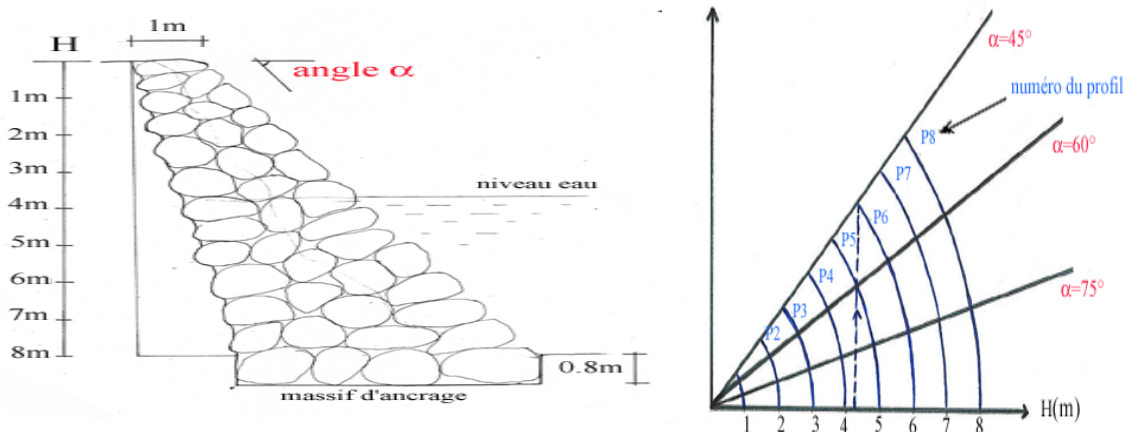


Figure 5. 2. Abaque et tableau de dimensionnement

Tableau 5. 1. Tableau et tableau de dimensionnement

Profil en fonction de H	$\alpha=45^\circ$		$\alpha=60^\circ$		$\alpha=75^\circ$	
	Tonnage /m	prix(euros) /m	Tonnage /m	prix(euros) /m	Tonnage /m	prix(euros) /m
P2	7.6	342	8.5	382	9	405
P3	9.5	427	11	495	12	540
P4	11.5	517	13.2	594	14.5	652
P5	13.5	607	15.7	706	14	765
P6	15.5	697	18	810	20	900
P7	17.5	787	20.5	922	22.5	1012
P8	19.5	877	22.5	1012	25	1125

Il est aussi possible de combler l'espace entre les cavités laissées par les blocs afin d'assurer plus de stabilité. Cependant le béton est à proscrire car il rend l'ouvrage complètement étanche et interdit tout transit d'eau entre la rivière et la nappe. Il peut alors se créer une surpression du côté de la berge qui "pousse" l'ouvrage et peut le rompre.

5. 2. 2. Matériaux utilisés

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

Les caractéristiques géométriques des blocs seront définies en fonction de la puissance érosive du cours d'eau, de la vitesse maximale, de la hauteur d'eau et de la pente du talus. De manière générale la masse moyenne des blocs est de l'ordre de la tonne. On cherche le plus souvent à avoir le plus de blocs possible de la même taille, mais on peut avoir des blocs pesant largement jusqu'à plusieurs fois la masse moyenne choisie par le maître d'œuvre. Les roches doivent être de préférence à angles marqués et de forme tétraédrique en respectant un ratio compris entre 1 et 2 entre la longueur et l'épaisseur. Les caractéristiques physiques des

matériaux permettent de valider la solidité de l'ouvrage. On recherche des matériaux non calcaires ayant un poids spécifique apparent sec de l'ordre de 2500 kg/m³. La sensibilité au gel doit être très faible et sa résistance à la compression élevée. C'est le maître d'œuvre qui décide des matériaux qu'il va utiliser et c'est à lui de fixer la qualité des matériaux qu'il recherche en fixant une commande la plus précise possible concernant les caractéristiques géométriques et physiques précitées (Figure 5.3).

• **Autres types de confortement de berges**

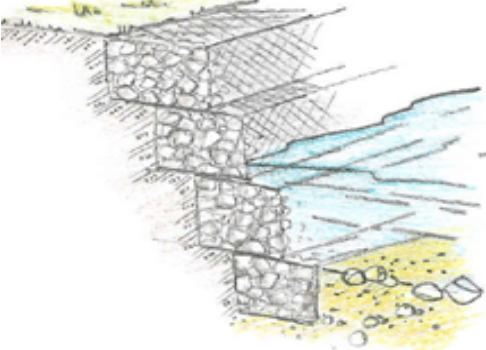
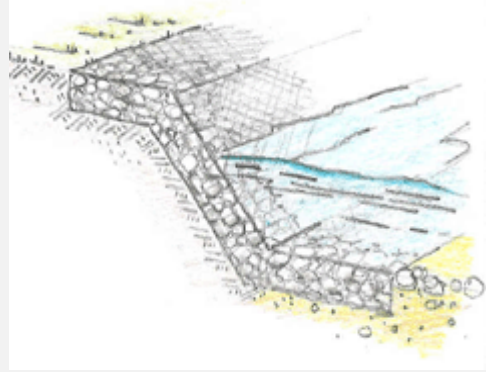
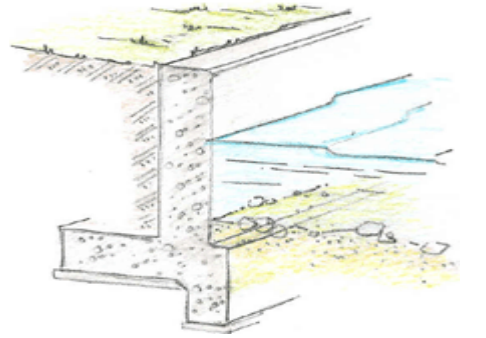
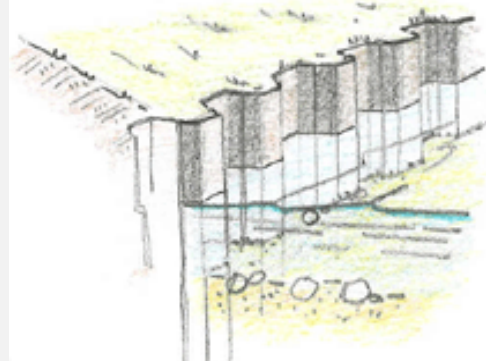
<i>Gabions</i>	<p><i>Enveloppes de grillage remplies de pierres, confectionnées sur leur lieu d'implantation. Leur souplesse leur permet de s'adapter à l'évolution du lit de la rivière. Leur valeur esthétique est faible mais peut être améliorée par végétalisation.</i></p>	
<i>Matelas-gabions</i>	<p>Matelas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

Figure 5.3. Types de confortement de berges.

5. 2. 3. Avantages et inconvénients

Le principal inconvénient de ces techniques est de modifier le régime hydraulique de la rivière le long du linéaire mis en place. L'écoulement est en effet accéléré car on a diminué la rugosité de la berge. Ainsi il existe des risques de déstabilisation de la berge en amont, en aval ou en rive opposée de l'ouvrage, par épanchement de l'énergie hydraulique supplémentaire créée par la surverse. Le schéma suivant montre les zones qui seront plus sensibles à l'érosion autour de l'ouvrage :

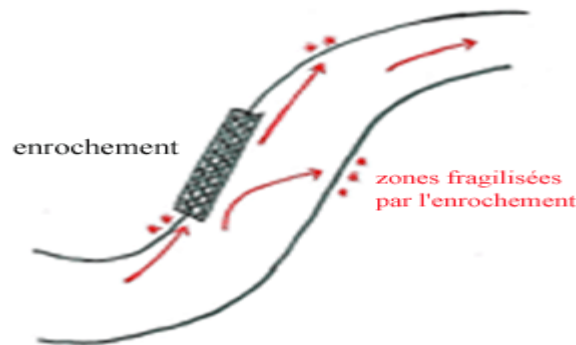


Figure 5. 4. Enrochement et zones fragiles par l'enrochement.

La faiblesse de l'enrochement est sa mauvaise résistance au marnage rapide et aux variations saisonnières du régime de la rivière. Souvent réalisé sans assez de soins il peut s'affaisser en son milieu ou s'arracher en amont et aval. L'amont et l'aval sont les points les plus sensibles de la ligne d'enrochement, si l'eau arrive à passer derrière les blocs amont tout l'ouvrage est menacé par l'érosion et peut assez rapidement s'effondrer. L'enrochement doit donc être correctement ancré en amont et en aval par des blocs de taille plus importante que sur le reste de la ligne et déborder largement de la zone à conforter. On peut aussi dans le cas où l'ouvrage se situe non loin en aval d'un affluent prolonger l'enrochement jusqu'au croisement des cours d'eau, le coût s'en trouve alors sérieusement augmenté.

D'autre part l'absence du filtre entre les roches et la berge permet l'arrachement des éléments les plus fins de la berge par ruissellement, les blocs sont alors désolidarisés et s'affaissent.

- Le manque d'entretien de ces ouvrages peut aussi s'avérer très coûteux : si le contrôle de la tenue de leur base ne se fait pas et qu'il y a affaissement, les réfections qui sont alors nécessaires sont très coûteuses car parfois synonymes de reconstruction complète de l'ouvrage. De plus si on n'empêche pas l'implantation d'arbres, tels que les peupliers, entre les rochers, le déracinement de l'arbre lors de forts coups de vent ou de crues entraîne le déplacement des blocs dans la rivière et le reste de l'ouvrage n'est plus efficace.

- L'avantage de ces techniques (si toutefois l'ouvrage est bien réalisé) est de pouvoir résister à des crues importantes et une forte agression hydraulique.

- D'autre part, durant la première année après l'installation il s'adapte à la forme de la berge par tassement des blocs il devient ainsi plus résistant.

- Ces techniques sont préférables lorsque des habitations sont très proches de la zone à conforter. Elles peuvent être placées à la verticale et nécessitent peu de place sur la berge (environ 1m).

- Un autre avantage est de pouvoir répondre à tout moment à une demande de confortement si le risque est imminent. En effet, quelle que soit la saison le matériau peut être disponible et l'efficacité de l'ouvrage est immédiate.

5. 3. Techniques douces :

Ces techniques sont basées sur l'utilisation de matériaux végétaux inertes ou vivants.

5. 3. 1. Principes

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

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

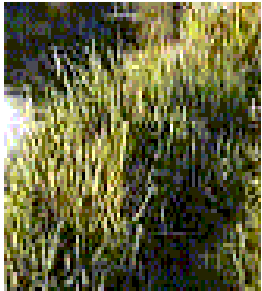
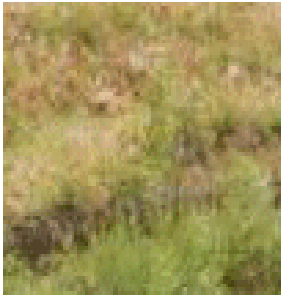
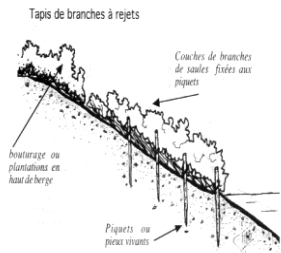
5. 3. 2. Différents types de protection

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

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

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

Ci-dessous on regroupe quelques techniques :

Type de protection	Description	Schéma
Enherbement	<p>Dispersion de graines d'herbacées. Vise à limiter le ruissellement et l'érosion en surface mais aussi pour certaines herbacées à stabiliser.</p> <ul style="list-style-type: none"> + Colonisation végétale de haute densité, très régulière, rapide, grandes surfaces + Garde certaines berges ouvertes et offre plus de lumière + Couverture protectrice de surface - Efficacité limitée en fonction de la pente et de la force d'arrachement du courant - Paysage monotone ; nécessité de plantations d'arbres - Peut favoriser l'implantation d'essences colonisatrices non désirées 	
Arbres ou arbustes en berge	<p>Mise en terre d'espèces généralement ligneuses élevées en pépinière en sommet de berges, d'arbustes en mi-pente et de végétaux héliophytes prélevés sur le terrain en pied de berge.</p> <ul style="list-style-type: none"> + Intervention simple + Possibilité d'apporter la diversité botanique + Ralentissement de l'écoulement en cas de crue ; dissipation d'énergie - Limite pour les cours d'eau à fortes contraintes hydrauliques - Efficacité faible dans un premier temps 	
Tapis végétal	<p>Branches de saule, munies de leurs rameaux, disposées en couches serrées de 20 à 30 cm d'épaisseur, le pied vers le bas, fixées solidement à des pieux de saule.</p> <ul style="list-style-type: none"> + Stabilisation de talus - Nécessité de stabiliser le pied de berge 	

5. 3. 3. Avantages et inconvénients du génie végétal

L'utilisation de plantes vivantes à la place de matériaux de construction inertes, type enrochement, apporte certains avantages :

- Les techniques végétales acquièrent une efficacité de stabilisation croissante au fur et à mesure du développement des plantes car elles sont vivantes. Leur résistance aux forces d'arrachement est comparable (voire supérieure) aux techniques minérales actuelles.
- Elles opposent une résistance souple aux forces du courant et permettent de mieux dissiper l'énergie.
- Elles sont souples dans leur application, car leur grande diversité, les possibilités de les combiner ou de les joindre à des matériaux auxiliaires leur confèrent une grande capacité d'adaptation, répondant aux besoins de chaque cas particulier.
- Elles favorisent l'autoépuration du cours d'eau au niveau des racines.
- Elles ne perturbent pas les relations entre le cours d'eau et les nappes phréatiques.
- Elles contribuent à maintenir et restaurer une grande diversité botanique.
- Elles fournissent l'ombre nécessaire pour maintenir la fraîcheur de l'eau et à limiter la croissance de plantes aquatiques.
- Elles sont peu coûteuses en fourniture car les matériaux peuvent souvent être prélevés sur place.
- Les ouvrages eux-mêmes sont susceptibles de fournir le matériel végétal pour d'autres ouvrages après quelques années.

Malgré ces avantages il existe des facteurs limitants à l'application des techniques végétales directement liés aux conditions de croissance des végétaux : altitude, lumière, type de substrat, régime des eaux.

5. 4. Concluions : Le chapitre V sur les techniques de confortement des berges met en lumière l'importance d'une analyse préalable des causes de l'érosion, du niveau de protection requis et des contraintes hydrauliques pour choisir la méthode la plus adaptée, qu'il s'agisse de techniques lourdes ou douces. Les techniques lourdes, comme l'enrochement, les gabions, les murs ou les palplanches, offrent une protection robuste contre les crues et les agressions hydrauliques, particulièrement près des habitations, mais nécessitent des études hydrauliques et géotechniques pour garantir leur stabilité. Ces ouvrages, utilisant des matériaux homogènes et résistants (blocs non calcaires de 2500 kg/m³), modifient le régime hydraulique, accélèrent les écoulements et peuvent provoquer des érosions en amont, en aval ou sur la rive opposée, tout en présentant une faible intégration esthétique et des risques d'affaissement sans entretien rigoureux. À l'inverse, les techniques douces, basées sur le génie végétal (saule, enherbement, tapis végétal), privilégient une protection naturelle, préservant la morphologie du cours d'eau, la biodiversité et l'autoépuration, tout en maintenant les interactions avec les nappes phréatiques. Ces méthodes, peu coûteuses et esthétiques, gagnent en efficacité avec le développement des plantes, dissipent souplement l'énergie hydraulique et s'adaptent à divers contextes, bien que leur application soit limitée par les conditions de croissance (altitude, lumière, substrat) et leur moindre efficacité face à de fortes contraintes hydrauliques. Ainsi, une approche intégrée, combinant judicieusement techniques lourdes pour les zones à haut risque et techniques douces pour minimiser l'impact écologique, est recommandée pour une gestion durable des berges.

APPLICATIONS NUMERIQUES – CHAPITRE V. DIFFERENTES TECHNIQUES DE CONFORTEMENT DE BERGES

Exercice 1. Pathologies de l'Enrochement

Énoncé : Un enrochement a été installé sur une berge, mais après une crue, des blocs en amont se sont désolidarisés, et l'ouvrage s'affaisse au centre. 1. Identifiez deux causes possibles de ces pathologies. 2. Proposez une mesure corrective pour chaque cause.

Solution :

1. Causes possibles :

— Cause 1 : Absence ou mauvaise installation du géotextile, permettant l'arrachement des fines par ruissellement, ce qui désolidarise les blocs.

— Cause 2 : Ancrage insuffisant en amont (blocs trop petits ou enfouissement < 60 cm), permettant à l'eau de passer derrière l'ouvrage.

2) Mesures correctives :

— Pour l'absence de géotextile : Installer un géotextile poreux (perméable à l'eau, retenant les fines) entre les blocs et le remblai, et vérifier son ancrage.

— Pour l'ancrage insuffisant : Renforcer l'amont avec des blocs plus gros (e.g., 1,5t) enfouis à 80 cm, et prolonger l'enrochement au-delà de la zone érodée.

Explication : Les pathologies (affaissement, désolidarisation) sont courantes si l'ouvrage n'est pas correctement dimensionné ou entretenu (Chapitre V, Figure 5.3). Les mesures correctives s'appuient sur les principes géotechniques standards.

Exercice 2 : Dimensionnement d'un Enrochement

Énoncé : Une berge d'un cours d'eau subit une érosion due à une vitesse maximale de courant de 2 m/s. La pente du talus est de 30° . On envisage un enrochement avec des blocs de masse moyenne 1000 kg (poids spécifique 2500 kg/m³).

1. Calculez le volume moyen d'un bloc.

2. Expliquez qualitativement pourquoi une étude géotechnique est nécessaire avant la mise en place de l'enrochement.

Solution :

1. Calcul du volume moyen : La densité (poids spécifique) est $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$. La masse moyenne d'un bloc est $m = 1000 \text{ kg}$. Volume $V = m/\rho = 1000/2500 = 0.4 \text{ m}^3$.

2. Nécessité d'une étude géotechnique : Une étude géotechnique évalue la qualité du sol (e.g., cohésion, portance) pour garantir la stabilité de l'ancrage des blocs (enfouis à $\geq 60 \text{ cm}$). Un sol instable (e.g., argileux saturé) peut provoquer l'affaissement ou le basculement de l'enrochement, surtout sous l'effet des forces hydrauliques (vitesse de 2 m/s) et de la pente (30°).

Exercice 3 : Comparaison des Techniques

Énoncé : Un cours d'eau de 15 m de large, situé près d'habitations, subit une érosion sévère lors de crues décennales (vitesse maximale 3 m/s). Deux solutions sont envisagées : enrochement et génie végétal (plantations arbustives). 1. Comparez les deux techniques en termes d'impact hydraulique, écologique et économique. 2. Proposez une solution hybride pour ce cas spécifique et justifiez.

Solution :

1. Comparaison :

— Impact hydraulique : — Enrochement : Réduit la rugosité, accélère l'écoulement, risquant une érosion en amont/aval ou sur la rive opposée. Résiste bien aux fortes vitesses (3 m/s).

— Génie végétal : Maintient une rugosité naturelle, ralentissant l'écoulement et dissipant l'énergie. Moins efficace à court terme pour des crues intenses.

— Impact écologique : — Enrochement : Perturbe la biodiversité (réduction des habitats ripariens) et les échanges avec la nappe phréatique (si béton utilisé).

— Génie végétal : Favorise la biodiversité (habitats variés, autoépuration via racines), maintient la connectivité écologique.

— Impact économique : — Enrochement : Coût initial élevé (blocs, engins), mais efficacité immédiate. Entretien coûteux si mal conçu.

— Génie végétal : Coût initial faible (plantes locales), mais nécessite du temps pour la croissance et un entretien régulier (arrosage, replantation).

2. Solution hybride : Utiliser un enrochement en pied de berge (ancrage à 60 cm, blocs de 1000 kg) pour résister aux crues intenses près des habitations, combiné à des plantations arbustives (e.g., saules, aulnes) sur le haut de la berge pour stabiliser le sol et restaurer l'écosystème. Justification : L'enrochement protège immédiatement les habitations contre les vitesses élevées (3 m/s), tandis que le génie végétal améliore la stabilité à long terme, réduit l'impact hydraulique (rugosité accrue) et restaure la biodiversité.

Exercice 4 : Dimensionnement d'un enrochement

Un cours d'eau présente une berge érodée sur une longueur de 50 m. La vitesse maximale de l'écoulement est de 2,5 m/s, et la hauteur d'eau en crue est de 1,8 m. L'abaque de dimensionnement indique que pour cette vitesse, la masse moyenne des blocs doit être de 1000 kg, avec un poids spécifique apparent sec de 2500 kg/m³.

Question :

1. Calculez le volume moyen d'un bloc d'enrochement.
2. Si l'enrochement couvre une épaisseur moyenne de 1,2 m sur toute la longueur de la berge, estimez le volume total de blocs nécessaire.

Solution :

3. Volume moyen d'un bloc : La masse moyenne d'un bloc est de 1000 kg, et le poids spécifique apparent sec est de 2500 kg/m³. Le volume V_b d'un bloc est donné par:

$$V_b = \frac{\text{masse}}{\text{poids spécifique}} = \frac{1000}{2500} = 0,4 \text{ m}^3$$

3. Volume total de blocs : L'enrochement couvre une longueur de 50 m, une hauteur de 1,8 m, et une épaisseur de 1,2 m. Le volume total V_t est:

$$V_t = \text{longueur} \times \text{hauteur} \times \text{épaisseur} = 50 \times 1,8 \times 1,2 = 108 \text{ m}^3$$

Réponse :

4. Le volume moyen d'un bloc est de **0,4m³**.
5. Le volume total de blocs nécessaire est de **108m³**.

Exercice 5: Stabilité d'un enrochement

Un enrochement est construit avec une pente de talus de 1:2 (1 unité verticale pour 2 unités horizontales). La force érosive exercée par le courant sur un bloc est estimée à 3000 N. La masse moyenne d'un bloc est de 1000 kg, et le coefficient de frottement entre les blocs et le sol est de 0,6.

Question :

1. Calculez la force de frottement maximale que peut supporter un bloc.
2. Vérifiez si le bloc reste stable face à la force érosive.

Solution :

1. Force de frottement maximale : La force de frottement maximale F_f est donnée par :

$$F_f = \mu \times N$$

Où $\mu = 0,6$ est le coefficient de frottement, et N est la force normale, égale au poids du bloc. Le poids P est:

$$P = m \times g = 1000 \times 9,81 = 9810 \text{ N}$$

Ainsi :

$$F_f = 0,6 \times 9810 = 5886 \text{ N}$$

2. Vérification de la stabilité : La force érosive est de 3000 N. Puisque $F_f = 5886 \text{ N} > 3000 \text{ N}$, le bloc reste stable.

Réponse :

1. La force de frottement maximale est de **5886N**.
2. Le bloc est stable, car la force de frottement dépasse la force érosive.

Exercice 6 : Pression hydraulique sur un enrochement

Un enrochement est soumis à une pression hydraulique due à une hauteur d'eau de 2 m. La densité de l'eau est de 1000 kg/m^3 , et l'accélération gravitationnelle est de $9,81 \text{ m/s}^2$. L'enrochement a une longueur de 30 m et une hauteur de 2 m.

Question :

1. Calculez la pression hydrostatique moyenne exercée sur l'enrochement.
2. Estimez la force totale exercée sur la surface de l'enrochement.

Solution :

1. Pression hydrostatique moyenne : La pression hydrostatique P_h à une profondeur h est donnée par :

$$P_h = \rho \times g \times h$$

La pression moyenne se calcule à la moitié de la hauteur de l'eau (1 m) :

$$P_h = 1000 \times 9,81 \times 1 = 9810 \text{ Pa}$$

2. Force totale : La force totale F_t est donnée par :

$$F_t = P_h \times A$$

Où A est la surface de l'enrochement exposée à la pression, soit $30 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 60 \text{ m}^2$.

$$F_t = 9810 \times 60 = 588600 \text{ N} = 588,6 \text{ kN}$$

Réponse :

1. La pression hydrostatique moyenne est de **9810 Pa**.
2. La force totale exercée est de **588,6 kN**.

Exercice 7 : Calcul du volume de gabions

Une protection de berge utilise des gabions de dimensions 2 m (longueur) \times 1 m (largeur) \times 1 m (hauteur). Pour protéger une berge de 40 m de long et 1,5 m de haut, les gabions sont empilés sur deux couches (hauteur totale de 2 m).

Question :

1. Calculez le volume d'un gabion.
2. Déterminez le nombre total de gabions nécessaires.

Solution :

1. Volume d'un gabion : Le volume V_g d'un gabion est :

$$V_g = \text{longueur} \times \text{largeur} \times \text{hauteur} = 2 \times 1 \times 1 = 2 \text{ m}^3$$

2. Nombre total de gabions : La surface à couvrir est de $40 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} = 60 \text{ m}^2$. Avec une hauteur de 2 m (deux couches de gabions de 1 m), le volume total V_t nécessaire est :

$$V_t = 40 \times 1,5 \times 1 = 60 \text{ m}^3$$

Le nombre de gabions N_g est :

$$N_g = \frac{V_t}{V_g} = \frac{60}{2} = 30$$

Réponse :

1. Le volume d'un gabion est de **2 m³**.
2. Le nombre total de gabions nécessaires est de 30.

Exercice 8 : Croissance végétale et stabilisation

Une berge est stabilisée par un tapis végétal de saule sur une surface de 100 m^2 . La densité de plantation est de 4 plants par m^2 , et chaque plant couvre $0,25 \text{ m}^2$ après un an de croissance. Le coût de plantation est de 5€ par plant.

Question :

1. Calculez le nombre total de plants nécessaires.
2. Calculez la surface totale couverte par les plants après un an.
3. Estimez le coût total de la plantation.

Solution :

1. Nombre total de plants : La densité est de 4 plants /m², et la surface est de 100 m². Le nombre de plants N_p est:

$$N_p = \text{densité} \times \text{surface} = 4 \times 100 = 400$$

2. Surface totale couverte : Chaque plant couvre 0,25 m², donc la surface couverte S_c est :

$$S_c = N_p \times \text{surface par plant} = 400 \times 0,25 = 100 \text{ m}^2$$

3. Coût total : Le coût par plant est de 5€, donc le coût total C_t est :

$$C_t = N_p \times \text{coût par plant} = 400 \times 5 = 2000\text{€}$$

Réponse :

2. Le nombre total de plants est de **400**.
3. La surface totale couverte après un an est de **100m²**.
4. Le coût total de la plantation est de **2000€**.

Exercice 9 : Réduction du taux d'érosion

Une berge non protégée subit une érosion de 0,3 m/an. Après la mise en place d'un enherbement, le taux d'érosion est réduit de 60%. La berge a une longueur de 50 m et une hauteur de 2 m.

Question :

1. Calculez le nouveau taux d'érosion après l'enherbement.
2. Estimez le volume de sol érodé sur 5 ans avec et sans enherbement.

Solution :

1. Nouveau taux d'érosion : Le taux d'érosion initial est de 0,3 m/an. Avec une réduction de 60%, le nouveau taux T_n est :

$$T_n = 0,3 \times (1 - 0,6) = 0,3 \times 0,4 = 0,12 \text{ m/an}$$

2. Volume de sol érodé : La surface de la berge est 50 m × 2 m = 100 m². - Sans enherbement : Volume érodé V_s sur 5 ans :

$$V_s = \text{surface} \times \text{taux} \times \text{temps} = 100 \times 0,3 \times 5 = 150 \text{ m}^3$$

- Avec enherbement : Volume érodé V_e sur 5 ans :

$$V_e = \text{surface} \times \text{taux} \times \text{temps} = 100 \times 0,12 \times 5 = 60 \text{ m}^3$$

Réponse :

1. Le nouveau taux d'érosion est de **0,12m/an**.
2. Le volume érodé sur 5 ans est de **150m³** sans enherbement et de **60m³** avec enherbement.

Exercice 10 : Comparaison des coûts des techniques

Pour protéger une berge de 60 m de long et 2 m de haut, deux options sont envisagées : un enrochement (coût de 150€/m³, volume estimé à 144 m³) et un tapis végétal (coût de 6€/m²).

Question :

Calculez le coût total de l'enrochement

1. Calculez le coût total du tapis végétal.
2. Comparez les coûts et déterminez la solution la moins chère.

Solution :

1. Coût de l'enrochement : Le volume est de 144 m³, et le coût est de 150€/m³. Le coût total C_e est:

$$C_e = 144 \times 150 = 21600\text{€}$$

Coût du tapis végétal : La surface est de 60 m × 2 m = 120 m², et le coût est de 6 €/m². Le coût total C_v est:

$$C_v = 120 \times 6 = 720\text{€}$$

2. Comparaison : Le coût de l'enrochement (21600€) est largement supérieur au coût du tapis végétal (720€). Le tapis végétal est donc la solution la moins chère.

Réponse :

1. Le coût de l'enrochement est de **21600€**.
2. Le coût du tapis végétal est de **720€**.
3. La solution la moins chère est le tapis végétal.

CHAPITRE VI

CHAPITRE VI. LES OUVRAGES DE CORRECTION TORRENTIELLE

6. 1. Introduction

Les crues torrentielles sont caractérisées par un important transport solide (rochers, arbres...) en provenance du lit du torrent et des versants montagneux. La gestion préventive des risques torrentiels repose largement sur des mesures de protection structurelles à travers d'ouvrages de correction torrentielle. Les matériaux transportés par les torrents en crue par charriage ou sous forme de laves torrentielles sont fréquemment issus des berges en glissement. Pour limiter les volumes de matériaux susceptibles de transiter vers l'aval, la construction de barrages de (consolidation dans ces zones de berges instables présente un intérêt stratégique important dans un dispositif de correction torrentielle.

Dans les bassins versants de montagne, les phénomènes torrentiels, de par leur caractère brutal et très rapide, présentent des risques importants pour les biens, les personnes et l'environnement. Afin de réduire ces risques, des mesures structurelles ont été mises en place, comme la construction de barrages de correction torrentielle. Il existe plusieurs ouvrages tel que :

- Ouvrages destinés à retenir les matériaux (blocs, branches, arbres...);
- Bassins de réception ;
- Barrages et seuils ;
- Renforcement et protection des berges.

6. 2. Rôle et fonctions des barrages de correction torrentielle

Dans le domaine des crues torrentielles, les ouvrages de correction tentent d'agir sur les mécanismes de production de matériaux solides dans le cadre de mesures dites « actives » ou bien de protéger directement les enjeux dans le cadre d'ouvrages dits « passifs » tels que les barrages de sédimentation (Figure 6.1).



Figure 6. 1. Barrage de consolidation.

6. 2. 1. Stratégies de correction torrentielle

Dans le cadre des mesures dites « structurelles » de prévention contre les risques torrentiels, les différentes stratégies de correction se distinguent par leurs objectifs, la localisation et la

nature des travaux associés. Les barrages de correction torrentielle, compte tenu de leur environnement géotechnique très spécifique, sont soumis aux actions suivantes :

- Actions dues au torrent (fluide à rhéologie complexe, présence éventuelle de blocs rocheux).
- Actions dues à la poussée des berges latérales

Si les actions dues au torrent sont de type dynamique, les secondes sont au contraire de type quasi-statique. Néanmoins, leur estimation demeure aujourd'hui un problème ouvert. Parmi les pathologies observées sur les barrages, certaines peuvent être imputées à l'action du fluide, et des éléments solides charriés ; mais la plupart doivent être cependant reliées à l'action des berges latérales, souvent dissymétrique, et orientée dans un plan différent de celui du barrage. L'action des berges conduit à des désordres qui sont de deux sortes :

■ Déplacements de corps rigide de l'ouvrage, par rapport aux berges (stabilité externe de l'ouvrage). On peut observer alors un basculement ou un enfoncement du barrage, parfois même un déplacement ou un basculement vers l'aval.

■ Apparition d'un réseau de fissures plus ou moins ouvertes (stabilité interne de l'ouvrage). Ces fissures sont souvent orientées à 45 degrés par rapport à la direction horizontale. Parfois, un réseau de fissures subhorizontales s'observe également.

Les stratégies de correction torrentielle varient selon leurs objectifs et leur localisation. Les mesures actives ciblent les zones d'érosion (ex. : berges en glissement, chenal instable) pour réduire la production de sédiments, tandis que les mesures passives protègent les infrastructures en aval par des barrages de sédimentation ou des bassins de réception. Les barrages sont soumis à deux types d'actions principales:

- **Actions dynamiques** : Forces exercées par le torrent, incluant le fluide à rhéologie complexe (mélange d'eau et de sédiments) et le charriage de blocs rocheux.
- **Actions quasi-statiques** : Poussée des berges latérales, souvent dissymétrique, due à l'instabilité des sols.

Ces actions peuvent provoquer des désordres tels que :

- **Stabilité externe** : Basculement, enfoncement ou déplacement de l'ouvrage.
- **Stabilité interne** : Apparition de fissures à 45° ou subhorizontales dans la structure.

6. 2. 2. Méthodologie de Conception

La conception d'un barrage suit une approche classique en génie civil :

- **Phénomène de référence** : Identifier la crue de référence (ex. : crue centennale, débit de $50 \text{ m}^3/\text{s}$).
- **Scénarios fonctionnels** : Définir si l'ouvrage résiste (barrage rigide) ou absorbe (bassin de réception).
- **Cas de charges** : Combiner les actions dynamiques et quasi-statiques dans un cadre bidimensionnel.
- **Stabilité externe** : Vérifier le glissement, le basculement et la capacité portante du sol.
- **Stabilité interne** : Analyser la résistance des matériaux (ex. : béton, enrochement).

Logiciels comme HEC-RAS (modélisation hydraulique) ou PLAXIS (analyse géotechnique) facilitent la vérification des équilibres.

6. 3. Typologie et fonctions des barrages de correction torrentielle

Les ouvrages de génie civil occupent encore une place essentielle dans les dispositifs de protection contre les risques liés aux crues torrentielles. Dans le cadre de travaux de correction active, les barrages de consolidation sont positionnés dans les tronçons fortement érodables. Du chenal d'écoulement pour limiter l'érosion longitudinale et les divagations du torrent. Les zones de berges en glissement constituent d'importantes zones d'apport de matériaux solides et constituent souvent des zones prioritaires d'implantation des barrages de correction torrentielle (figure 6. 2).

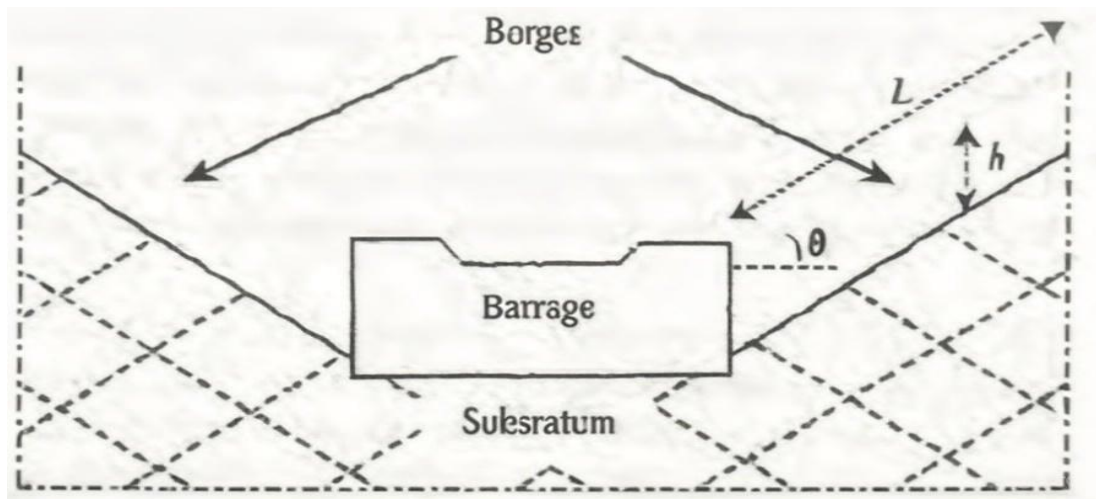


Figure 6. 2. Coupe schématique du barrage et des berges

- Améliorer l'efficacité structurelle des ouvrages ;
- Dimensionner et concevoir les ouvrages.

La démarche de conception globale d'un barrage de correction torrentielle suit une méthodologie classique en génie civil décomposée en plusieurs étapes. En phase projet, il s'agit donc successivement de choisir un (des) phénomène(s) de référence, de définir le principe de fonctionnement de la structure (résister, absorber) sous forme de scénarios fonctionnels, afin d'aboutir aux cas de charges. Ces cas de charges correspondent à des regroupements d'actions généralement envisagés dans un cadre bidimensionnel par simplification. La stabilité est analysée sur des sections d'ouvrage.

Pour dimensionner les barrages, il est essentiel de quantifier les actions dynamiques et quasi-statiques. La force dynamique F_d exercée par le courant est estimée par :

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A \quad (6.1)$$

Où ρ est la densité du fluide (kg/m^3), v la vitesse du courant (m/s), C_d le coefficient de traînée (typiquement 1,0 à 2,0 pour les blocs), et A la surface exposée (m^2). La poussée des berges latérales P est calculée par la théorie de la poussée des terres :

$$P = K_a \gamma h \quad (6.2)$$

Où K_a est le coefficient de poussée active (dépendant de l'angle de frottement interne du sol), γ le poids volumique du sol (kN/m^3), et h la hauteur de la berge (m).

Les actions sont ensuite quantifiées et combinées en fonction de leur nature permanente, variable ou accidentelle pour justifier les équilibres de stabilité externe (glissement, résistance du sol en fondation...) et de stabilité interne (résistance des éléments de la structure) selon des approches aux états-limites (ultime et de service). Des logiciels permettent de vérifier plus aisément ces équilibres. Cette phase fournit les premiers éléments de dimensionnement qui sont ensuite complétés par des dispositions dites « constructives ». Dans le contexte des risques naturels, ces dispositions constructives intègrent un savoir-faire et une certaine prudence en raison de la méconnaissance des phénomènes.

Les méthodes de dimensionnement des ouvrages sont généralement issues du domaine du génie civil classique (exemple d'une digue torrentielle). Les ouvrages de correction torrentielle se différencient des ouvrages classiques de génie civil en raison du contexte de sollicitation, des conditions de réalisation et des matériaux utilisés, surtout pour les ouvrages géotechniques où le sol prélevé sur place constitue le matériau de l'ouvrage.

6. 3. Typologie d'Ouvrages

Les ouvrages de correction torrentielle incluent :

- Barrages de consolidation : Implantés dans les zones érodables pour limiter l'érosion longitudinale.
- Bassins de réception : Retiennent les sédiments en aval pour protéger les enjeux.
- Seuils : Stabilisent le lit du torrent en réduisant la pente.
- Protections de berges : Complètent les barrages pour limiter l'apport de matériaux depuis les versants.

Figure 6.2 : Coupe schématique d'un barrage de correction torrentielle : montre les fondations, la structure en béton ou enrochement, et les berges latérales avec indication des forces (poussée hydrodynamique, poussée des terres).

Table 6.2. Les fonctions de types de l'ouvrage

Type d'ouvrage	Fonction	Contexte d'application
Barrage de consolidation	Limite l'érosion longitudinale	Tronçons à forte pente, berges instables
Bassin de réception	Retient les sédiments	Zones en aval proches des enjeux
Seuil	Réduit la pente du chenal	Torrents à forte énergie cinétique
Protection de berges	Stabilise les versants	Complément aux barrages

Analyser les pathologies pour mieux garantir la sûreté des ouvrages

L'analyse des pathologies des ouvrages constitue un des domaines les plus difficiles du génie civil nécessitant des compétences dans les trois domaines du dimensionnement d'ouvrages neufs (volet fonctionnel et structurel), du diagnostic de pathologies et de la réhabilitation d'ouvrages. En se basant sur les trois grandes catégories de défauts, le diagnostic des désordres doit conduire à caractériser un niveau de gravité des défauts.

L'homogénéité du diagnostic souvent réalisé par des personnes différentes requiert l'utilisation de méthodologies communes permettant de décrire et d'évaluer les défauts observés. Dans cet esprit, une première approche a été conduite dans le contexte des barrages de correction torrentielle pour proposer des grilles d'analyse par défaut, l'objectif étant de définir un niveau de gravité global, en termes structurels, pour l'ouvrage.

6. 4. Considérations Écologiques

Les barrages de correction torrentielle, bien qu'efficaces pour limiter l'érosion et retenir les sédiments, peuvent perturber la continuité écologique en fragmentant les habitats aquatiques et en modifiant les débits. Pour atténuer ces impacts, des mesures comme les passes à poissons ou la végétalisation des abords (en lien avec les techniques douces du chapitre V) sont recommandées. La végétalisation, par exemple avec des saules, stabilise les berges et favorise la biodiversité tout en maintenant les interactions avec les nappes phréatiques.

6.5. Conclusions : Les ouvrages de correction torrentielle jouent un rôle essentiel dans la gestion des crues torrentielles, en limitant l'érosion longitudinale, en stabilisant les berges et en retenant les matériaux solides pour protéger les biens et les personnes en aval. Les barrages de consolidation, bassins de réception, seuils et protections de berges, qu'ils soient actifs ou passifs, répondent à des objectifs spécifiques selon les caractéristiques du torrent et des enjeux à protéger. Leur conception repose sur une méthodologie rigoureuse, intégrant l'analyse des actions dynamiques (fluide torrentiel, charriage) et quasi-statiques (poussée des berges), avec des outils comme HEC-RAS ou PLAXIS pour vérifier la stabilité. Cependant, ces ouvrages peuvent perturber la continuité écologique, nécessitant des mesures d'atténuation comme les passes à poissons ou la végétalisation, en complément des techniques douces. Les pathologies, telles que le basculement ou les fissures, soulignent l'importance d'un dimensionnement précis et d'un entretien régulier. Ainsi, une approche intégrée, combinant efficacité structurelle, considérations environnementales et maintenance proactive, est cruciale pour garantir la durabilité et la sûreté des ouvrages face aux risques torrentiels.

APPLICATIONS NUMERIQUES – CHAPITRE IV : LES OUVRAGES DE CORRECTION TORRENTIELLE

Exercice 1 — Rôle et typologie des ouvrages

On souhaite protéger un village situé en aval d'un petit bassin versant montagneux exposé aux crues torrentielles.

1. Citez les principaux types d'ouvrages de correction torrentielle et leur rôle.
2. Expliquez pourquoi l'on choisit parfois un barrage de sédiments plutôt qu'un canal de dérivation.

Solution indicative :

1. Types d'ouvrages :
 - Barrages de sédiments (ou digues de crue) : retiennent les sédiments et l'énergie des crues.
 - Canaux ou dérivations : dirigent le flux torrentiel hors des zones habitées.
 - Buses ou galeries : canalisent le torrent sous les routes ou zones sensibles.
 - Enrochements et gabions : stabilisent les berges et empêchent l'érosion.
2. Un barrage de sédiments est choisi pour retenir à la fois l'eau et les sédiments, limitant l'érosion et protégeant en amont, tandis qu'un canal de dérivation transporte simplement le torrent vers l'aval, ce qui peut déplacer le problème.

Exercice 2 — Dimensionnement d'un barrage de sédiments

Un torrent de montagne a un débit maximum estimé à $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un transport solide important. On veut dimensionner un barrage de sédiments.

1. Quels sont les paramètres principaux à considérer pour le dimensionnement ?
2. Estimez la hauteur du barrage si l'on souhaite retenir un volume de sédiments de 5000 m^3 , sur une largeur de 20 m.

Solution indicative :

1. Paramètres : débit de pointe, volume de sédiments, pente, granulométrie, fondation, sécurité contre la rupture.
2. Hauteur approximative :

$$V=L \times B \times H \Rightarrow H=V/L \times B=5000/20 \times 20=12.5 \text{ m}$$

Exercice 3- Dimensionnement d'un barrage

Un barrage de consolidation doit retenir 600 m^3 de sédiments. Le chenal a une largeur de 8 m, et la hauteur du barrage est de 4 m. La section est trapézoïdale avec une pente de 1:2.

Question : Calculez la longueur nécessaire du barrage. Solution : Volume :

$$V = \frac{1}{2} \times (B_{\text{haut}} + B_{\text{bas}}) \times h \times L$$

$$B_{\text{bas}} = 8 \text{ m}, h = 4 \text{ m}, B_{\text{haut}} = 8 + 2 \times 4 \times 2 = 24 \text{ m}.$$

$$600 = \frac{1}{2} \times (24 + 8) \times 4 \times L \Leftrightarrow 600 = 64L \Leftrightarrow L \approx 9,38 \text{ m}$$

Réponse : La longueur nécessaire est de 9,4m.

Exercice 4- Poussée hydrodynamique

Un barrage est soumis à un courant de vitesse 3 m/s, avec une densité de fluide de 1200 kg/m³ (eau + sédiments). La surface exposée est de 20 m², et $C_d = 1,5$.

Question : Calculez la force hydrodynamique exercée.

Solution:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A = \frac{1}{2} \times 1200 \times 3^2 \times 1,5 \times 20 = 81000 \text{ N} = 81 \text{ kN}$$

Réponse : La force hydrodynamique est de 81 kN.

Exercice 5- Dimensionnement d'un barrage trapézoïdal

Un barrage de consolidation doit retenir 800 m³ de sédiments dans un chenal de 12 m de large, avec une hauteur de 5 m . La section est trapézoïdale avec une pente de 1:2.

Question : Calculez la longueur nécessaire du barrage. Arrondissez au dixième. Solution : Le volume retenu est donné par :

$$V = \frac{1}{2} \times (B_{\text{haut}} + B_{\text{bas}}) \times h \times L$$

Où $B_{\text{bas}} = 12 \text{ m}$, $h = 5 \text{ m}$, et $B_{\text{haut}} = 12 + 2 \times 5 \times 2 = 32 \text{ m}$.

$$800 = \frac{1}{2} \times (32 + 12) \times 5 \times L \Leftrightarrow 800 = 110L \Leftrightarrow L = \frac{800}{110} \approx 7,27 \text{ m}$$

Arrondi : 7,3 m.

Réponse : La longueur nécessaire est de 7,3 m.

Exercice 6- Force hydrodynamique sur un barrage

Un barrage est soumis à un courant de vitesse 4 m/s, avec une densité de fluide de 1300 kg/m³ (eau + sédiments). La surface exposée est de 25 m², et le coefficient de traînée $C_d = 1,8$.

Question : Calculez la force hydrodynamique exercée sur le barrage (en kN). Arrondissez au dixième.

Solution : La force hydrodynamique F_d est :

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$

$$F_d = \frac{1}{2} \times 1300 \times 4^2 \times 1,8 \times 25 = 0,5 \times 1300 \times 16 \times 1,8 \times 25 = 468000 \text{ N} = 468 \text{ kN}$$

Arrondi : 468,0kN. Réponse : La force hydrodynamique est de **468,0 kN**.

Exercice 7- Poussée des berges latérales

Une berge exerce une poussée quasi-statique sur un barrage de hauteur 6 m. Le poids volumique du sol est $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, et le coefficient de poussée active $K_a = 0,3$. Calculez la poussée totale exercée par la berge sur une longueur de 10 m (en kN).

Solution : La poussée des terres P est :

$$P = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 \times L$$

$$P = \frac{1}{2} \times 0,3 \times 18 \times 6^2 \times 10 = 0,5 \times 0,3 \times 18 \times 36 \times 10 = 972 \text{ kN}$$

Réponse : La poussée totale est de **972 kN**.

Exercice 8- Stabilité contre le glissement

Un barrage de masse 50000 kg est soumis à une force horizontale de 200 kN due au courant. Le coefficient de frottement entre le barrage et le sol est $\mu = 0,7$, et l'accélération gravitationnelle est $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Question : Vérifiez si le barrage est stable contre le glissement (coefficient de sécurité $FS > 1,5$).

Solution : La force de frottement maximale F_f est :

$$F_f = \mu \times N = \mu \times m \times g = 0,7 \times 50000 \times 9,81 = 343350 \text{ N} = 343,35 \text{ kN}$$

Le coefficient de sécurité FS est :

$$FS = \frac{F_f}{\text{Force horizontale}} = \frac{343,35}{200} \approx 1,72$$

Puisque $1,72 > 1,5$, le barrage est stable.

Réponse : Le barrage est stable avec $FS \approx 1,72$.

Exercice 9- Volume de sédiments dans un bassin de réception

Contexte : Un bassin de réception a une section rectangulaire de 15 m de large et 3 m de haut, sur une longueur de 20 m . Question : Calculez le volume maximal de sédiments que le bassin peut retenir (en m^3). Solution : Le volume V est :

$$V = \text{largeur} \times \text{hauteur} \times \text{longueur} = 15 \times 3 \times 20 = 900 \text{ m}^3$$

Réponse : Le volume maximal est de **900m³**.

Exercice 10- Érosion longitudinale réduite

Un torrent non contrôlé érode 0,4 m/an de son chenal. Un barrage de consolidation réduit ce taux de 70%. Le chenal a une largeur de 10 m et une longueur de 50 m.

Question :

1. Calculez le nouveau taux d'érosion.
2. Estimez le volume de sol épargné sur 5 ans grâce au barrage.

Solution :

1. Nouveau taux d'érosion:

$$T_n = 0,4 \times (1 - 0,7) = 0,4 \times 0,3 = 0,12 \text{ m/an}$$

2. Volume épargné : Volume érodé sans barrage :

$$V_s = \text{largeur} \times \text{longueur} \times \text{taux} \times \text{temps} = 10 \times 50 \times 0,4 \times 5 = 1000 \text{ m}^3$$

Volume érodé avec barrage:

$$V_e = 10 \times 50 \times 0,12 \times 5 = 300 \text{ m}^3$$

Volume épargné :

$$V_{\text{épargné}} = V_s - V_e = 1000 - 300 = 700 \text{ m}^3$$

Réponse :

1. Le nouveau taux d'érosion est de **0,12m/an**.
2. Le volume épargné sur 5 ans est de **700m³**.

Exercice 11- Dimensionnement d'un seuil

Un seuil est construit pour réduire la pente d'un torrent de 10 m de large et 2 m de haut. La section est rectangulaire, et le seuil doit retenir 200 m³ de sédiments. Question : Calculez la longueur nécessaire du seuil. Solution : Le volume est :

$$V = \text{largeur} \times \text{hauteur} \times \text{longueur}$$
$$200 = 10 \times 2 \times L \Rightarrow L = \frac{200}{20} = 10 \text{ m}$$

Réponse : La longueur nécessaire est de **10 m**.

Exercice 12- Coût d'un barrage de consolidation

Un barrage de consolidation nécessite 150 m³ de béton à 120€/m³ et 100 m³ d'enrochement à 80€/m³. Question : Calculez le coût total de construction. Solution : Coût du béton :

$$C_b = 150 \times 120 = 18000\text{€}$$

Coût de l'enrochement:

$$C_e = 100 \times 80 = 8000\text{€}$$

Coût total:

$$C_t = C_b + C_e = 18000 + 8000 = 26000\text{€}$$

Réponse : Le coût total est de **26000€**.

Exercice 13- Stabilité contre le basculement

Un barrage de 4 m de haut et 10 m de large est soumis à une poussée hydrodynamique de 150 kN appliquée à 1,5 m du sol. La masse du barrage est de 60000 kg, et son centre de gravité est à 2 m du sol.

Question : Vérifiez la stabilité contre le basculement (coefficient de sécurité $FS > 1,5$).

Solution: Moment de renversement M_r :

$$M_r = F \times d = 150 \times 10^3 \times 1,5 = 225000\text{Nm}$$

Moment de stabilité M_s (poids du barrage) :

$$M_s = m \times g \times d_g = 60000 \times 9,81 \times 5 = 2943000\text{Nm}$$

Où $d_g = 5$ m (distance horizontale du centre de gravité à l'axe de basculement). Coefficient de sécurité:

$$FS = \frac{M_s}{M_r} = \frac{2943000}{225000} \approx 13,08$$

Puisque $13,08 > 1,5$, le barrage est stable. Réponse : Le barrage est stable avec $FS \approx 13,08$.

Exercice 14- Impact écologique d'un barrage

Un barrage bloque 80% des migrations piscicoles. Une passe à poissons est installée, augmentant la proportion de poissons passant à 70%. La population initiale est de 1000 poissons.

Question :

1. Calculez le nombre de poissons bloqués sans passe à poissons.
2. Calculez le nombre de poissons passant avec la passe à poissons.

Solution :

1. Poissons bloqués sans passe: $N_b = 1000 \times 0,80 = 800$
2. Poissons passant avec passe: $N_p = 1000 \times 0,70 = 700$

Réponse :

2. Sans passe, **800** poissons sont bloqués.
3. Avec passe, **700** poissons passent.

CHAPITRE VII

CHAPITRE VII. AMENAGEMENT DES SOLS ET LUTTE CONTRE L'ÉROSION HYDRIQUE

7.1. Introduction

La lutte contre l'érosion hydrique repose sur une approche ciblée qui distingue deux zones clés au sein d'un bassin versant (Figure 7.1) : la **zone émettrice de ruissellement**, généralement située sur les plateaux ou impluviums, où les précipitations s'écoulent rapidement en raison de la pente ou de la faible infiltration, et la **zone sensible**, souvent en fond de vallée ou talweg, où l'eau s'accumule et favorise l'érosion par incision ou concentration. Ces deux zones nécessitent des stratégies adaptées : des mesures agronomiques préventives pour limiter le ruissellement à la source (techniques culturales comme la couverture du sol ou le non-labour) et des aménagements hydrauliques curatifs pour gérer les écoulements et protéger les zones vulnérables (bandes enherbées, bassins de rétention). En priorité, les techniques agronomiques sont privilégiées dans les régions agricoles, car les modifications de la structure du sol, souvent dues aux pratiques culturales, sont à l'origine de l'érosion. Les aménagements hydrauliques interviennent en complément pour atténuer les conséquences du ruissellement, notamment lors de pluies intenses. Une gestion efficace repose sur une analyse précise des caractéristiques du bassin versant et une combinaison judicieuse des deux approches pour minimiser les impacts environnementaux et économiques.

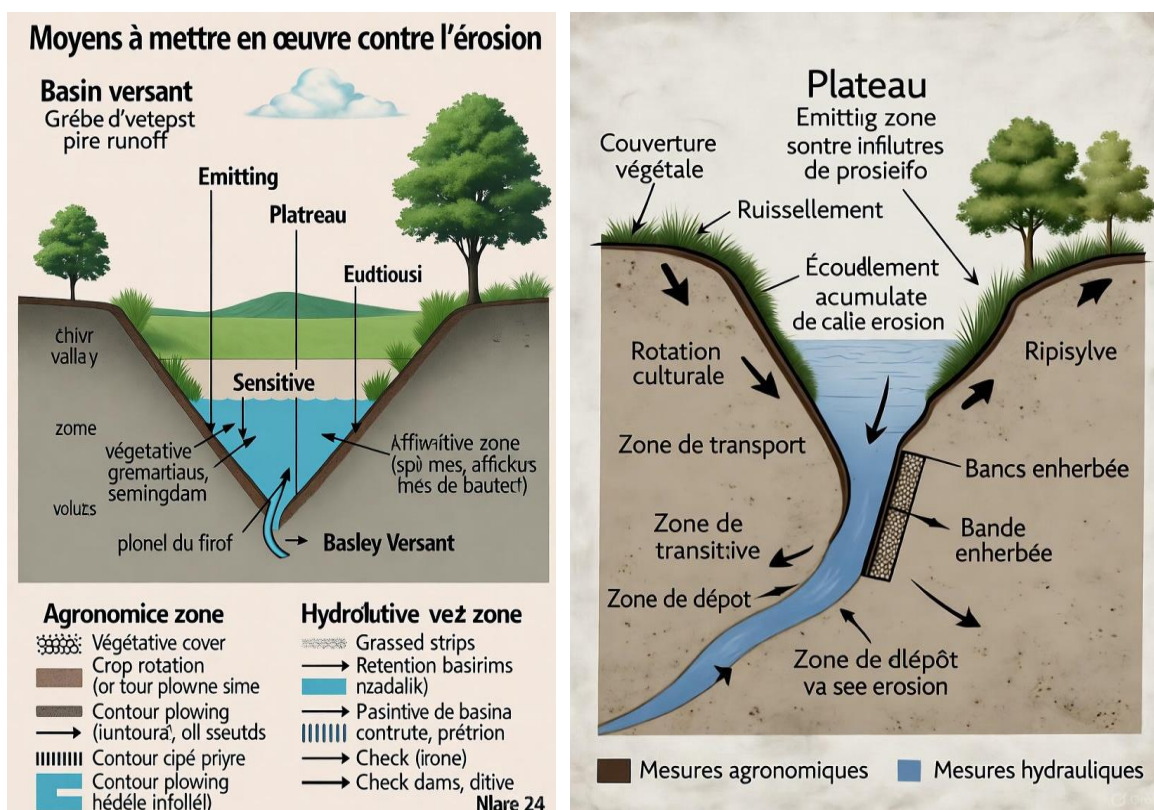


Figure 7. 1. Moyens à mettre en œuvre contre l'érosion.

Deux aspects sont donc à prendre en compte :

- L'aspect agronomique (préventif) qui englobe les techniques culturales :
 - couverture du sol,
 - structure du sol,

- L'aspect hydraulique (curatif) : aménagements divers...

Il convient d'agir en priorité sur le premier (techniques culturales) car on considérera que dans la région à dominante agricole, il est à l'origine même de l'érosion, le second aspect n'intervenant que pour limiter les conséquences engendrées par le travail du sol. En fait toute modification de la structure du sol entraîne une variation de sa stabilité dans le temps et de son comportement vis à vis des précipitations.

7.2. Les techniques culturales

7.2.1. Diminuer l'impact des gouttes de pluie

L'effet des pratiques culturales n'est pas facile à calculer. Néanmoins, tous les experts s'accordent à dire qu'il est possible de réduire d'au moins 1 mm les volumes de ruissellement sur les terres labourées, ceci rapporté à la surface du bassin versant peut-être considérables.

7.2.2. Non déchaumage pendant l'interculture

Il permet de maintenir un effet de "mulch" (couverture végétale morte) qui diminue fortement l'impact des précipitations, le sol n'étant pas travaillé, il reste résistant aux incisions. Pour les récoltes de fin de printemps il permet entre autres de garder l'humidité du sol pour la restituer en été. Il est principalement recommandé dans les zones de concentration ou tout ameublissement du sol est à proscrire et dans les zones de fortes pentes et de ruptures de pentes.

7.2.3. Non labour

Il présente deux effets opposés selon sa position géographique, sur le plateau (impluvium) ou dans la vallée (zone de concentration du ruissellement). En effet il permet de garder un sol compact et peu sensible à l'arrachement dans la zone de ruissellement concentré (située en général en fond de vallée), il favorise au contraire le ruissellement si la parcelle est située sur l'impluvium du fait de sa faible capacité d'infiltration.

7.2. 4. Cultures intermédiaires

Outre le fait de diminuer l'impact des gouttes de pluies, le couvert végétal constitue un excellent piège à nitrate. Il existe quatre techniques d'implantation :

- semis sous couvert avant récolte du blé ;
- semis sur chaumes sans travail du sol ultérieur ;
- semis sur chaumes avant déchaumage, juste après récolte ;
- semis sur chaumes avant déchaumage trois semaines après récolte.

Exemple : (implantation en août) seigle, radis, moutarde, phacélie, vesce, ray-grass d'Italie (RGI), ray-grass d'Angleterre fourrage (RGA), RGA gazon, ces deux derniers étouffent difficilement les mauvaises herbes. Après le 15 septembre l'efficacité du couvert diminue, leur destruction s'effectue avant le mois de janvier.

Intérêts des semis d'engrais vert :

- Hydraulique (limite le ruissellement en protégeant le sol de la battance et piège les sédiments dans la parcelle)
- Agronomique (améliorent la structure du sol pendant la végétation et temporairement après enfouissement, facilite la décomposition des pailles)
- Economique (limitent le drainage de l'azote pendant l'hiver, facilite le travail du sol, améliorent les rendements de la culture suivante.

7. 3. Augmenter la capacité d'infiltration et de stockage à la surface du sol

7. 3.1. Travail du sol

Le déchaumage intervient surtout pour les grandes parcelles à sol compact susceptibles de concentrer l'eau. Contrairement au non déchaumage il sert avant tout à faciliter la décomposition des résidus de récolte (en appliquant un premier mélange avec le sol) et à détruire les graines et les adventices laissés sur le sol. L'application du déchaumage et du non-déchaumage dépend beaucoup du type de sol, de la culture implantée et des conditions météorologiques.

Le sous solage (ou décompactage) pour éclater la semelle de labour et/ou les zones de tassement pour créer une zone de fissuration et d'infiltration de l'eau, et ainsi retarder l'apparition du ruissellement.

7.3.2. Utilisation d'équipements permettant de répartir les charges des engins

Le tassement du sol par les engins agricoles est un facteur défavorable, les traces servent fréquemment de réseau de collecteur des eaux de ruissellement. L'importance des tassements et des ornières varie selon le matériel utilisé (tasse-avant, roues jumelées, pneus larges...).

7.3.3. Favoriser les céréales d'hiver aux cultures de printemps (betteraves et pomme de terre).

Elles permettent d'obtenir un couvert végétal susceptible de freiner l'impact des précipitations fréquentes en hiver, et d'absorber le surplus d'azote susceptible de ruisseler vers les cours d'eau. Mais la rentabilité reste l'une des préoccupations majeures des agriculteurs et constitue souvent un frein à leur mise en place.

7.4. Consolider le sol

7.4.1. Par l'apport de matières organiques

Elles favorisent l'agrégation des particules entre elles et améliorent la stabilité structurale en agissant sur la mouillabilité (favorisent l'infiltration de l'eau), et en limitant la battance et la prise en masse des couches labourées.

7.4.2. Par l'amendement calcique

Nécessaire à la floculation du complexe argilo-humique ; il faut maintenir un taux de calcaire d'au moins 3 % et un pH entre 7,5 et 7,8 sachant que la consommation annuelle est d'environ

0,5 à 1 tonne par hectare de carbonate de calcium. Il donne au sol une structure plus stable, moins apte à produire une croûte de battance.

7.4.3. Favoriser le tassement sur les zones de passage d'eau

Pour constituer une bande de sol compact et ainsi augmenter la résistance du sol et la largeur d'étalement de l'écoulement. La limite de cette méthode dépend de la pente qui doit être inférieure à 2-3 % et des débits qui doivent être faibles.

7.4.4. Eviter l'affinement excessif

Pour éviter la formation de la croûte de battance en travaillant sur sol bien ressuyé, en limitant les passages et en regroupant les outils (peu agressifs et adaptés au type de sol).

7.5. Empêcher la concentration des eaux

7.5.1. Taille, forme et orientation des parcelles et des travaux qu'elles induisent

Un travail perpendiculaire à la pente évite l'accumulation de l'eau au fond de la parcelle en même temps qu'il limite la prise de vitesse de l'eau lors du ruissellement. En diminuant son énergie cinétique, il diminue aussi les risques d'incisions ou de coulées de boue.

7.5.2. Eviter le tassement du sol à l'intérieur des parcelles par les engins agricoles

Le risque de ruissellement augmente fortement avec le pourcentage de surface tassée et le degré de tassement.

7.5.3. Alternier les cultures sur un bassin versant : assolement judicieux et en commun. Les agriculteurs organisent leurs successions culturales à partir d'assolement comme la betterave, la pomme de terre ou le maïs. Il s'agit dans l'ensemble d'une rotation triennale avec de temps à autres l'introduction en fin de succession du lin ou du maïs. Pour les assolements qui favorisent les sols nus en hiver avec des chantiers de semis à risque au printemps, il est conseillé d'introduire des cultures intermédiaires pour couvrir la surface, réduisant ainsi fortement les risques d'érosion et de ruissellement (pratique particulièrement développée chez les grosses exploitations légumières).

7.6. Reconversion des terres

Les mesures agro-environnementales : Elles consistent, pour l'agriculteur volontaire, à mettre en place, dans les zones génératrices de ruissellement, le maximum de cultures d'hiver ou de couvert végétal, afin de protéger les sols contre l'érosion hivernale et les déperditions d'éléments fertilisants. Plusieurs types de contrats existent avec des conditions particulières d'éligibilité.

7.7. Les aménagements hydrauliques

Dans les situations à pluviométrie extrême et l'absence d'effort des agriculteurs, les mesures agronomiques ne suffisent pas toujours, et une action complémentaire au moyen

d'aménagements hydrauliques s'impose. Ils sont placés le plus en amont possible des phénomènes d'érosion et de ruissellement pour permettre de canaliser et stocker l'eau excédentaire, c'est leur succession le long de la pente qui sera le gage de leur efficacité.

7.7. 1. Méthode de travail pour une étude d'aménagement hydraulique

L'approche pour estimer les volumes de ruissellement et les débits reposent sur une connaissance précise du terrain et une adaptation la plus étroite possible des risques à chaque bassin versant. Ces méthodes sont souvent utilisées par les bureaux d'études afin de dimensionner les ouvrages nécessaires pour contenir successivement le long d'un bassin versant les eaux de ruissellement et limiter ainsi l'érosion. Elles s'appuient sur des analyses d'intensité de pluie, sur des choix de coefficient de ruissellement, sur des estimations de temps de concentration, sur des estimations de débits et de volumes ruisselés.

Les aménagements généralement proposés sont prévus pour lutter contre les phénomènes chroniques. Ils ne sont pas dimensionnés pour faire face à des événements de fréquence rare, mais au mieux, de fréquence décennale (pluie apparaissant statistiquement une année sur dix). Un niveau de protection supérieur exige des ouvrages de capacités plus importantes donc des emprises plus vastes.

7.7.2. Limiter les volumes de ruissellement

7.7.2.1. La bande enherbée

Elle peut de jouer un double rôle : elle permet de lutter à la fois contre l'érosion et contre les pollutions des cours d'eau par les produits phytosanitaires d'origines agricoles et le ruissellement des matières en suspension. La localisation des bandes enherbées répond à plusieurs principes.

7.7.2.2. Dissociation zones émettrices amonts et zones de pente

En fonction du sens du travail du sol, le plateau va diriger le ruissellement vers les fourrières (zone où l'agriculteur relève les outils de la machine lors de son passage). Pour éviter la concentration de l'eau en fonds de talweg, des bandes enherbées et des fossés de rétention sont installés sur toute la longueur correspondant à la zone de collecte du ruissellement.

7.7.2.3. Limiter la concentration du ruissellement et créer des zones de dépôts

Ces ouvrages de stockage du ruissellement situées en général à l'interface entre les terres cultivées et les zones urbanisées n'ont pas d'effet sur l'érosion elle-même (si elles sont bien entretenues) mais sert seulement à la contenir (Figure 7.2).

- les plis ou modelés.
- les barrages en balles de paille.
- les diguettes avec fossés de stockage. - les mares tampons.
- les talus et bandes boisées.

- les haies.
- les banquettes d'absorption-diffusion.
- les bandes enherbées qui empêchent l'arrachement du sol sur les passages en eau.

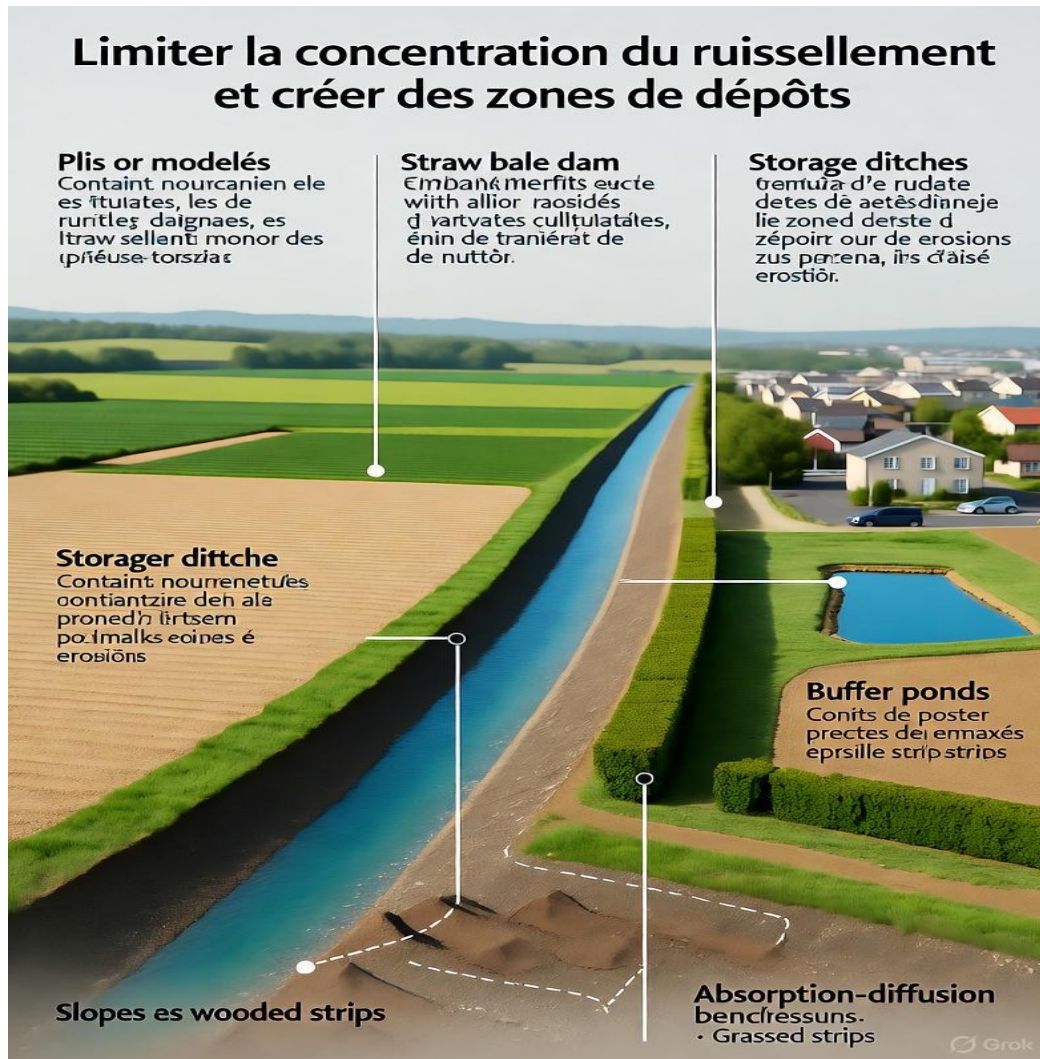


Figure 7. 2. Ouvrages de stockage à l'interface agricole-urbaine

En jouant le rôle de barrière et en déviant les écoulements, les haies peuvent protéger une partie des surfaces du bassin versant. Elles peuvent favoriser l'infiltration des nitrates avec d'autres produits phytosanitaires et donc leur piégeage, mais cela dépend beaucoup des pratiques culturales. Des risques existent selon le mode d'implantation de ces ouvrages. La maîtrise de l'évacuation des eaux est primordiale, elle dépend beaucoup de l'entretien des aménagements.

7.7.2.4. Ouvrages pour protéger les chemins d'eau et organiser l'écoulement

- Chenal enherbé : Il sert à acheminer l'eau en évitant l'incision et permet d'éviter le caractère boueux aux inondations. Il permet aussi de filtrer les matières en suspension en créant des dépôts. Les résidus de fauche sont destinés au compostage ou à l'incinération mais en aucun cas ils ne doivent servir pour l'alimentation animale.

- Fossés de drainage (ou barrages filtrants) et ouvrages de canalisation. Ils peuvent faire office de bassins de rétention, puisque l'eau est ralentie et donc en partie stockée à l'amont des aménagements.
- Réseau hydraulique cohérent.

Tous ces ouvrages correspondent néanmoins à des actions limitées et apparaissent comme des solutions secondaires et coûteuses, d'où l'intérêt de développer les actions préventives agronomiques.

7.7.2.5. Ouvrages pour protéger les zones bâties des inondations

Il s'agit en général d'ouvrages de grandes dimensions pouvant supporter des volumes d'eau engendrés par des pluies décennales ou centennales.

- Bassin de rétention. - Les bassins d'orages- Aménagement des exutoires pour une bonne répartition des eaux en aval.

Pour les secteurs urbanisés

Ralentir le transit des eaux de ruissellement par des bassins de rétention (coûts d'entretien élevé).

- Suivre le développement des surfaces imperméabilisées (toitures, routes, parking, trottoirs...) pour contrôler la vitesse de ruissellement.

7.8. Conclusions :

La lutte contre l'érosion hydrique nécessite une approche intégrée combinant des mesures agronomiques préventives et des aménagements hydrauliques curatifs, adaptées aux zones émettrices de ruissellement et aux zones sensibles d'accumulation. Les techniques culturales, telles que le non-déchaumage, le non-labour, les cultures intermédiaires et l'apport de matières organiques, jouent un rôle clé en réduisant l'impact des précipitations, en améliorant la structure du sol et en augmentant sa capacité d'infiltration, tout en offrant des bénéfices agronomiques et économiques comme le piégeage des nitrates et l'amélioration des rendements. Les aménagements hydrauliques, tels que les bandes enherbées, les fossés de drainage, les haies ou les bassins de rétention, complètent ces mesures en limitant la concentration des écoulements et en protégeant les zones urbanisées contre les inondations, bien qu'ils soient souvent coûteux et secondaires par rapport aux actions préventives. Une gestion efficace repose sur une analyse précise des caractéristiques du bassin versant (intensité pluviométrique, coefficient de ruissellement, temps de concentration) et sur une coordination des pratiques agricoles et des ouvrages pour minimiser l'érosion et ses impacts environnementaux. Ainsi, privilégier les solutions agronomiques, soutenues par des aménagements hydrauliques ciblés, permet une gestion durable des sols face aux risques d'érosion hydrique.

APPLICATIONS NUMERIQUES – CHAPITRE VII : AMENAGEMENT DES SOLS ET LUTTE CONTRE L'ÉROSION HYDRIQUE

Exercices : Aménagement des Sols et Lutte contre l'Érosion Hydrique

Exercice 1 : Calcul du Ruissellement

Une parcelle agricole de 5 ha (50 000 m²) est soumise à une pluie de 30 mm/h pendant 1 heure. Le coefficient de ruissellement est de 0,4 (sol argileux, pente 5 %).

1. Calculez le volume total de ruissellement en m³.
2. Estimez la réduction du ruissellement si une couverture végétale est ajoutée, diminuant le coefficient à 0,2.

Solution

1. Volume de ruissellement initial : Précipitation : $P = 30 \text{ mm} = 0,03 \text{ m}$. Surface :

$S = 50\,000 \text{ m}^2$. Coefficient de ruissellement : $C = 0,4$. Volume $V = C \times P \times S = 0,4 \times 0,03 \times 50\,000 = 600 \text{ m}^3$.

2. Réduction avec couverture végétale : Nouveau coefficient : $C' = 0,2$. Nouveau volume : $V' = 0,2 \times 0,03 \times 50\,000 = 300 \text{ m}^3$. Réduction : $V - V' = 600 - 300 = 300 \text{ m}^3$ (50 % de réduction).

Explication : Le couvert végétal (e.g., paillage, cultures intermédiaires) réduit le ruissellement en augmentant l'infiltration et en diminuant l'impact des gouttes de pluie, comme indiqué dans le Chapitre VII.

Exercice 2 : Dimensionnement d'une Bande Enherbée

Une parcelle de 2 ha (20 000 m²) sur une pente de 10 % génère un ruissellement de 200 m³ après une pluie de 25 mm. Une bande enherbée est proposée pour réduire l'érosion hydrique. On estime qu'une bande enherbée de 5 m de large piège 80 % des sédiments.

1. Calculez le coefficient de ruissellement initial de la parcelle.
2. Si la bande enherbée est installée sur toute la largeur de la parcelle (100 m), estimez la quantité de sédiments piégés si la concentration en sédiments est de 10 g/L.

Solution :

1. Coefficient de ruissellement : Précipitation : $P = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$. Surface : $S = 20\,000 \text{ m}^2$. Volume précipité : $V_p = P \times S = 0,025 \times 20\,000 = 500 \text{ m}^3$. Volume ruisselé : $V_r = 200 \text{ m}^3$. Coefficient : $C = V_r / V_p = 200/500 = 0,4$.

2. Sédiments piégés : Volume ruisselé : $200 \text{ m}^3 = 200\,000 \text{ L}$. Masse de sédiments :

$M = 10 \text{ g/L} \times 200\,000 \text{ L} = 2\,000\,000 \text{ g} = 2\,000 \text{ kg}$. Sédiments piégés (80 %) : $M_t = 0,8 \times 2\,000 = 1\,600 \text{ kg}$.

Explication : La bande enherbée réduit l'érosion en piégeant les sédiments et en ralentissant le ruissellement, comme décrit dans le Chapitre VII (e.g., efficacité des bandes enherbées).

Exercice 3 : Évaluation de l'Érosion Sol

Une parcelle de 10 ha (100 000 m²) sur un sol limoneux (facteur d'érodabilité $K = 0,3$) est soumise à une pluie de 40 mm avec un facteur d'érosivité $R = 50 \text{ MJ } ^\circ\text{mm}/(\text{ha } ^\circ\text{h})$. La pente est de 8 % (facteur $LS = 1,2$), et la parcelle est labourée sans couvert végétal ($C = 1$). Une bande enherbée est ajoutée, réduisant C à 0,3. Utilisez la formule RUSLE : $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ (où $P = 1$, sans pratique anti-érosive supplémentaire). 1. Calculez la perte de sol annuelle (en t/ha/an) avant et après l'ajout de la bande enherbée. 2. Proposez une autre mesure pour réduire davantage l'érosion.

Solution :

1. Perte de sol : Avant la bande enherbée :

$$C = 1. A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P = 50 \cdot 0,3 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1 = 18 \text{ t/ha/an.}$$

— Après la bande enherbée : $C = 0,3$. $A' = 50 \cdot 0,3 \cdot 1,2 \cdot 0,3 \cdot 1 = 5,4 \text{ t/ha/an.}$

Réduction : $18 - 5,4 = 12,6 \text{ t/ha/an}$ (70 % de réduction).

2. Autre mesure : Adopter le non-labour (réduisant P à 0,5) pour minimiser le détachement des particules du sol, combiné à des cultures en rotation pour maintenir un couvert végétal permanent.

Explication : La formule RUSLE (Chapitre VII) quantifie l'érosion en intégrant les facteurs climatiques (R), pédologiques (K), topographiques (LS), et agronomiques (C, P). Les bandes enherbées et le non-labour sont des solutions efficaces pour réduire l'érosion.

Exercice 4: Calcul du volume de ruissellement

Une parcelle de 5000 m² reçoit une pluie de 20 mm. Le coefficient de ruissellement est de 0,3. Question : Calculez le volume de ruissellement en m³. Solution : Le volume de ruissellement V_r est donné par :

$$V_r = P \times A \times C_r$$

Où $P = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$, $A = 5000 \text{ m}^2$, $C_r = 0,3$.

$$V_r = 0,02 \times 5000 \times 0,3 = 30 \text{ m}^3$$

Réponse : Le volume de ruissellement est de **30m³**.

Exercice 5: Réduction du ruissellement par couvert végétal

Une technique culturale réduit le ruissellement de 1 mm sur une parcelle de 8000 m². Le coefficient de ruissellement initial est de 0,4 pour une pluie de 15 mm.

Question : Calculez le volume de ruissellement réduit en m³. Solution : Volume initial sans réduction :

$$V_i = P \times A \times C_r = 0,015 \times 8000 \times 0,4 = 48 \text{ m}^3$$

Réduction due au couvert : 1 mm = 0,001 m, donc :

$$V_r = 0,001 \times 8000 = 8 \text{ m}^3$$

Réponse : Le volume réduit est de **8m³**.

Exercice 6: Capacité d'infiltration

Une parcelle de 3000 m² a une capacité d'infiltration de 5 mm/h. Une pluie de 10 mm/h tombe pendant 2 heures. Question : Calculez le volume d'eau infiltré en m³.

Solution : Volume infiltré par heure : 5 mm = 0,005 m, donc :

$$V_i = 0,005 \times 3000 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$$

Sur 2 heures :

$$V_t = 15 \times 2 = 30 \text{ m}^3$$

Réponse : Le volume infiltré est de **30m³**.

Exercice 7 : Dimensionnement d'une bande enherbée

Une bande enherbée de 10 m de long et 2 m de large doit retenir 20 m³ de sédiments. La hauteur moyenne des sédiments est de 1 m.

Question : Vérifiez si la bande peut retenir tout le volume. **Solution :** Volume de la bande :

$$V_b = \text{longueur} \times \text{largeur} \times \text{hauteur} = 10 \times 2 \times 1 = 20 \text{ m}^3$$

Le volume retenu (20 m³) correspond exactement à la capacité de la bande.

Réponse : Oui, la bande peut retenir tout le volume.

Exercice 8 : Capacité d'un fossé de drainage

Un fossé de drainage a une section trapézoïdale avec une base de 1 m, une hauteur de 0,5 m, une pente latérale de 1:1, et une longueur de 15 m . Calculez le volume d'eau qu'il peut retenir en m³.

Solution : Largeur supérieure : 1 + 2 × 0,5 = 2 m. Aire de la section :

$$A = \frac{(1 + 2) \times 0,5}{2} = 0,75 \text{ m}^2$$

Volume :

$$V = A \times \text{longueur} = 0,75 \times 15 = 11,25 \text{ m}^3$$

Réponse : Le volume retenu est de **11,25m³**.

Exercice 9 : Impact du sous-solage

Le sous-solage augmente l'infiltration de 2 mm/h sur une parcelle de 4000 m². Une pluie de 12 mm/h dure 3 heures. Question : Calculez le volume supplémentaire infiltré en m³.

Solution :

Volume supplémentaire par heure : 2 mm = 0,002 m, donc :

$$V_s = 0,002 \times 4000 = 8 \text{ m}^3/\text{h} ; \text{ Sur 3 heures :}$$

$$V_t = 8 \times 3 = 24 \text{ m}^3$$

Réponse : Le volume supplémentaire est de **24m³**.

Exercice 10 : Coût d'un barrage en balles de paille

Un barrage nécessite 50 balles de paille à 5€ chacune et 10 m³ de terre à 20€/m³. Calculez le coût total en €.

Solution : Coût des balles : 50 × 5 = 250€ Coût de la terre : 10 × 20 = 200€ Coût total : 250 + 200 = 450€ Réponse : Le coût total est de **450€**.

Exercice 11 : Vitesse de ruissellement

Une pente de 5. Calculez la vitesse finale en m/s.

Solution : Augmentation sur 100 m: 100/10 × 0,1 = 1 m/s Vitesse finale : 0,5 + 1 = 1,5 m/s

Réponse : La vitesse finale est de 1,5 m/s.

Exercice 12 : Efficacité d'une haie

Contexte : Une haie réduit le ruissellement de 40 Question : Calculez le volume de ruissellement réduit en m³.

Solution : Volume initial :

$$V_i = 0,025 \times 6000 \times 0,35 = 52,5 \text{ m}^3$$

Réduction : 52,5 × 0,4 = 21 m³ Réponse : Le volume réduit est de 21 m³.

Exercice 13 : Dimensionnement d'un bassin de rétention

Un bassin doit retenir 100 m³ d'eau sur une surface de 50 m². La profondeur maximale est de 2 m.

Question : Calculez la longueur nécessaire du bassin, supposant une forme rectangulaire.

Solution : Volume : $V = \text{largeur} \times \text{longueur} \times \text{profondeur}$

$$100 = 50 \times \text{longueur} \times 2 \Leftrightarrow \text{longueur} = \frac{100}{100} = 1 \text{ m}$$

Réponse : La longueur nécessaire est de **1 m**.

Exercice 14: Dimensionnement d'un bassin de rétention

Une commune souhaite aménager un bassin de rétention pour limiter le risque d'inondation lors des fortes pluies. Le bassin doit pouvoir stocker le volume d'eau généré par une pluie de 50 mm sur un bassin versant de 10 ha. La pluie a une intensité telle que le coefficient de ruissellement est de 0,6.

Questions : 1. Calculer le volume d'eau à retenir. 2. Déterminer les dimensions du bassin si celui-ci doit avoir une profondeur moyenne de 3 m.

Solution:

1. **Calcul du volume d'eau à retenir** [$V = P S C_r$]

- P = hauteur de pluie = 50 mm = 0,05 m
- S = surface du bassin versant = 10 ha = 100 000 m²
- C_r = coefficient de ruissellement = 0,6

$$[V = 0,05 \cdot 100\,000 \cdot 0,6 = 3000]$$

Donc, le volume à retenir est **3 000 m³**.

2. **Calcul des dimensions du bassin** On considère une profondeur moyenne $H = 3$ m.
[$A = 1000$]

Si le bassin est rectangulaire, avec une longueur L et une largeur l , et en supposant $L = 2l$:
[$L l = 1000$] [$2l^2 = 1000$] [$l^2 = 500$] [$l = 22,36$] [$L = 44,72$]

Réponse : - Volume à retenir : 3 000 m³ - Dimensions approximatives du bassin : 44,7 m de longueur et 22,4 m de largeur pour une profondeur moyenne de 3 m.

CHAPITRE VIII

CHAPITRE VIII. APERÇU SUR L'IMPACT DES AMÉNAGEMENTS SUR L'ENVIRONNEMENT

8.1. Introduction :

Les aménagements du territoire, qu'ils soient urbains, agricoles ou industriels, constituent des interventions majeures sur les milieux naturels. S'ils permettent un développement économique et social, ces aménagements engendrent également des impacts notables sur l'environnement. Ce chapitre vise à présenter une vue d'ensemble des effets positifs et négatifs des aménagements sur les écosystèmes, les ressources naturelles et la qualité de vie.

8.2. Types d'aménagements

Les aménagements peuvent être classés en plusieurs catégories selon leur finalité :

- • Aménagements urbains : infrastructures routières, logements, zones commerciales.
- • Aménagements agricoles : irrigation, drainage, remembrement foncier.
- • Aménagements industriels : zones d'activités, barrages, ports, usines.
- • Aménagements touristiques : stations balnéaires, pistes de ski, parcs d'attraction.

8.3. Impacts environnementaux des aménagements

Les impacts des aménagements sur l'environnement peuvent être directs ou indirects, immédiats ou différés dans le temps. Ils concernent plusieurs composantes du milieu naturel :

- La dégradation des sols et la perte de biodiversité.
- La pollution de l'eau, de l'air et des sols.
- L'artificialisation des paysages et la fragmentation des habitats.
- Les émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique.
- Les nuisances sonores et visuelles.

8.4. Mesures d'atténuation et de gestion

Afin de réduire l'impact environnemental des aménagements, plusieurs mesures peuvent être mises en œuvre :

- • L'évaluation environnementale préalable des projets.
- • La compensation écologique et la restauration des milieux naturels.
- • La promotion des énergies renouvelables et des matériaux durables.
- • L'aménagement éco-responsable et la planification territoriale intégrée.

8.5. Interaction entre aménagements et environnement

Le schéma (Figure 8. 1) suivant met en lumière les relations dynamiques et multidirectionnelles entre les activités d'aménagement, les pressions qu'elles exercent sur l'environnement, et les réponses stratégiques permettant un développement durable. Les activités d'aménagement telles que la construction d'infrastructures ou l'expansion agricole, génèrent des pressions comme la pollution, la déforestation et les nuisances sonores, qui se traduisent par des impacts environnementaux affectant la biodiversité, le climat et la santé

humaine. Ces impacts, à leur tour, nécessitent des mesures d'atténuation telles que l'évaluation environnementale préalable, la compensation écologique et l'intégration de principes de durabilité, créant ainsi un cycle interactif visant à réduire les effets négatifs tout en soutenant le progrès sociétal.

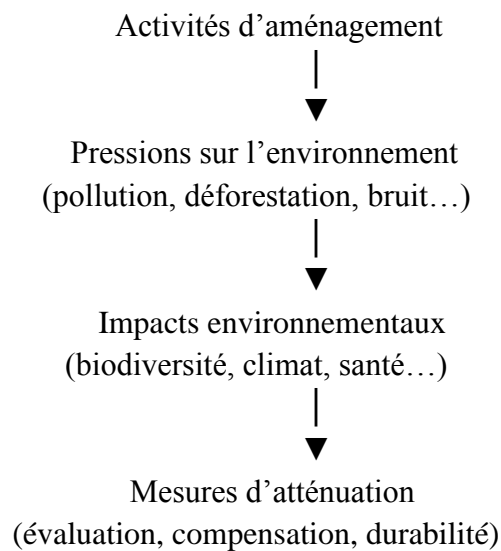


Figure 8.1. Interaction entre aménagements et environnement.

Les aménagements du territoire sont indispensables au développement des sociétés modernes, mais ils doivent être conçus dans une perspective de durabilité. La prise en compte systématique des impacts environnementaux, accompagnée de politiques d'atténuation efficaces, est essentielle pour garantir l'équilibre entre développement et préservation de l'environnement.

8.6. Conclusions :

Les aménagements du territoire, qu'ils soient urbains, agricoles, industriels ou touristiques, jouent un rôle crucial dans le développement économique et social, mais ils entraînent des impacts significatifs sur les écosystèmes, les ressources naturelles et la qualité de vie. La dégradation des sols, la perte de biodiversité, la pollution et l'artificialisation des paysages témoignent des pressions exercées par ces interventions, tandis que les émissions de gaz à effet de serre et les nuisances amplifient les enjeux environnementaux à l'échelle globale. Toutefois, des mesures d'atténuation, telles que l'évaluation environnementale préalable, la compensation écologique et l'adoption de pratiques éco-responsables, offrent des pistes pour limiter ces effets négatifs. Comme le montre le schéma des interactions entre aménagements, pressions et réponses, une planification intégrée et durable est indispensable pour concilier les besoins humains avec la préservation de l'environnement. Ainsi, un équilibre réfléchi entre développement et durabilité s'impose comme une priorité pour les générations futures.

ÉTUDE DE CAS : L'AMÉNAGEMENT HYDRAULIQUE ET URBAIN DE LA VILLE D'ALGER (ALGERIE)

Introduction Alger, capitale de l'Algérie, connaît une urbanisation et une croissance démographique rapides. Cette expansion nécessite des aménagements urbains et hydrauliques complexes pour répondre aux besoins en logement, en infrastructures et en gestion de l'eau. Cependant, ces aménagements ont des impacts significatifs sur l'environnement et exigent des mesures durables pour réduire les effets négatifs.

I. Description des aménagements

1. Aménagements urbains :

- Construction de nouveaux quartiers résidentiels et zones industrielles.
- Extension du réseau routier et création d'infrastructures commerciales.
- Développement des espaces verts et zones récréatives.

3. Aménagements hydrauliques:

- Construction et réhabilitation de barrages et réservoirs pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation.
- Amélioration des réseaux de drainage et de traitement des eaux usées pour limiter la pollution des rivières et de la baie d'Alger.
- Mise en place de systèmes de gestion des crues et de prévention des inondations dans les zones vulnérables.

II. Impacts environnementaux

2. Sur le sol:

- Artificialisation et compactage des sols, réduction des surfaces agricoles et naturelles.
Érosion accrue dans certaines zones en raison de l'urbanisation et des infrastructures hydrauliques.

2. Sur l'eau:

- Pollution des rivières et de la baie d'Alger par les rejets industriels et domestiques. Modification des régimes hydrologiques à cause des barrages et réseaux de drainage.

3. Sur la biodiversité :

- Fragmentation des habitats naturels et disparition d'espèces locales. Perturbation des écosystèmes aquatiques et terrestres.

4. Sur l'air et le climat :

- Augmentation des émissions de gaz à effet de serre liées à la circulation et aux activités industrielles.
- Contribution à l'effet d'îlot de chaleur urbain.

III. Mesures de mitigation et recommandations

- Renforcement de la planification urbaine intégrée pour concilier développement et protection environnementale.
- Mise en place de corridors écologiques et d'espaces verts urbains pour préserver la biodiversité.

- Optimisation de la gestion hydraulique : traitement efficace des eaux usées, réhabilitation des réseaux de drainage et contrôle des rejets industriels.
- Sensibilisation de la population et promotion de transports durables (transports en commun, vélo, covoiturage).
- Suivi environnemental et évaluations régulières des impacts des projets d'aménagement.

Conclusion : L'aménagement hydraulique et urbain à Alger illustre la complexité de concilier urbanisation, gestion de l'eau et protection de l'environnement. Une approche intégrée, basée sur des pratiques durables et la planification stratégique, est indispensable pour réduire les impacts environnementaux tout en répondant aux besoins croissants de la population.

EXPOSE 01 – CHAPITRE VIII : APERÇU SUR L'IMPACT DES AMENAGEMENTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Objectif de l'Exposé

Réaliser un exposé clair et structuré de 10 à 15 minutes sur le chapitre VIII, en expliquant les impacts des aménagements sur l'environnement, leurs types, les mesures d'atténuation, et les interactions avec les écosystèmes. L'exposé doit inclure des exemples concrets et une conclusion engageante.

Étapes de Préparation et Réalisation

Étape 1 : Compréhension du Sujet

Lisez attentivement le chapitre VIII pour identifier les sections clés : introduction, types d'aménagements, impacts environnementaux, mesures d'atténuation, et schéma des interactions. - Notez les idées principales : les aménagements (urbains, agricoles, industriels, touristiques) modifient les milieux naturels, avec des effets positifs (développement) et négatifs (pollution, perte de biodiversité). - Posez des questions pour clarifier : Quels exemples locaux ou actuels (octobre 2025) illustrent ces impacts ?

Étape 2 : Recherche Complémentaire

Consultez des sources fiables (livres, articles scientifiques, sites comme ceux de l'INRAE ou du ministère de l'Écologie) pour enrichir le contenu. - Cherchez des exemples récents : un projet d'infrastructure en France ou ailleurs, ou des initiatives d'aménagement durable (ex. : bassins de rétention verts). - Notez des statistiques ou données (ex. : pourcentage de sols artificialisés en Europe) pour appuyer vos arguments.

Étape 3 : Planification de l'Exposé

Structurez votre présentation en 4 parties : 1. ****Introduction (2 min) **** : Présentez le sujet, son importance (développement vs. Environnement), et annoncez le plan.

2. ****Types et Impacts des Aménagements (5 min) **** : Décrivez les catégories (urbaines, agricoles, etc.) et leurs effets (dégradation des sols, pollution, etc.) avec des exemples.

3. ****Mesures d'Atténuation (4 min) **** : Expliquez les solutions (évaluation environnementale, compensation écologique) et leur efficacité. 4. ****Conclusion et Discussion (2-3 min)**** : Résumez les points clés, proposez une réflexion (ex. : durabilité future), et ouvrez à des questions. - Prévoyez des transitions fluides entre les parties.

Étape 4 : Création des Supports Visuels

Préparez des diapositives (PowerPoint) avec : - Une diapositive d'introduction avec le titre et une image de paysage aménagé. - Une diapositive par catégorie d'aménagement avec exemples (ex. : photo d'une autoroute pour aménagements urbains). - Une diapositive sur les impacts avec un graphique (ex. : pourcentage

de biodiversité perdue). - Une diapositive sur les mesures avec le schéma d'interaction (Figure 8.1) redessiné ou adapté. - Une diapositive de conclusion.

Étape 5 : Répétition et Ajustement

Entraînez-vous à voix haute pour respecter le temps imparti (10-15 min). - Chronométrez chaque partie et ajustez si nécessaire (ex. : raccourcir les exemples si trop long). - Demandez à un camarade ou à un professeur de donner un retour sur la clarté et le rythme. - Préparez des notes brèves (pas de texte lu mot à mot) pour rester naturel.

Étape 6 : Présentation et Interaction

Le jour J, arrivez en avance avec vos supports (clé USB ou lien partagé). - Présentez avec assurance, en regardant l'audience, et utilisez un ton engageant. - Illustrez avec des gestes (ex. : montrer une pente pour l'érosion). - Réservez 2-3 minutes à la fin pour répondre aux questions des camarades ou du professeur. - Remerciez l'audience à la fin.

Conseils Pratiques

- Collaborez en groupe si autorisé : divisez les tâches (recherche, visuels, présentation).
- Citez vos sources à la fin de l'exposé (ex. : "Données issues de l'INRAE, 2025").
- Adaptez le niveau de détail selon votre public (lycéens, étudiants universitaires).

Exemple de Plan Détaillé

- **Introduction** : "Les aménagements transforment nos paysages, mais à quel prix pour l'environnement ? Nous verrons les types, impacts et solutions." - **Partie 1** : "Les aménagements urbains comme les autoroutes augmentent la pollution de l'air de 15 - **Partie 2** : "La compensation écologique a permis de restaurer 200 ha de zones humides en France ces dernières années." - **Conclusion** : "Et vous, pensez-vous que la durabilité est réalisable avec le développement actuel ?"

EXPOSE 02– CHAPITRE VIII : APERÇU SUR L'IMPACT DES AMENAGEMENTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Objectif de l'Exposé 2

Réaliser un exposé clair et informatif de 10 à 15 minutes pour présenter les impacts des aménagements (urbains, agricoles, industriels, touristiques) sur l'environnement, en explorant leurs types, effets, mesures d'atténuation, et interactions, avec des exemples pertinents jusqu'à octobre 2025.

Étapes à Suivre

Étape 1 : Compréhension Initiale du Chapitre

Lisez le chapitre VIII en entier, en notant les sections clés : introduction (8.1), types d'aménagements (8.2), impacts environnementaux (8.3), mesures d'atténuation (8.4), et interactions (8.5). - Identifiez les idées principales : les aménagements modifient les écosystèmes, avec des impacts positifs (développement) et négatifs (pollution, perte de biodiversité).

Étape 2 : Recherche Complémentaire

- Consultez des ressources fiables : livres de géographie, sites d'organisations environnementales (ex. : WWF, ADEME), ou articles récents de 2025. - Cherchez des cas concrets : par exemple, un projet d'aménagement urbain en France ou une initiative de compensation écologique. - Rassemblez des faits ou chiffres (ex. : pourcentage de sols artificialisés en 2025) pour enrichir votre présentation.

Étape 3 : Élaboration de la Structure

Organisez l'exposé en 4 parties : 1. **Introduction (2 min)** : Présentez le sujet, son importance (développement vs. Environnement), et annoncez le plan. 2. **Types d'Aménagements et Impacts (5 min)** : Décrivez les catégories (urbaines, agricoles, etc.) et leurs effets (ex. : dégradation des sols). 3. **Mesures d'Atténuation et Schéma (4 min)** : Expliquez les solutions (évaluation, compensation) et présentez le schéma d'interaction (Figure 8.1). 4. **Conclusion (2-3 min)** : Résumez les points clés, proposez une réflexion personnelle, et ouvrez à des questions. - Préparez des transitions (ex. : "Maintenant, passons aux impacts...").

Étape 4 : Création des Supports Visuels

Préparez des diapositives simples avec : - **Diapositive 1** : Titre, votre nom, une image d'un paysage aménagé (ex. : barrage). - **Diapositive 2** : Liste des types d'aménagements avec une photo par catégorie. - **Diapositive 3** : Tableau ou graphique des impacts (ex. : pollution vs. Biodiversité). - **Diapositive 4** : Schéma de Figure 8.1 redessiné avec annotations (ex. : flèches pour pressions). - **Diapositive 5** : Conclusion avec une question (ex. : "Comment équilibrer développement et nature ?"). Utilisez des outils comme PowerPoint.

Étape 5 : Répétition et Ajustements

Entraînez-vous seul ou avec un groupe pour respecter le temps (10-15 min). Chronométrez chaque partie et raccourcissez si nécessaire (ex. : moins d'exemples si trop long). Demandez à un ami ou professeur de vérifier la clarté et de donner des conseils. Préparez des notes courtes pour guider votre discours sans les lire intégralement.

Étape 6 : Présentation et Interaction

Présentez avec un ton confiant, en regardant l'audience, et utilisez des gestes pour illustrer (ex. : montrer une pente pour l'érosion). - Expliquez le schéma (Figure 8.1) étape par étape pour clarifier les relations. – Prévoyez 2-3 minutes pour répondre aux questions de la classe. - Terminez par un “Merci” et ouvrez à d'autres échanges si possibles.

Conseils Pratiques

Utilisez des exemples locaux ou actuels (ex. : un aménagement près de chez vous en (2025)). - Citez vos sources à la fin (ex. : “Données ADEME, 2025”). - Restez simple mais précis : évitez les termes trop techniques sans explication. - Si en groupe, divisez les parties et coordonnez-vous.

Exemple de Plan Détaillé

- ****Introduction**** : “Les aménagements façonnent notre monde, mais affectent aussi l'environnement. Nous verrons les types, impacts, et solutions.” - ****Partie 1**** : “Les aménagements urbains, comme les routes, augmentent la pollution de l'air de 10-15 - ****Partie 2**** : “La compensation écologique a restauré 150 ha de zones humides en Algérie cette année.” - ****Partie 3**** : “Le schéma montre comment les mesures réduisent les impacts. Que pensez-vous de cet équilibre ?”

EXPOSÉ 03 : CHAPITRE VIII – APERÇU SUR L'IMPACT DES AMÉNAGEMENTS SUR L'ENVIRONNEMENT

I. Introduction - Contexte général : Les aménagements (routes, barrages, zones industrielles, lotissements, etc.) modifient l'environnement naturel et social. - Problématique : Comment ces aménagements affectent-ils l'environnement et quelles mesures peuvent être mises en place pour réduire leurs impacts ? - Objectifs de l'exposé : 1. Définir les types d'aménagements. 2. Identifier leurs impacts sur l'environnement. 3. Proposer des méthodes d'atténuation et de gestion durable.

III. Définition et classification des aménagements

- Aménagements urbains : routes, zones résidentielles, centres commerciaux.
- Aménagements ruraux ou agricoles : irrigation, digues, systèmes de drainage.
- Aménagements industriels et énergétiques : usines, barrages hydroélectriques, parcs solaires/éoliens.
- Importance : chaque type modifie l'équilibre écologique de manière spécifique.

IV. Impacts des aménagements sur l'environnement

3. Impacts physiques et chimiques

- Modification des sols (érosion, compactage).
- Pollution de l'air, de l'eau et du sol.
- Perturbation des cycles naturels (eau, nutriments).

3. Impacts biologiques

- Diminution de la biodiversité.
- Fragmentation des habitats.
- Introduction d'espèces invasives.

4. Impacts socio-économiques

- Déplacement des populations.
- Changements dans l'usage des ressources naturelles.
- Conflits d'usage entre activités humaines et protection de l'environnement.

IV. Méthodes d'évaluation et d'atténuation

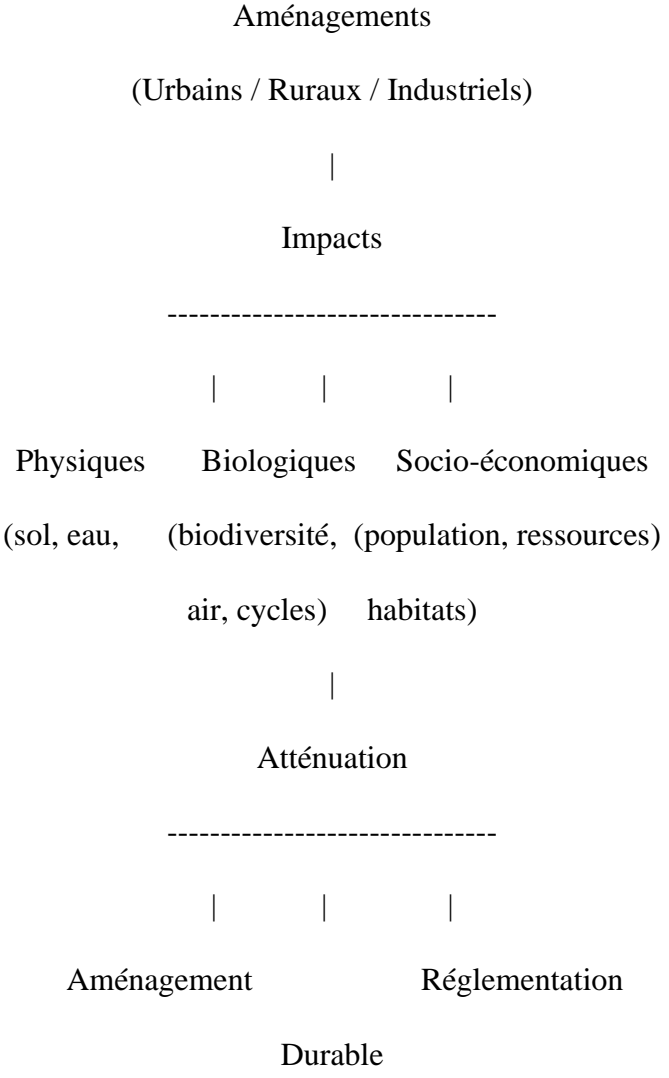
- Études d'impact environnemental (EIE).
- Techniques d'aménagement durable : corridors écologiques, reboisement, systèmes de traitement des eaux usées.
- Politiques et réglementation : normes nationales et internationales pour limiter les impacts.

V. Conclusion - Synthèse des principaux impacts des aménagements. - Importance de planifier et de gérer les aménagements de manière durable. - Appel à l'intégration de l'évaluation environnementale dans tous les projets futurs.

Étapes pour réaliser deux types d'ouvrages de niveau master

Ouvrage 1 : Mémoire scientifique 1. Choisir un type d'aménagement précis et un site d'étude. 2. Faire une revue de littérature sur les impacts environnementaux de ce type d'aménagement. 3. Collecter des données terrain ou secondaires (statistiques, observations, cartes). 4. Analyser les impacts physiques, biologiques et socio-économiques. 5. Proposer des mesures d'atténuation et de gestion durable. 6. Rédiger l'ouvrage avec introduction, méthodologie, résultats, discussion et conclusion.

Ouvrage 2 : Guide pratique ou manuel 1. Identifier les utilisateurs cibles (professionnels, étudiants, décideurs). 2. Sélectionner les aménagements et impacts les plus pertinents. 3. Organiser l'ouvrage par types d'aménagement et impacts. 4. Illustrer avec schémas, cartes, photos et études de cas. 5. Ajouter des recommandations pratiques et des techniques d'atténuation. 6. Vérifier la clarté et l'accessibilité pour le public cible.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948).** Formulas for bed-load transport. *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*, Stockholm, Sweden.
2. **Einstein, H. A. (1950).** The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *Technical Bulletin No. 1026*, USDA Soil Conservation Service, Washington, DC.
3. **Einstein, H. A., & Brown, D. A. (1950).** Smooth-bed transport predictions from abacus smoothing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 76(12), 123–135.
4. **Schoklitsch, A. (1962).** Bed-load transport in alluvial rivers. *Ingenieur-Archiv*, 30, 103–123.
5. **Engelund, F., & Hansen, E. (1967).** A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Technical University of Denmark*, Copenhagen.
6. **Ackers, P., & White, W. R. (1973).** Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 99(11), 2041–2060.
7. **Mizuyama, T. (1977).** Empirical bed-load formula for sediment transport in rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(2), 123–136.
8. **Bagnold, R. A. (1980).** An empirical correlation of bed-load transport rates in flumes. *Proceedings of the Royal Society A*, 372, 453–475.
9. **Parker, G., Klingeman, P. C., & McLean, D. G. (1982).** Bed-load and sediment transport in alluvial streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 108(5), 571–595.
10. **Smart, G. M., & Jaeggi, M. (1983).** Sediment transport and bed-load formulae. *Hydrological Sciences Journal*, 28(2), 187–201.
11. **Yang, C. T. (1984).** Unit stream power and sediment transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1553–1562.
12. **Rickenmann, D. (1991).** Hyperconcentrated flows and sediment transport in steep channels. *Water Resources Research*, 27(5), 797–812.
13. **Van Rijn, L. C. (1984).** Sediment transport, part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431–1456.
14. **Recking, A. (2006).** Evaluation of bed-load transport formulae in gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), 1030–1041.
15. **Lefort, P. (2007).** Sediment transport in mountain rivers: Theory and applications. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 123–135.
16. **Sogreah. (1991).** Hydraulic and sediment transport studies in rivers. *Sogreah Technical Report*, Lyon, France.
17. **Shields, A. (1936).** Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, Berlin.
18. Allan, J.D., & Castillo, M.M. (2007). *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. Springer.
19. Amoros, C., & Petts, G.E. (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson.
20. Bravard, J.P., & Petit, F. (2000). *Les cours d'eau*. Armand Colin.
21. Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
22. Directive-Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), 2000/60/CE.
23. Leopold, L.B., Wolman, M.G., & Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman.
24. Malavoi, J.R., & Bravard, J.P. (2010). *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. ONEMA.
25. Meybeck, M. (2003). *Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes*. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*.

26. Tockner, K., & Stanford, J.A. (2002). Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29(3).
27. Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R., & Cushing, C.E. (1980). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1).
28. Ward, J.V. (1989). The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 8(1).