

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : VOA

Présenté par :

M^r : SAHLI Radhouane

M^r : ABID Naceur Elddine

Sujet du mémoire

**Etude des processus des transports solide et
leur impact sur l'alluvionnement des barrages**

Soutenu publiquement le / 07 / 2023 devant le jury composé de :

M^r, CHIKH Abdelbaki

Président

M^r, KHILOUN Mokhtar

Rapporteur

M^r, BELMAHI Samir

Examineur

M^r, BOUAKKAZ Khaled

Examineur

PROMOTION : 2022 – 2023





DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect.

A mes parents pour les sacrifices qu'ils ont consentis

à mon égard

A mes frères.

A toute ma famille

A mes amis sans exception

SAHLI Radhouane





DEDICACES

A ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie,
A mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis,
A toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études
A mes très chers frères et sœurs,
A toute ma famille sans exception,
A tous mes amis (es) et toute la promotion de master 2 génie civil,
Enfin à tous ceux qui nous sont très chers.

ABID Naceur Elddine



REMERCIEMENT

Toute notre gratitude, notre grâce et nos remerciements vont à Dieu le Tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Mr KHILOUN Mokhtar pour ses conseils, son assistance, son suivi et son soutien, pour nous avoir longuement soutenu et aidé sans relâche.

Nous remercions Mr CHEIKH Abdelbaki qui nous a fait l'honneur de présider cette soutenance .

Nous tenons également à adresser nos remerciements à Mr BELMAHI Samir et M^r, BOUAKKAZ Khaled d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à tous les enseignants de l'université, et surtout nos professeurs durant notre cursus, pour la connaissance qu'ils nous ont toujours su nous transmettre.

Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.



Résumé

Résumé

L'étude du processus de transport solide vise à comprendre les mécanismes de transport des particules solides dans les rivières et les réservoirs de barrages. Cette étude est importante car elle permet de prévoir l'alluvionnement des barrages, c'est-à-dire la quantité de sédiments qui s'accumulent dans les réservoirs des barrages, ce qui peut affecter leur capacité de stockage et leur durée de vie.

Les mécanismes de transport solide comprennent l'érosion, le transport en suspension, le transport de fond, le dépôt et la sédimentation. Ces mécanismes peuvent être influencés par de nombreux facteurs, tels que la topographie du bassin versant, la taille des particules, la vitesse de l'eau et les conditions météorologiques.

L'étude du processus de transport solide est également importante pour la gestion des ressources en eau, car elle permet de prévoir les conséquences de l'alluvionnement des barrages sur les populations riveraines et sur l'environnement et pour la prévention des catastrophes naturelles telles que les inondations et les glissements de terrain.

Mots clés : Transport solide, bassin versant, barrage, envasement, érosion, Courant de densité.

Summary

The study of solid transport processes aims to understand the mechanisms of particle transport in rivers and dam reservoirs. This study is important as it helps predict sedimentation in dams, which refers to the accumulation of sediment in reservoirs, and can affect their storage capacity and lifespan. The mechanisms of solid transport include erosion, suspension transport, bedload transport, deposition, and sedimentation. These mechanisms can be influenced by various factors such as watershed topography, particle size, water velocity, and weather conditions. The study of solid transport processes is also crucial for water resource management as it allows for predicting the consequences of dam sedimentation on riparian populations, the environment, and the prevention of natural disasters such as floods and landslides.

Key words : Solid transport, catchment area, dam, siltation, erosion, density current.

ملخص

دراسة عملية نقل المواد الصلبة تهدف إلى فهم آليات نقل الجسيمات الصلبة في الأنهار وخزانات السدود. تعد هذه الدراسة مهمة لأنها تساعد في توقع ترسب المواد في السدود، وهو ما يشير إلى تراكم الرواسب في خزانات السدود، والذي يمكن أن يؤثر على قدرتها التخزينية وعمرها الافتراضي.

تشمل آليات نقل المواد الصلبة التآكل ونقل الجسيمات المعلقة ونقل القاع وترسب الرواسب والترسيب. يمكن أن تتأثر هذه الآليات بعوامل عديدة مثل تضاريس حوض السيول وحجم الجسيمات وسرعة تدفق الماء والظروف الجوية. تعد دراسة عملية نقل المواد الصلبة مهمة أيضاً لإدارة الموارد المائية حيث تسمح بتوقع آثار ترسيب السدود على السكان النهريين والبيئة، وللوقاية من الكوارث الطبيعية مثل الفيضانات والانهدامات التربة.

الكلمات المفتاحية: النقل الصلب، مستجمعات المياه، السد، الطين، التآكل، تيار الكثافة

Liste des abréviations

A : Perte de terre (t/ha)

Es : érosion spécifique dans le bassin versant (t/km².an)

Po : Pluie annuelle en mm

Es: Erosion spécifique (t/km²/an)

Ta₁: Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous bassins en t/ km²

S: Superficie totale du bassin versant en km²

Le : lame d'eau ruisselée moyenne interannuelle en mm

Qs : Apport solide moyen interannuel en t /km².an

P : Pluviométrie du mois le plus arrosé en mm

H_{moy} : Altitude moyenne en m

Pa : Pluviométrie moyenne interannuelle en mm

S: Superficie du bassin versant en km²

q_s : Débit solide en m³/s

τ* : Paramètre de Shields, sans dimension

d : Diamètre des sédiments en m

K : Coefficient de Strickler global du lit

C : concentration moyenne mg/l

m : masse de sédiments piégés

T : temps de prélèvement au point de mesure

Δbi : distance entre les points de mesure

A : dimension du matériaux

τ_c : force tractrice critique correspond au début de mouvement des grains.

τ_o : force tractrice

τ* : paramètre de Shields sans dimension

γ_s : poids volumique du matériau solide

γ_w : poids volumique de l'eau

gs : débit charrié de fond par unité de largeur (kg/s.m)

Ql : débit liquide instantané (m³/s)

i : pente (%)

τ_o : contrainte de frottement dépendant de l'écoulement.

ν : est la viscosité cinématique du fluide.

HS : Dénivelée

a : pente du ravin

Q_p : débit de pointe pour une période de retour donnée en m^3/h

C : coefficient de ruissellement moyen du bassin versant

I : intensité pluviométrique sur une période de retour déterminée (mm/h)

A : surface du bassin versant (ha)

h : hauteur de pluie (mm)

T_c : temps de concentration (minutes)

L : longueur (m)

P : pente (m/m)

V_D : vitesse limite de chute (m/s)

r : rayon de la particule à décanter (m)

g : accélération terrestre (m/s^2)

$\Delta(\rho)$: différence de la masse volumique entre la particule et l'eau

μ : viscosité dynamique de l'eau Pa.s

Sommaire

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Sommaire.....	iii
Introduction générale	1
Chapitre I Processus de l'érosion hydrique et agents érosifs.....	4
I.1. Introduction	4
I.2. Processus d'érosion	4
I.3. Types d'érosion hydrique	4
I.3.1. Érosion en feuille	4
I.3.2. Érosion en ravin	5
I.3.3. Érosion en rigole	5
I.3.4. Le détachement	5
I.3.5. Le transport	7
I.3.6. La sédimentation	8
I.4. Facteurs de l'érosion	9
I.4.1. Le climat	9
I.4.2. La topographie.....	9
I.4.3. La lithologie.....	10
I.4.4. Le couvert végétal.....	10
I.4.5. Le facteur anthropique.....	10
I.5. Conséquences de l'érosion et Rôle des ravines.....	11
I.5.1. Conséquences de l'érosion.....	11
I.5.2. Rôle des ravines.....	12
I.6. Approches et méthodes de quantification de l'érosion hydrique du sol.....	13
I.6.1. Mesures de terrain.....	14
I.7. Quantification de l'érosion.....	15
I.8. Conclusion.....	17
Chapitre II Etude Du Processus De Transport Solide.....	19
II.1. Définition.....	19
II.2. Les principaux facteurs dont dépendent les apports solides d'un bassin versant	
II.3. Les modes de transport.....	20
II.3.1. Transport solide par charriage.....	21

II .3.2. Transport solide par suspension.....	22
II .3.3. Erosion du fond, dépôt.....	23
II .4. Conclusion	24
Chapitre III Méthodes de mesure et de quantification du transport solide.....	26
III.1. Introduction	26
III.2. Quantification du transport solide.....	26
III.2.1. Formule de transport solide par charriage.....	26
III.2.2. Conditions d'utilisation des formules de transport solide.....	27
III.2.3. Mesure de transport solide en suspension.....	28
III.2.4. Mesure de la turbidité.....	28
III.2.5. Appareils de prélèvement	29
III.2.6. Difficulté de mesure.....	30
III.2.7. Mesure du transport solide de fond	30
III.2.8. Calcul du débit solide de fond.....	31
Chapitre IV. Processus de l'envasement des barrages.....	36
IV.1. Introduction.....	36
IV.2. Problemes posés par la sedimentation.....	36
IV.3. Origine de l'envasement d'une retenue.....	37
IV.4. Conséquences.....	37
IV.5. Etapes de l'envasement d'un barrage.....	39
IV.6. Influence des différentes caractéristiques des retenues sur le mécanisme de l'envasement.....	40
IV.6.1. Influence de la topographie de la retenue.....	40
IV.6.2. Présence de la végétation.....	41
IV.6.3. Présence d'affluents.....	41
IV.6.4. Influence du mode d'exploitation du réservoir.....	41
IV.7. Períodes privilégiées pour la sedimentation.....	41
IV.8. Piégeage des sédiments.....	42
IV.9. Courants de densité dans les barrages.....	42
IV.10. Influence des barrages sur la continuité sédimentaire.....	43
IV.11. Problèmes posés par l'envasement.....	44
IV.12. Conclusion.....	46
Chapitre V : Moyens techniques de lutte contre l'envasement.....	48
V.1. Introduction.....	48
V.2. Aménagements antiérosifs.....	48

V.2. 1. Différents aménagements antiérosifs.....	48
V.2. 2. Aménagements mécaniques.....	49
V.2. 3. Caractéristiques des seuils en gabion.....	52
V.3. Dévasement des barrages.....	55
V.4. Moyens de lutte curative.....	56
V.4.1. Soutirage des sédiments.....	56
V.4.2. Dévasement périodique : Soutirage des courants de densité.....	56
V.4.3. Dévasement périodique : Evacuation de la vase par la vanne de fond.....	57
V.4.4. Dévasement occasionnel : Dragage d'un barrage.....	58
V.5. Surélévation du barrage.....	60
V.6. Conclusion.....	61
Chapitre VI Contribution aux mesures préventives contre l'envasement	
(cas du barrage Bekhadda).....	64
VI.1. Introduction.....	64
VI.2. Situation géographique de la zone d'étude.....	64
VI.3. Présentation du Barrage Bekhadda Tiaret.....	65
VI.4. Fiche technique de barrage Bekhadda.....	65
VI.5. Relief de la wilaya.....	66
VI.6. Pédologie.....	67
VI.7. Etude climatique de la zone d'étude.....	67
VI.8. Présentation du bassin versant d'oued Mina.....	68
VI.9. Situation géographique.....	68
VI.10. Caractéristiques physiographiques du bassin.....	69
VI.11. Réseau hydrographique.....	69
VI.12. Actions proposées pour la protection du bassin versant	
(barrage de BAKHADDA).....	71
VI.12.1. Le reboisement.....	72
VI.12.2. Aménagements en versant avant le lit du cours d'eau.....	72
VI.12.3. Les cours d'eau	75
VI.12.4. Aménagement d'un piège à sédiments.....	76
Conclusion générale	86
Bibliographie	93

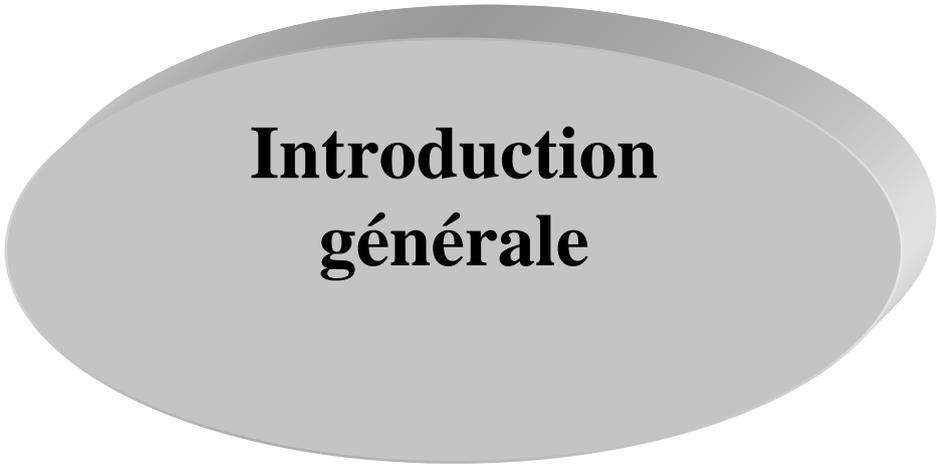
Liste des figures

Figure I.1: Schéma des trois étapes de l'érosion hydrique.....	4
Figure I.2 : Type d'érosion hydrique.....	5
Figure I.3 : Photo illustrant le déclenchement par effet splash.....	6
Figure I.4 : les modes de transport.....	7
Figure I.5: Formes d'érosion hydrique.....	8
Figure I.6: Les principaux types d'érosion hydrique.....	9
Figure I.7: Mécanisme de l'érosion.....	11
Figure I.8: Erosion hydrique dans un bassin versant : Schéma dichotomique	13
Figure I.9: Erosion des fonds par entrainement et des berges.....	14
Figure II-1: Mode de transport solide.....	19
Figure II-2: Mode de transport des sédiments selon leur taille.....	19
Figure II-3: Transport et sédimentation des produits de l'altération.....	20
Figure IV.1 : Envasement des barrages.....	36
Figure IV.2 : Problèmes posés par la sédimentation.....	37
Figure IV.3 : Envasement du barrage d'Ighil Emda.....	38
Figure IV.4 : Charriage tres important dans l'oued Labiod en période de crue.....	38
Figure IV. 5 : Processus d'envasement d'un barrage Réservoir.....	40
Figure IV. 6 : Mode d'envasement.....	42
Figure IV. 7 : Schéma de la propagation d'un courant de densité au fond d'un barrage.....	43
Figure IV. 8 : Schéma illustrant le mode de transport par ruissellement.....	43
Figure IV. 9 : Blocage de la vanne de fond de la deuxième digue du barrage Boughezoul...	45
Figure IV. 10 : Curage d'un canal par les moyens mécaniques.....	45
Figure V.1: Seuil en Pierre Sèche.....	50
Figure V.2: coupe longitudinale d'un seuil en pierre sèche.....	50
Figure V.3: seuil en pierres sèches combinés avec la plantation.....	51
Figure V.4 : Seuil en gabion.....	54
Figure V.5 : Seuil en maçonnerie.....	55
Figure V.6 : Schéma du soutirage d'un courant de densité par les pertuis de vidange d'un barrage	56
Figure V.7 : Deux vannes de fond du barrage de Boughezoul.....	57

Figure V.8 : Vanne de fond du barrage de Foug El Gherza	58
Figure V.9 : Navire spécial drague suceuse a désagregateur.....	58
Figure V.10 : La drague à pelle rétro-caveuse à benne preneuse.....	59
Figure V.11 : Schéma synoptique d'une opération de dragage dans un barrage	59
Figure V.12: Rejet de la vase lors de l'opération de dragage de 2005-2006.....	60
Figure V.13 : Schéma synoptique d'une surélévation d'un barrage	60
Figure V.14 : Surélévation du barrage Ghrib par des hausses fusibles	61
Figure VI.1: Situation géographique de la wilaya de Tiaret.....	64
Figure VI.2: Digue du barrage BAKHADDA.....	66
Figure VI.3: Profil du cours d'eau principal du bassin versant	70
Figure VI.4 : transport solide (entrée du barrage BAKHADDA).....	70
Figure VI.5 : amont du barrage BAKHADDA transport solide (rivière principale).....	71
Figure VI.6 : barrage BAKHADDA (absence de couvert végétal).....	72
Figure VI.7: Technique de banquettes.....	73
Figure VI.8: Fonctionnement d'ouvrage de stockage en dérivation	74
Figure VI.9: structures perméables.....	75
Figure VI.10 : Seuil en grillage avec piquets.....	75
Figure VI.11: Aménagement d'un piège à sédiments.....	76
Figure VI.12: Aménagement d'un piège à sédiments.....	77

Liste des tableaux

Tableau VI.1. Caractéristiques géographiques de la station météorologique du barrage Bekhadda.....	67
Tableau VI.2. Récapitulatif du calcul du débit de pointe.....	80
Tableau VI.3. Récapitulatif des données pour le dimensionnement du bassin.....	82
Tableau IV.4. Dimensions du bassin (10 μm).....	82
Tableau VI.5. Dimensions du bassin (15 μm).....	84



**Introduction
générale**

Introduction générale

Les barrages sont exposés à une perte de capacité due fondamentalement au phénomène d'envasement. Ce phénomène qui peut s'exprimer par d'autres termes tels que, l'engravement, l'alluvionnement des retenues et la sédimentation des particules transportées par les cours d'eau que ce soit le transport de matériaux grossiers ou de particules fines. Il est la conséquence naturelle de la dégradation des bassins versants.

Dans cette étude, nous allons explorer les différents mécanismes de transport solide, tels que l'érosion, le transport en suspension, le transport de fond, le dépôt et la sédimentation. Nous allons également examiner les facteurs qui influencent ces mécanismes, tels que la topographie du bassin versant, la taille des particules, la vitesse de l'eau et les conditions météorologiques.

L'alluvionnement des barrages peut avoir des conséquences importantes sur les populations riveraines et l'environnement. Il peut entraîner des inondations, des glissements de terrain et des perturbations des écosystèmes aquatiques. C'est pourquoi il est crucial de comprendre les mécanismes de transport solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages.

Ce phénomène constitue une réelle préoccupation pour les exploitants et les responsables de la mobilisation des ressources hydrauliques.

Devant les difficultés rencontrées pour la maîtrise de l'alluvionnement des barrages en Algérie, l'analyse d'état d'envasement est obligatoirement demandée pour définir le degré de gravité au niveau des barrages. Les différentes approches de quantification visent à fournir aux exploitants et aux projeteurs la situation présente et future de nos retenues.

Le transport solide est un phénomène complexe et sa prise en compte dans les perspectives des aménagements hydrauliques présente une importance primordiale. L'intensité de ce phénomène, varie beaucoup avec l'environnement général, la géologie, le degré d'altération des roches, l'hydrologie, le couvert végétal et le climat, etc.

Le phénomène d'envasement est le résultat de deux processus, érosion et transports solides qui se manifestent à l'amont de la retenue et au niveau du bassin versant, pour cette raison la connaissance des caractéristiques de ce dernier deviennent nécessaire avant de procéder à l'étude de la retenue elle même.

En absence des précautions élémentaires, les matériaux déposés peuvent se consolider lentement, perturbent par conséquent le bon fonctionnement des ouvrages et rendent irréversible l'évolution de la capacité des retenues.

Pour conditionner et gérer ces ouvrages, l'ingénieur doit tenir compte de la nature et de la quantité des sédiments transportés par l'eau, ces derniers causent des conséquences dramatiques qui peuvent freiner complètement les efforts d'aménagement des eaux dont la

réduction de la capacité des réservoirs constitue un facteur limitant notre développement économique.

Le transport solide dans les cours d'eau en Algérie est très élevé. Cependant, il est mal quantifié dans certains oueds à cause de l'absence et du manque de données concernant surtout la concentration en particules fines et même l'indisponibilité des stations de jaugeage.

La quantification des matières transportées par les cours d'eau est une tâche délicate à cause du caractère irrégulier du régime hydrologique et du manque de données du aux difficultés inhérentes à des prélèvements effectués au cours de crues violentes et brèves.

Devant l'importance de ce problème et le manque de données, la quantification du transport solide s'avère indispensable. C'est dans ce sens que s'inscrit cette étude qui consiste à évaluer le transport solide à l'exutoire du bassin versant.

La mesure de l'envasement des barrages présente un intérêt certain pour la quantification des sédiments et l'exploitation des ouvrages.

L'importance du dévasement revêt un intérêt particulier en Algérie, et ce, d'autant plus que les barrages ont une durée de vie limitée. Il est rare, cependant, que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abandon d'un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'adduction en eau potable ou à l'irrigation dont les intérêts socioéconomiques justifient une garantie de service illimitée. Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible, de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent, mais aussi et surtout de sauvegarder au maximum l'existence de la retenue en luttant contre ce phénomène.

Le dévasement des barrages permettra d'améliorer la qualité des eaux et de renforcer leur capacité de stockage.

Le mémoire s'articule en six chapitres, précédés par une introduction générale :

- Chapitre I : aborde le phénomène d'érosion dans les bassins versants
- Chapitre II : traite l'étude du processus de transport solide
- Chapitre III : est consacré aux méthodes de mesure et de quantification du transport solide
- Chapitre IV : porte sur le processus de l'envasement des barrages
- Chapitre V : donne les moyens techniques de lutte contre l'envasement
- Chapitre VI: propose les mesures préventives contre l'envasement du barrage Bekhadda

Enfin une conclusion générale sera donnée à la fin du travail.

Chapitre I

Phénomène d'érosion dans les bassins versants

Chapitre I Processus de l'érosion hydrique et agents érosifs

I.1. Introduction :

L'érosion des sols est un phénomène naturel qui désigne le processus de détachement et de transport de particules solides.

La formation de rigoles ou de ravines est un signe révélateur de l'érosion hydrique. Elles sont liées à la concentration du ruissellement qui permet à l'écoulement d'acquérir une capacité érosive qui entraîne les fragments de sol.

I.2. Processus d'érosion

L'érosion hydrique des sols résultent de la conjugaison de trois mécanismes : le détachement des particules de sol, leur transport et leur sédimentation.

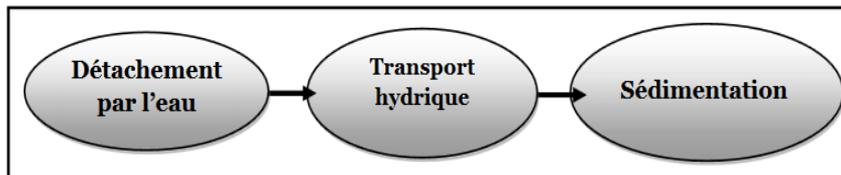


Figure I.1: Schéma des trois étapes de l'érosion hydrique

I.3. Types d'érosion hydrique

I.3.1. Érosion en feuille

L'érosion en nappe ou lavage en nappe est un type d'érosion hydrique qui érode la surface de la couche arable de manière uniforme en petites couches, une telle érosion est causée par un plan d'eau lent sur une zone du sol, une telle érosion est principalement causés par les inondations et peuvent se produire sur les pentes des collines, les plages, les plaines inondables, les berges de rivières débordées et les plaines côtières ; les masses d'eau capables de provoquer une érosion en nappe sont appelées écoulement en nappe.

I.3.2. Érosion en ravin

Une érosion ravinante en tant que type d'érosion hydrique est un relief créé par une masse d'eau à écoulement rapide, brisant la couche arable et érodant également les couches internes du sol, provoquant ainsi l'émergence d'un trou profond, dans de rares cas; le ravin peut avoir une profondeur de plus de cent mètres et une largeur de taille similaire ou inférieure. La principale cause de ravinement est la surinondation et les fortes pluies continues.

I.3.3. Érosion en rigole

Une rigole est un canal peu profond ; pas plus profond que 10 centimètres, creusé dans le sol par l'action érosive de l'eau courante, il se produit lorsque le sol est gorgé d'eau et que l'eau de pluie ne pénètre pas dans le sol, mais coule le long du sol. Si des mesures préventives adéquates ne sont pas prises, des rigoles se forment dans les ravines et causent des dégâts plus importants.

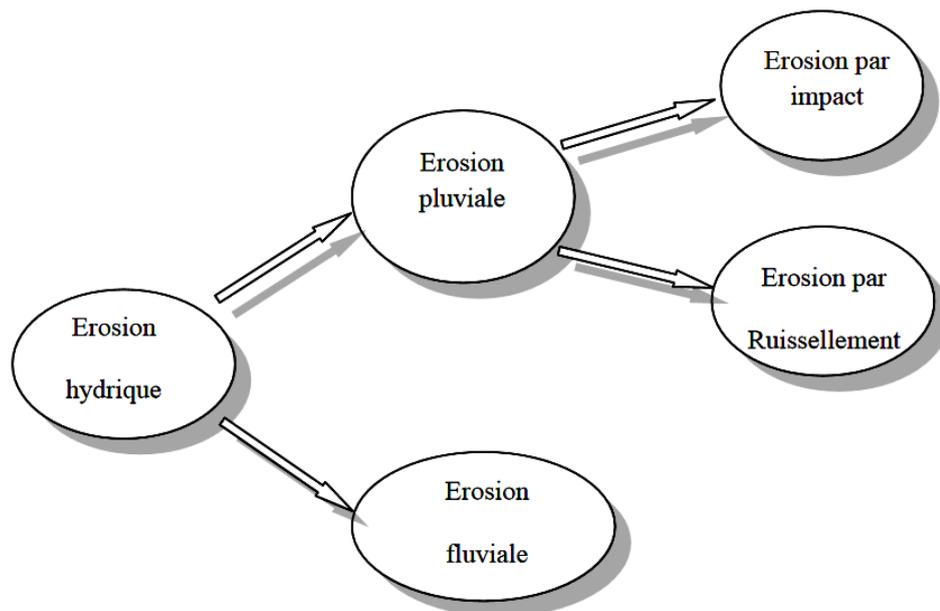


Figure I.2 : Type d'érosion hydrique

I.3.4. Le détachement

Le détachement des particules de sol se fait sous l'impact de deux agents érosifs :

- La pluie, qui est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols. L'impact des gouttes de pluies sur la surface de sol provoque le détachement des particules de sol.

Plusieurs mécanismes, qui diffèrent par la nature des forces qu'ils mettent en jeu, sont à l'origine

de la désagrégation par l'action de l'eau. Quatre principaux mécanismes ont été identifiés :

- L'éclatement, lié à la compression de l'air piégé lors de l'humectation. Les sols argileux sont moins affectés par l'éclatement que les sols limoneux ou sableux, à cause de leur porosité réduite et de leur importante capacité de rétention de l'eau.
- La désagrégation mécanique due à l'énergie dissipée lors de l'impact des gouttes de pluie. Cette énergie se transforme en force de cisaillement qui provoque le détachement des particules de sol et l'effet « splash » (Fig. 1).
- La microfissuration produite par le gonflement différentiel des argiles. Le gonflement et le retrait de ces argiles provoquent des microfissures des agrégats.
- La dispersion physico-chimique résulte de la réduction des forces d'attraction entre les particules colloïdales composant le sol. Elle dépend de la taille et de la valence des cations présents qui peuvent former des ponts entre les particules chargées négativement.

Suite à l'impact d'une goutte de pluie, des gouttelettes d'eau et des fragments de sol sont éjectés de la surface et transportés radialement autour du point d'impact, avant de se déposer à la surface. Ce rejaillissement d'eau et de sol est communément désigné par le terme de splash (Fig.2).

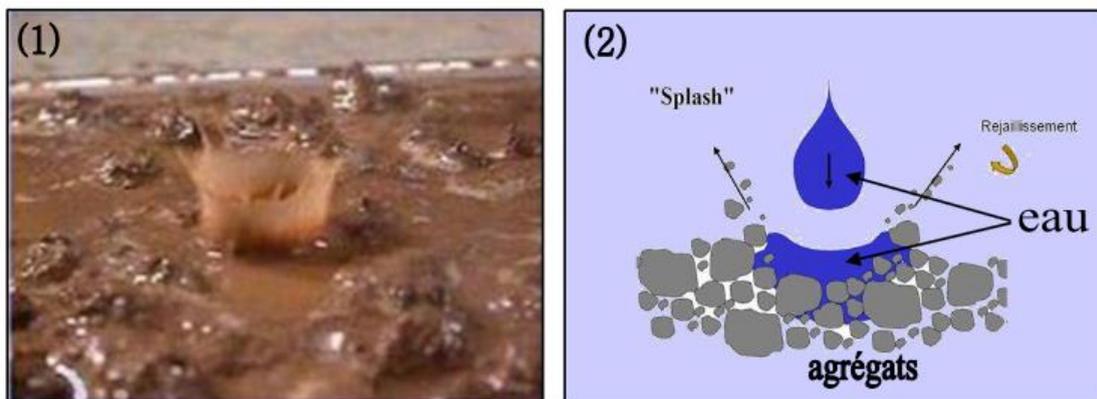


Figure I.3 : Photo illustrant le déclenchement par effet splash,
 (1) : Le Bissonnais2011, (2) :www.ma.auf.org

Le ruissellement, dont l'impact dépend de la force de cisaillement (vitesse d'écoulement) et de la résistance du sol, qui peut détacher des particules de sol à son passage.

La stabilité structurale est une propriété qui rend compte de la sensibilité d'un sol à la désagrégation par l'eau, estimée par les tests de stabilité structurale des sols. De très nombreux facteurs intrinsèques comme la texture, la teneur en matière organique ou en cations échangeables agissent sur la stabilité structurale d'un sol.

La mise en mouvement des fragments de terre par le ruissellement (parfois désignée par le terme entraînement) est généralement liée à des conditions de ruissellement concentré. Tout comme pour l'impact des gouttes de pluie, la susceptibilité du sol face au détachement par une lame

d'eau ruisselante est dépendante de sa cohésion interne. La résistance au cisaillement du sol est donc une variable souvent utilisée pour caractériser le matériau soumis à l'érosion.

I.3.5. Le transport

Une fois que les particules de sol sont détachées, elles sont transportées sur des distances plus ou moins importantes.

En plus de son action sur la désagrégation et le détachement, l'impact des gouttes de pluie peut être à l'origine d'un déplacement des particules et fragments issus de la désagrégation à la surface du sol « le splash » (*Cerdan, 2001a*). Ce dernier constitue le principal moteur de l'évolution structurale et du déplacement latéral des particules de sol avant le démarrage du ruissellement.

Le ruissellement est l'agent principal du transport des fragments de sol mis en mouvement sur une surface. Dans la lame d'eau peu épaisse qui s'écoule à la surface lors d'un événement érosif, les fragments de sol sont transportés par suspension, saltation et traction.

Deux types de ruissellement existent : le ruissellement de sub-surface (ou hypodermique) dû à la présence d'un horizon imperméable sous la surface du sol, et le ruissellement de surface. Ce dernier résulte soit d'un refus d'infiltration de surface du sol dû à une pluie dont l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol (mécanisme de Horton) et qui est souvent conséquence de la formation de la croûte de battance, soit d'un dépassement de capacité de stockage du sol (ruissellement par saturation).

Quand la charge en sédiments est inférieure à la capacité de transport de l'écoulement, les particules de sol peuvent être ainsi transportées.

Quand la charge est supérieure à la capacité de transport, les sédiments en excès se déposent. L'exportation des sédiments par le ruissellement est grandement influencée par le fait que la lame d'eau soit soumise ou non à l'impact des gouttes de pluie. Pour un écoulement en nappe peu épais (érosion diffuse), la pluie tend à augmenter la concentration et la granulométrie de la charge solide exportée.

Ce déplacement des particules de sol est favorisé par plusieurs autres facteurs moins importants, tels que la gravité, le labour et le vent.

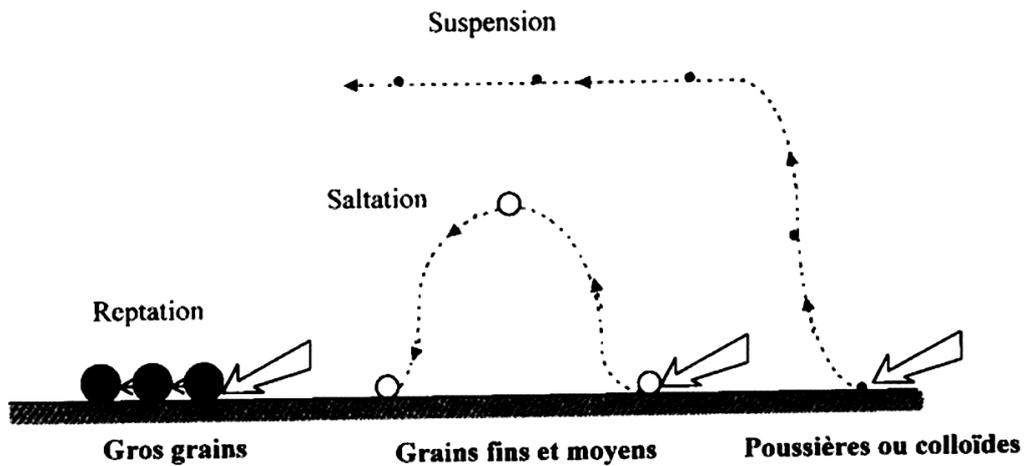


Figure I.4 : les modes de transport source : CILSS/PAC (1989)

I.3.6. La sédimentation

La sédimentation est le mécanisme qui contrôle et peut limiter la quantité de sédiments exportés. Elle se produit quand la capacité de transport de l'écoulement est dépassée. Cette troisième phase du processus d'érosion hydrique apparaît donc par exemple lors du ralentissement du ruissellement. Les particules les plus grossières sont les premières à sédimenter, les plus fines étant transportées plus loin. On parle de tri granulométrique.

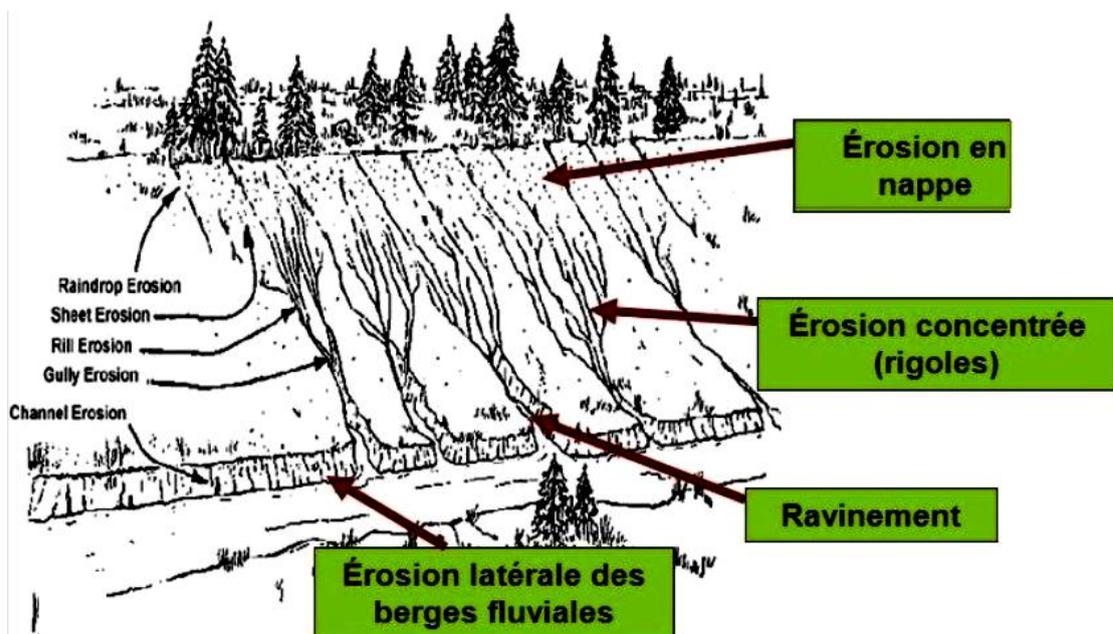


Figure I.5: Formes d'érosion hydrique (<https://slideplayer.fr/slide/1662029>).

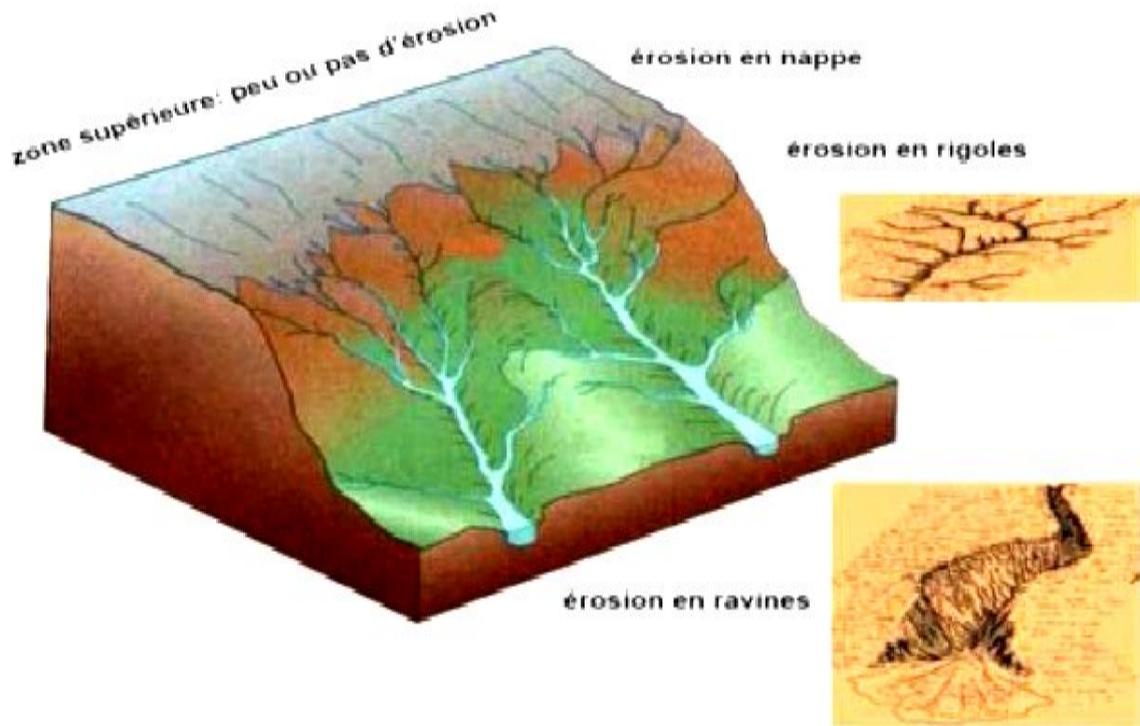


Figure I.6: Les principaux types d'érosion hydrique (d'après Cheggour, 2008)

I.4. Facteurs de l'érosion

Deux principaux types de facteurs de l'érosion sont évoqués dans la littérature : les facteurs naturels regroupés sous quatre grandes familles ; à savoir : le climat, la topographie, la lithologie et le couvert végétal; et les facteurs anthropiques relatifs aux activités humaines.

I.4.1. Le climat

La fréquence et l'intensité des précipitations sont les deux caractéristiques importantes du facteur climatique de l'érosion hydrique des sols. Ces caractéristiques sont à l'origine de la formation du ruissellement quand la quantité des pluies dépasse la capacité d'absorption de l'eau par le sol.

Le potentiel érosif de la pluie est lié à l'intensité des averses et aux caractéristiques des gouttes de pluie (taille, vitesse, forme, angle d'impact) qui déterminent leur énergie cinétique.

La violence du vent intervient dans l'augmentation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie.

I.4.2. La topographie

La pente accélère l'érosion car elle augmente la vitesse d'écoulement de l'eau. La pente intervient dans les phénomènes d'érosion en fonction de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur.

En effet, plusieurs études ont montrés que l'énergie cinétique du ruissellement et le pouvoir érosif croissent avec la longueur de la pente.

I.4.3. La lithologie

L'érodibilité du sol désigne sa susceptibilité face aux processus d'érosion. Elle est fonction des propriétés physico-chimiques du sol (texture, profondeur, pierrosité, teneur en matière organique...) et de la cohésion qui existe entre ces particules. Une faible cohésion va entraîner une forte érodibilité.

Il y a moins d'érosion dans les sols sablonneux parce que l'eau est absorbée facilement en raison de sa perméabilité élevée, par contre en cas de ruissellement ils peuvent être très érodibles. Une forte teneur en matière organique dans le sol améliore la structure granulaire et la capacité de rétention d'eau. Plus la matière organique diminue, plus l'érodibilité du sol augmente.

I.4. 4. Le couvert végétal

Il s'agit du facteur primordial de protection du sol contre l'érosion.

La présence de la couverture végétale, sa nature et son étendue, jouent un rôle important dans l'interception et le retard de la chute des gouttes des pluies sur la surface du sol permettant ainsi la dissipation de son énergie cinétique, ce qui diminue dans une large mesure l'effet "splash". Elle favorise également l'infiltration de l'eau et le maintien du sol grâce à son système racinaire, et son développement en surface freine le ruissellement.

Roose (1994) constate que l'érosion est fonction non seulement du couvert végétal, mais également de sa hauteur au-dessus du sol. Plus la hauteur est réduite plus la protection est importante et donc l'érosion est minimale.

Les forêts et surtout les couvertures herbacées sont plus efficaces pour fournir une protection du sol. C'est le manque de végétation qui crée la condition permettant l'érosion.

I.4. 5. Le facteur anthropique

Certaines activités humaines accélèrent l'action de l'érosion. Les pratiques qui favorisent l'érosion sont principalement :

- * Le surpâturage qui provoque le tassement des sols, diminue sa perméabilité et favorise le ruissellement de l'eau.
- * L'intensification de l'agriculture.
- * La déforestation favorisant l'écoulement d'eau. Selon la FAO le taux moyen de déforestation des 10 dernières années dans le sud et l'est du bassin méditerranéen est de l'ordre de 1,1 % contre 0,8 % pour la forêt tropicale mondiale (*PNUE- plan bleu, 97*).
- * La croissance démographique et l'urbanisation.

Cependant, de nombreuses autres actions menées par l'homme permettent de lutter contre

l'érosion hydrique et protéger la ressource sol. En effet, depuis 7.000 ans, l'homme a accumulé les traces de sa lutte contre l'érosion et la dégradation des sols en vue d'améliorer la gestion de l'eau et la fertilité des sols (Lowdermilk, 1953 cité par Roose, 1994).

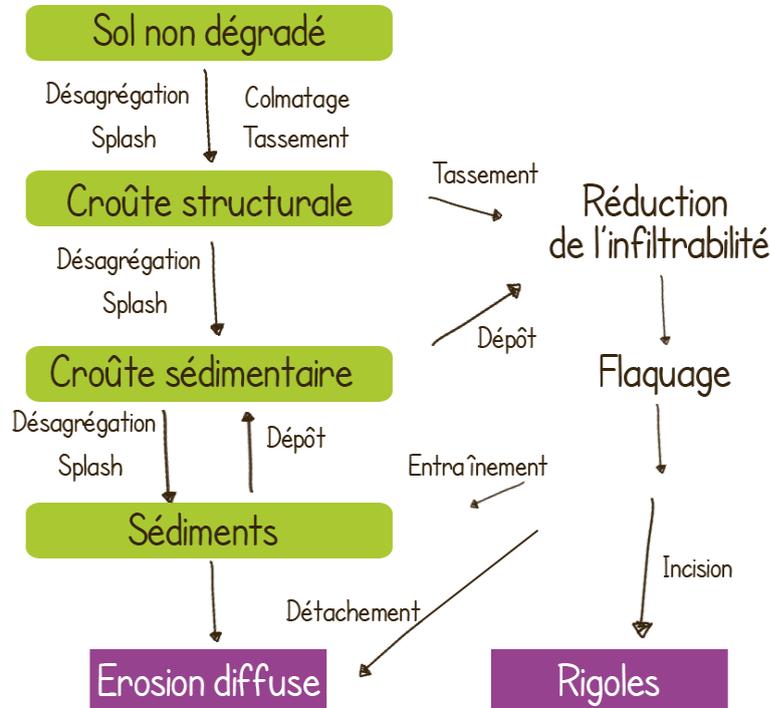


Figure I.7: Mécanisme de l'érosion

I.5. Conséquences de l'érosion et Rôle des ravines

I.5.1. Conséquences de l'érosion

L'érosion des sols est à l'origine de deux familles de problèmes :

- Les conséquences dans la zone de départ des sédiments (on-site effects). sont relatives à la perte de la couche arable ainsi que des semences, ce qui réduit la fertilité du sol et la productivité des cultures. Sachant que la régénération d'un centimètre sol à partir d'un matériau d'origine peut prendre des milliers d'années, le processus peut être considéré comme *quasi* irréversible à l'échelle de générations humaines.
- Les conséquences sur les lieux de dépôt (off-site effects) sont plus nombreuses.

Les engrais et pesticides épandus dans une parcelle agricole peuvent être transportés dans les eaux de ruissellement sous forme dissoute ou par adsorption sur les sédiments. Ce transport peut avoir des effets toxiques sur la qualité de l'eau (potable et d'irrigation) et peut provoquer une eutrophisation (prolifération des plantes aquatiques et perte d'oxygène dissout) des milieux aquatiques. On peut aussi assister à la destruction des infrastructures et le recouvrement de

fossés et routes.

Une autre conséquence importante est l'envasement des barrages et des retenues en aval ce qui affecte leur capacité à mobiliser les eaux de surface dans un but d'irrigation ou d'alimentation en eau potable par exemple. Les écosystèmes, les productions et la sécurité alimentaire sont alors sévèrement affectés.

I.5.2. Rôle des ravines

Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion hydrique des sols. Les ravines peuvent atteindre des dimensions considérables, avec des profondeurs qui peuvent varier de 0,5 à 25-30 mètres (*Soil Science Society of America, 2001*). La densité des ravines est fonction essentiellement de la pente et de l'épaisseur du sol (*Slimi, 2008*). Le ravinement est le plus souvent provoqué ou accéléré par la conjonction d'une utilisation inappropriée des terres et d'épisodes de précipitations extrêmes (*Valentin et al., 2005*).

Les informations collectées à travers le monde montrent que les taux de pertes en sol par érosion ravinaire, représentent une proportion variant de 10% à 94% de la production totale des sédiments causée par l'érosion hydrique (*Poesen et al. 2003*). Cette forme d'érosion peut charrier de grandes quantités de terre et être à l'origine de coulées de boue importantes (*Khentouche, 2005*), causant ainsi une perte en sol plus importante que celles dues à l'érosion en surface (nappe + rigoles) (*Poesen et al., 2006*).

Une autre étude réalisée par Poesen et al., en 2002 sur quelques bassins versants méditerranéens, montre que la présence de ravines actives dans ces sites semble être un bon indicateur de l'importance de la production de sédiments à travers ces bassins. En d'autres termes, les ravines constituent des éléments de connectivité qui facilitent le transfert des sédiments dans le paysage. Les ravines peuvent donc être responsables, avec l'oued, du détachement et du transport d'un volume important de sédiments des horizons profonds aux réservoirs (*Poesen et al., 2003*).

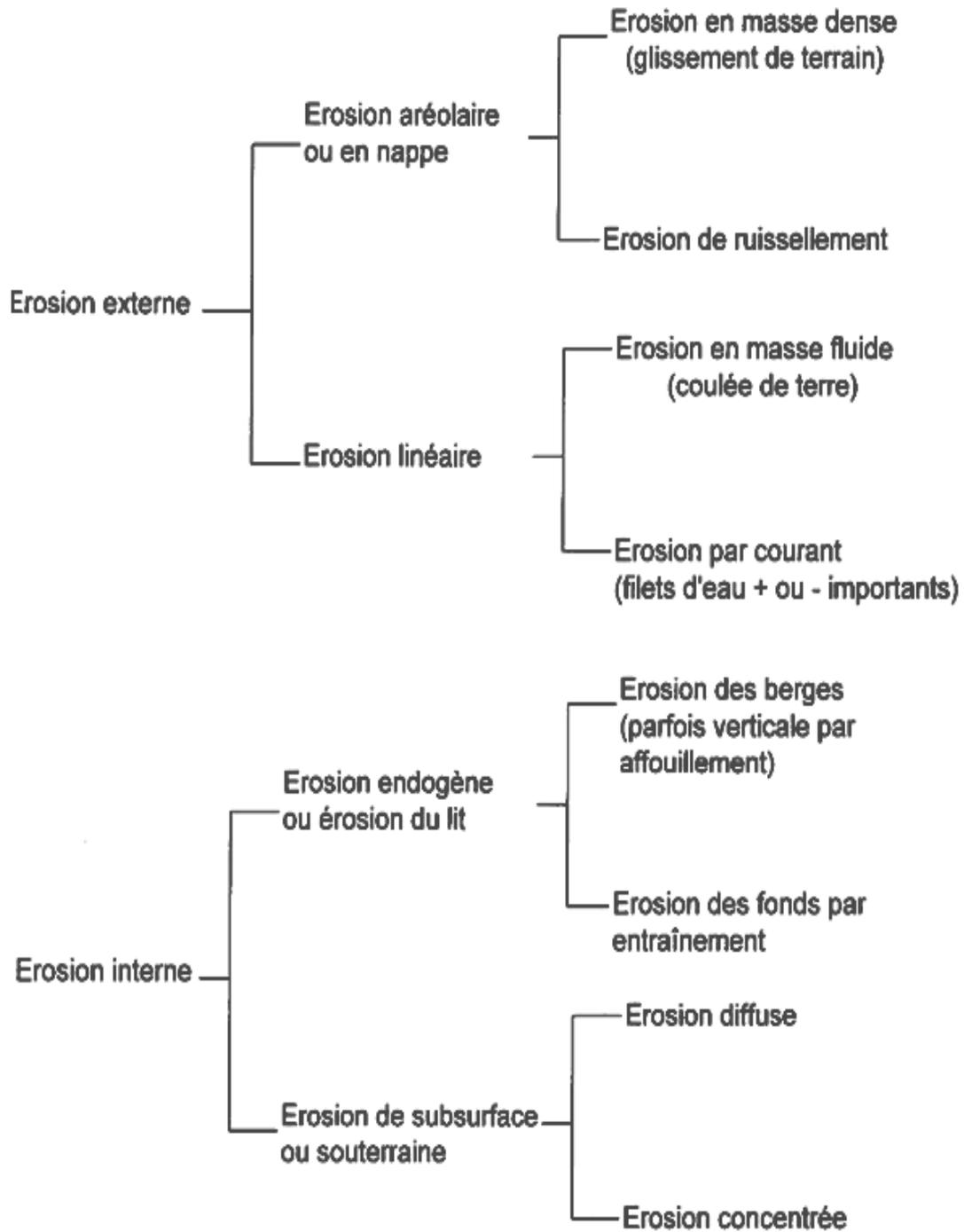


Figure I.8: Erosion hydrique dans un bassin versant : Schéma dichotomique des différents types.

Source : A.RAMPON (1987)

I.6. Approches et méthodes de quantification de l'érosion hydrique du sol

Les méthodes utilisées dans la quantification de l'érosion varient en fonction des objectifs, des moyens et des échelles d'étude.

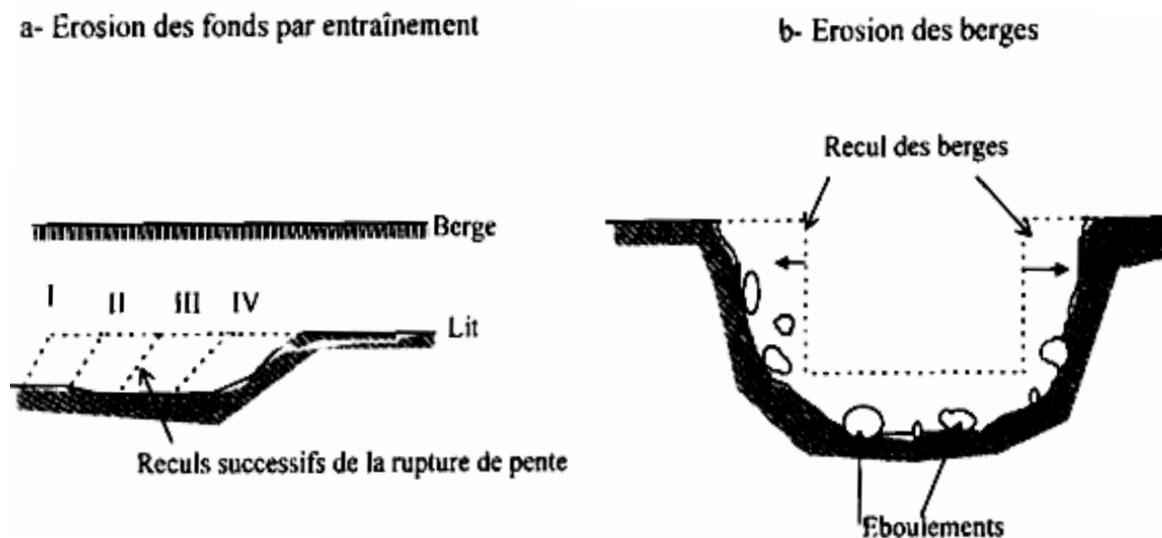


Figure I.9: Erosion des fonds par entraînement et des berges Source : CILSS/PAC (1989)

I.6. 1. Mesures de terrain

La quantification des pertes de terres peut se faire par mesures directes sur le terrain grâce à l'installation d'une station de jaugeage ou station hydrologique à l'exutoire de la surface d'étude permettant de suivre les flux d'eau et de matières solides associées. Chaque station hydrologique peut par exemple être équipée de capteurs de hauteur d'eau qui permettent de mesurer le débit en continu au droit de déversoirs (pour les faibles débits) et de canaux rectangulaires en béton (pour les forts débits).

Le transport solide peut être estimé à partir de mesures de concentration des eaux en matières en suspension (MES) grâce à des préleveurs automatiques asservis aux débits (Ben Slimane, 2008 ; Sauvadet et al., 2012). Dans ce cas, la masse érodée est calculée en intégrant les concentrations obtenues par rapport aux volumes écoulés. Et les bilans annuels moyens de l'érosion sont déduits en intégrant les masses érodées obtenues par rapport à la période et la surface d'étude. Des mesures en continu de la turbidité peuvent aider à l'intégration des concentrations par rapport aux volumes écoulés.

L'estimation de la quantité des terres érodées peut aussi se faire par mesure de la sédimentation dans les retenues. Cette évaluation dépend de la densité et du volume des sédiments dans la retenue. L'épaisseur des sédiments est déterminée par bathymétrie, alors que leur densité varie

en fonction de la texture, de l'épaisseur des dépôts, de la minéralogie, du niveau de l'eau dans la retenue et de l'âge des dépôts (*Strand and Pemberton, 1982*).

Il existe aussi des mesures topographiques qui permettent d'évaluer la quantité de sol perdue après chaque évènement pluvieux, en suivant l'évolution topographique (hauteur) de la surface du sol et les sections des ravines par rapport à un plan et une date de référence.

I.7. Quantification de l'érosion

a) Formule de Henin '1950'

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion pluviale et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique 'Es' est donnée par la formule suivante :

$$Es = \frac{Ip.Is}{K.Ve} \quad (I.1)$$

Ip : Intensité des précipitations

I : Pente du bassin versant

Les facteurs Ip et I favorisent l'érosion

S : Susceptibilité des sols

K : Perméabilité

Ve : Végétation

Les facteurs S, K et Ve limitent l'érosion

b) Formule universelle de Wischmeier '1959'

L'objectif de Wischmeier était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosives de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production.

$$A = R (K . Ls . C . P) \quad (I.2)$$

A : Perte de terre (t/ha)

R : Indice caractérisant l'agressivité de la pluie

K : Indice caractérisant la susceptibilité du sol à l'érosion

Ls : Indice de pente, permettant de comparer les conditions topographiques locales à des conditions standards.

C : Indice de culture, permet de tenir compte du degré de protection du sol par le couvert végétal.

P : Indice de conservation du sol

c) Formule de Grailovic '1960'

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnel à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression suivante :

$$Es = 3.14 \cdot T \cdot Po \sqrt{Z}^3 \quad (I.3)$$

Es : érosion spécifique dans le bassin versant (t/km².an)

T : Coefficient de température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \quad (I.4)$$

t₀ : Température moyenne mensuelle

Po : Pluie annuelle en mm

Z : coefficient d'érosion

$$Z = y \cdot [x.a] \cdot (\delta + \sqrt{I_{moy}}) \quad (I.5)$$

Avec

Y : Valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type de sol et du climat.

[x.a] : coefficient de régularisation du bassin versant, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles. Il est aussi tabulé.

δ : Equivalant numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant.

I_{moy} : Indice de pente moyenne du bassin versant.

d) Formule de Tixeront ' 1960'

$$Es = [S_1 \cdot Ta_1 + S_2 \cdot Ta_2 + S_3 \cdot Ta_3 + \dots + S_n \cdot Ta_n] \quad (I.6)$$

Avec

Es: Erosion spécifique (t/km²/an)

Ta₁ : Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous bassins en t/ km²

S : Superficie totale du bassin versant en km²

S₁, S₂, S₃ : Superficies des sous bassins versants en km²

Si on suppose que la totalité du bassin versant possède une même perméabilité.

On aura :
$$Es = K \cdot Le \quad (I.7)$$

Le : Lame d'eau ruisselée moyenne interannuelle en mm

K : Coefficient qui tient compte de la perméabilité des terrains

K = 8.5 pour les terrains à perméabilité élevée

K = 75 pour les terrains à perméabilité moyenne à élevée

K = 350 pour les terrains à perméabilité faible à moyenne

K = 1400 pour les terrains à perméabilité faible

e) **Formule de Fournier '1960'**

$$Q_s = \frac{1}{36} \left[\frac{P^2}{P_a} \right]^{2.65} \cdot \left[\frac{H_{moy}^2}{S} \right]^{0.46} \quad (I.8)$$

Q_s : Apport solide moyen interannuel en t /km².an

P : Pluviométrie du mois le plus arrosé en mm

H_{moy} : Altitude moyenne en m

P_a : Pluviométrie moyenne interannuelle en mm

S : Superficie du bassin versant en km²

I.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de recenser les différents processus d'érosion hydrique, d'identifier les facteurs intervenants et de présenter les impacts résultants. Une attention particulière a été portée au rôle de l'érosion ravinaire à l'échelle du bassin versant, en montrant que l'érosion ravinaire est un processus significatif de dégradation du sol et que les ravines peuvent jouer à la fois le rôle de source de sédiments et d'éléments facilitant le transport de sédiments.

Chapitre II

Etude du processus de transport solide

Chapitre II Etude Du Processus De Transport Solide

II .1. Définition :

Le transport solide est par définition la quantité de sédiment transportée par un cours d'eau, il constitue la seconde phase de l'érosion. Il existe différents modes de transport solide dans les cours d'eau, ils dépendent essentiellement de la morphologie de cours d'eau et des terrains traversés. On définit deux modes de transport des sédiments : la suspension et le charriage. (Figure 1) (DEGOUTTE,2005).

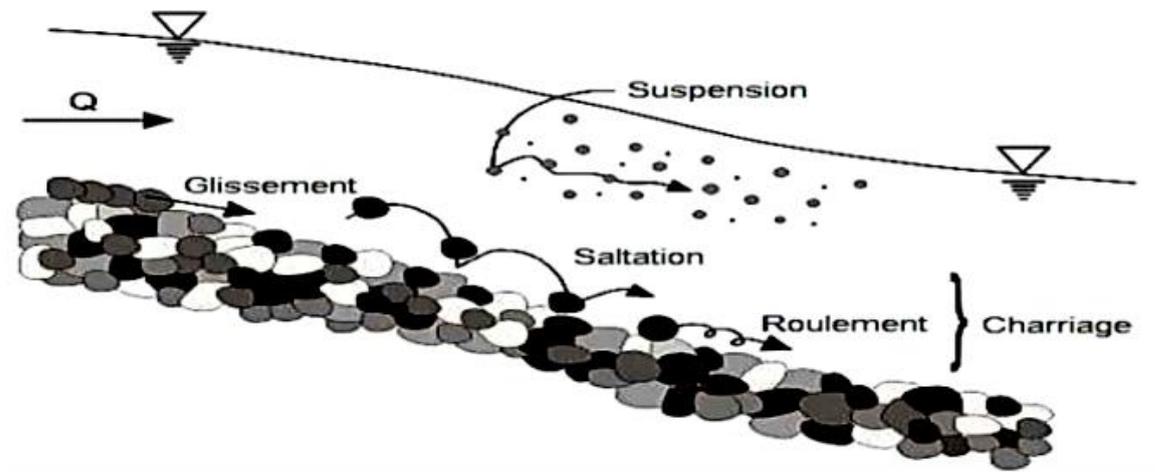


Figure II-1: Mode de transport solide.

La répartition entre ces deux types du mécanisme dépend essentiellement de la dimension des matériaux rapportés à la vitesse de l'eau et à la turbulence de l'écoulement.

En tout point d'une rivière, l'alimentation en débit solide est définie par les caractéristiques de son bassin versant (DEGOUTTE,2005).

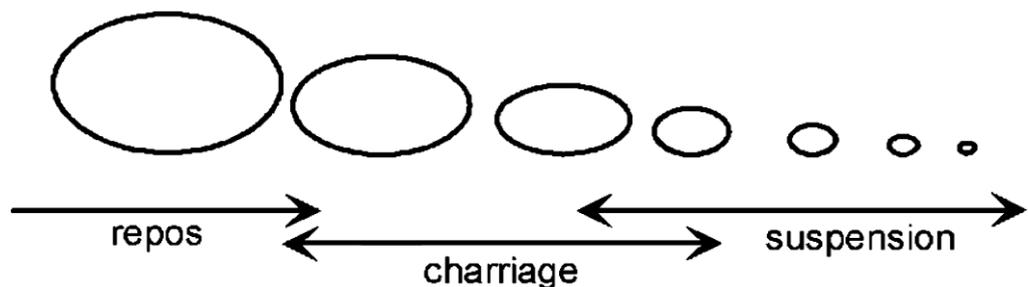


Figure II-2: Mode de transport des sédiments selon leur taille.

II.2. Les principaux facteurs dont dépendent les apports solides d'un bassin versant :

Les apports solides venant de l'amont, sont fonction essentiellement des facteurs suivants :

- Volume et intensité des précipitations.
- Géologie et nature du sol.
- Couverture du sol (végétation, fragment de roches).
- Utilisation et exploitation de sol (méthode de culture, exploitation forestiers, chantiers de construction).
- Géomorphologie et topographie.
- Réseau hydrographique (pente, forme, dimensions et tracé des canaux). Ruissellement.
- Caractéristiques des sédiments (granulométrie, minéralogique...). Hydraulique du lit (rugosité, rayon hydraulique...).

II.3. Les modes de transport :

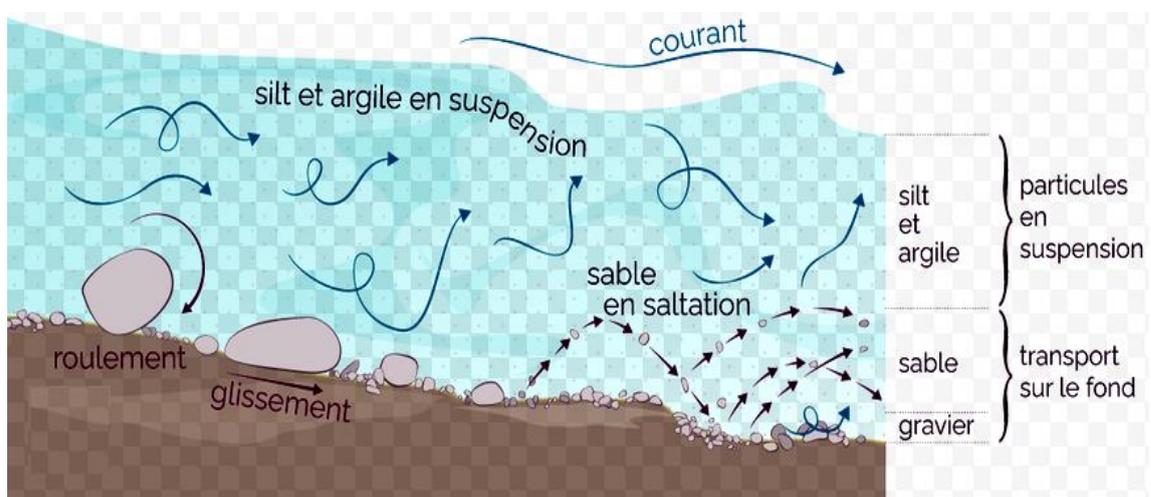
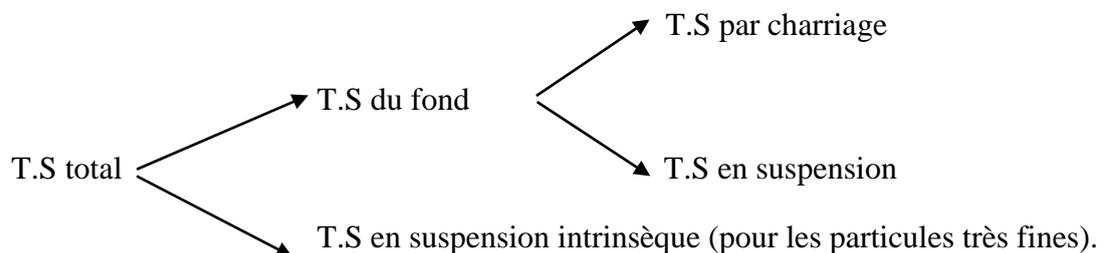


Figure II-3: Transport et sédimentation des produits de l'altération

II .3.1. Transport solide par charriage :

a. Définition :

Le charriage désigne le transport sur le fond d'éléments non cohésifs. Les particules se déplacent par un mouvement de roulement ou de glissement au voisinage immédiat du fond du cours d'eau concerné, ou encore par saltation, c'est-à-dire de succession des petits sautes au cours desquels les particules quittent le lit durant de courtes périodes.

Le transport solide par charriage concerne plutôt les particules grossières, typiquement de diamètre supérieur à 0,5 mm. Les particules plus fines, donc plus légères sont transportées par suspension (DEGOUTTE,2005).

b. Description du phénomène :

Sur un lit de matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrodynamiques.

- Les forces de pesanteur sont des forces stabilisatrices ou capacité de résistance à l'entraînement.
- Les forces hydrodynamiques sont des forces déstabilisatrices (traînée et portance), dues à l'écoulement.

La grandeur physique explicative de ce mode de transport « le charriage » est la contrainte hydrodynamique « τ_c ».

Les grains constituant l'interface (solide-liquide) ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide sauf si la contrainte du fond « τ » est supérieure à la contrainte critique « τ_c ». Ce mouvement se traduira par un transport solide sur le fond dans le sens de l'écoulement.

La contrainte sur le fond s'exprime par la formule :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot J \quad (\text{II.1})$$

Avec :

τ : contrainte sur le fond ;

J : la pente de charge régulière de l'écoulement ;

R : rayon hydraulique de la rivière.

Pour cela, on dit que le transport par charriage est un phénomène à seuil, le début du mouvement

revient à comparer directement la force déstabilisatrice due à l'écoulement, à la capacité de résistance au mouvement des matériaux qui tapissent le fond du lit (DEGOUTTE,2005).

II .3.2. Transport solide par suspension :

a. Définition :

Le transport par suspension est le deuxième type du transport dans un cours d'eau. La charge en suspension constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permet dans des conditions d'écoulement déterminées de se déplacer sans toucher le fond du lit. Il concerne les matériaux fins, argiles et colloïdes et quelquefois de silts.

Ces éléments fins sont maintenus en suspension par la turbulence et la quantité de ces matériaux, qui proviennent de l'érosion des bassins versants, due au ruissellement des eaux de pluie (DEGOUTTE,2005).

b. Description du phénomène :

La suspension ; c'est-à-dire le maintien des particules en mouvement à une certaine distance au-dessus du fond est un phénomène dû uniquement à la turbulence de l'écoulement. Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence et l'épaisseur de la couche turbulente s'accroissent également. On arrive finalement à un stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces ascensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules.

A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire bien définie ; au lieu de cela, elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur du fluide.

Donc la condition fondamentale du maintien des particules en suspension et par conséquent la production d'énergie turbulente dans le liquide. Les fluctuations transmettent cette énergie aux particules en empêchant aussi leur mouvement vers le fond.

Une formule donnée par W. Kresser, définit le critère d'apparition des phénomènes de suspension qui consistent à définir la vitesse « U » d'écoulement du liquide pour lequel la poussée du liquide sur les grains de diamètre « D » permet la mise en suspension des grains quartzeux de 0,2 à 0,85 millimètres de diamètre dans les écoulements naturels en rivière. Ce critère correspond à la formule :

$$U^2 = 360.g.D \quad (II.2)$$

Cette équation peut être écrite sous la formule suivante :

$$\tau = 360. \left(\frac{\gamma \cdot g}{C^2} \right) \quad (\text{II.3})$$

En désignant par " τ " la tension tangentielle de l'écoulement qui correspond à l'apparition des phénomènes de suspension, par " γ " le poids volumique du liquide et par " C " le coefficient de Chezy.

$$U = C \cdot \sqrt{h \cdot J} \quad (\text{II.4})$$

En désignant par " h " la hauteur du liquide qui s'écoule et par " J " la perte de charge régulière.

II .3.3. Erosion du fond, dépôt :

Dans une rivière naturelle, l'écoulement n'est jamais uniforme soit parce que des paramètres géométriques changent (pente, largeur...), soit parce qu'il y a des singularités (méandres, seuils). Il y a donc des zones à plus forte vitesse et des zones à plus faible vitesse.

Dans les zones à forte vitesse, il ya davantage de matériaux prélevés : ce sont des zones d'érosion du fond. Dans les zones à faible vitesse, les matériaux provenant de l'amont peuvent se déposer à nouveau : ce sont des zones de dépôt.

Une rivière naturelle présente donc une double variabilité de son lit :

- Dans l'espace : il y a des zones privilégiées d'érosion, et des zones privilégiées de dépôt ;
- Dans le temps : des matériaux fins déposés en régime moyen pourront être emportés en crue.

Erosion du fond et dépôts sont des conséquences de l'évolution des débits au sein du cycle hydrologique annuel. Ils traduisent une variabilité naturelle à court terme des conditions d'écoulement et de transport que l'on compare souvent à une respiration. En ce sens, ces modifications sont plutôt de type réversible : le dépôt est repris en crue puis se reconstitue à la décrue à peu près au même endroit. La respiration est un mouvement réversible du fond autour d'une valeur moyenne.

Pour une vitesse donnée, le cours d'eau a une capacité de transport solide, liée à l'énergie de l'eau. Le cours d'eau transporte toujours autant de matériaux qu'il est capable d'en transporter, à condition bien sûr que ces matériaux soient disponibles sur place, c'est-à-dire sur le fond ou sur les berges. A chaque instant, l'écoulement est donc saturé en débit solide (charriage et suspension). Dans cette situation, le tronçon de rivière considéré est en équilibre et le débit solide entrant est égal au débit solide sortant. On dit aussi que le taux d'érosion est égal au taux de

dépôts. Si le dépôt solide sortant est inférieur, il y a dépôt dans le tronçon considéré ; si le débit solide sortant est supérieur, il y a érosion du fond ou des berges dans le tronçon considéré.

II .4. Conclusion :

Le transport solide est un phénomène à seuil, avec deux modes :

- Le charriage, translation en masse des matériaux du fond.
- La suspension, entrainement par le courant turbulent, dans toute la section d'écoulement.

Le charriage et la suspension ont sur la morphologie des influences très différentes :

- Le charriage est en constante interaction avec le lit ; nous pouvons dire qu'il le façonne.
- Les matériaux en suspension ont beaucoup moins d'interaction avec ceux du fond ; ils se déplacent à la vitesse du courant et ne font que passer ; ils ont rarement un rôle morphogène important.

Chapitre III

Méthodes de mesure et de quantification du transport solide

Chapitre III Méthodes de mesure et de quantification du transport solide

III.1. Introduction :

La connaissance des évolutions sédimentaires constitue toujours un élément essentiel pour la prise de décisions concernant la conservation ou l'aménagement des cours d'eau.

Le transport solide en suspension et celui de fond constituent la source la plus importante de production de sédiments des bassins versants.

III.2. Quantification du transport solide

De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur des fleuves.

Ces différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes. Il n'y a pas de formules universelles de transport solide (Degoutte)[13], il existe un grand nombre de formules mais nous nous contenterons de deux formules les plus utilisées, l'une pour le charriage seul et l'autre pour le transport solide total.

Ces formules évaluent la capacité de transport solide constituée par des sédiments présents au fond du lit ou sur les berges.

III.2.1. Formule de transport solide par charriage

1^{re} formule empirique

- Rivière à granulométrie uniforme :

La formule empirique de Meyer-Peter et Muller (1948) donne la capacité de transport solide par charriage lorsque les sédiments ont une taille uniforme.

$$q_s = 32 (\beta \cdot \tau^* - 0.047)^{3/2} \cdot d^{3/2} \quad (1)$$

q_s : Débit solide en m^3/s par mètre de largeur de lit exprimé en volume de grains

τ^* : Paramètre de Shields, sans dimension

d : Diamètre des sédiments en m $4 \cdot 10^{-4} m < d < 3 \cdot 10^{-2} m$

γ_s/γ_w : Rapport des poids volumiques du matériau solide sur celui de l'eau [2.6 à 2.75]

β : Paramètre adimensionnel compris entre 0.35 et 1 et qui dépend de la rugosité des grains et du fond (pour un fond plat à granulométrie uniforme $\beta = 1$)

$$\beta = \left(\frac{K_f}{K_{\text{grain}}} \right)^{3/2} \quad (2)$$

$$K_{\text{grain}} = \frac{21}{d_{50}^{1/6}} \quad (3)$$

- **Rivière à granulométrie étendue**

A partir des travaux de Parker, il peut être établi que la formule de Meyer-Peter et Muller reste applicable aux rivières à granulométrie étalée en remplaçant le seuil critique (0.047) par 0.138, le paramètre β valant 1.

$$q_s = 32.L (\tau^* - 0.138)^{3/2} . d^{3/2} \quad (4)$$

d : est le diamètre médian d_{50}

2^{ème} formule empirique

La formule empirique d'England et Hansen (1967) donne le transport solide total en volume de grains à saturation par des sédiments non cohésifs (charriage et suspension) cette formule a été établie pour les sables $0.15\text{mm} < d < 5\text{mm}$ ($d = d_{50}$)

$$q_s = 0.020 K^2 . R_h^{1/3} . \tau^{*5/2} . d^{3/2} \quad \tau > 0.25 \quad (5)$$

q_s : Débit solide en m^3/s

K : Coefficient de Strickler global du lit incluant la rugosité des berges

$$\gamma_s / \gamma_w = 2.6$$

A partir d'une banque mondiale de 1900 données de laboratoire et 800 données de fleuves, des chercheurs portugais ont établis que la formule d'England et Hansen donnait de bons résultats. 66% des valeurs calculées sont entre la moitié et le double des valeurs mesurées, ce qui est honorable, puisque pour les 10 formules testées, ce ratio varie de 35% à 68%.

III.2.2. Conditions d'utilisation des formules de transport solide

Dans le calcul du transport solide il faut tenir compte des conditions suivantes :

- Toutes les formules de transport solide total ou par charriage doivent être utilisées avec la plus grande prudence car elles sont établis à partir de mesures dans les fleuves ou en laboratoire dans des conditions particulières de topographie, granulométrie, vitesse.

- Il faudra toujours mieux utiliser ces formules en tentant de les recaler, ces tout l'intérêt de leur formulation en variables adimensionnelles.
- Le débit solide $Q_s = L \cdot q_s$ dans une section s'obtient en multipliant q_s par la largeur L du lit. En général il n'est pas tenu compte de la largeur des berges car celles-ci contribuent moins au transport solide.

III.2.3. Mesure de transport solide en suspension :

Ce type de transport concerne les matériaux de très petites dimensions qui sont maintenus en suspension par la turbulence.

Le transport solide en suspension dans les cours d'eau en Algérie est très élevé. Il est mal quantifié en raison du manque de données et les erreurs et l'imprécision des mesures. L'évaluation du transport solide en suspension se base sur la connaissance de la turbidité et les débits liquides et leurs variations en fonction du temps. Dans un cours d'eau transportant une proportion appréciable quelconque de sable en suspension, un échantillon représentatif doit permettre de déterminer le transport jusqu'à proximité de fond. L'intégration sur une verticale est une bonne méthode car l'échantillon recueilli fournit une concentration moyenne pondérée par le débit le long d'une verticale.

On multiplie cette concentration par le débit liquide le long de chaque verticale en utilisant la formule suivante :

$$Q_s = C \cdot Q \cdot K \quad (6)$$

Où :

Q_s : débit solide en suspension en t/j

Q : débit liquide en m^3/s

C : concentration moyenne mg/l

K : facteur de conversion de 0.0864 pour les concentrations inférieures à 15 mg/l.

III.2.4. Mesure de la turbidité :

En pratique, la mesure de la turbidité (la concentration en matière solide en suspension) est basée sur la prise systématique d'échantillon et la connaissance correcte de sa variation temporelle nécessite d'augmenter la fréquence des prélèvements :

- 1-** En crue, la fréquence des prélèvements est fixée pour chaque station en fonction de la vitesse de montée et de descente des crues, la surface du bassin et la durée des averses, en règle générale
- * un prélèvement est effectué durant la montée des eaux ; si cette montée est lente (supérieure à une heure) on prélève un échantillon d'eau toutes les heures.
 - * un prélèvement doit obligatoirement être effectué au maximum de la crue.
 - * en décrue, et suivant la vitesse de cette décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures ensuite.
- 2-** En étiage, ou lorsque le débit est constant au cours de la journée, il y'a lieu d'effectuer un seul prélèvement généralement à 12h.

On prélève des échantillons eau-sédiments en un point unique soit sur le bord, soit au centre à l'aide du récipient (bouteilles) en matière plastique d'une contenance de 0.5 à 1 litre. On analyse généralement en laboratoire les échantillons. Pour déterminer la concentration des particules, les échantillons eau-sédiments sont filtrés sur des filtres (membrane poreuse dont la taille moyenne des pores est en général de 0,2 μm) pesés au préalable, séchés à 100°C à l'étuve, la concentration est le rapport entre les sédiments (poids sec) et le mélange total eau-sédiment exprimé en milligramme par litre (mg/l) ou (g/l).

Afin de déterminer le volume de matériaux transportés par un cours d'eau, on peut combiner les renseignements sur la concentration et sur le débit ou écoulement du cours d'eau, on obtient alors le débit solide qui correspond à la quantité totale de sédiments transportés pour une période donnée (l'heure, jour, mois, année).

Le débit solide à un instant donné (noté Q_s et exprimé en kg/s) est égal au produit de la concentration (noté C et exprimé en g/l) par le débit liquide (noté Q_l et exprimé en m^3/s).

III.2.5. Appareils de prélèvement :

Un échantillonneur bien conçu est profilé de façon à éviter les perturbations et son ajutage d'admission est dessiné de façon à prélever à une vitesse identique à celle du courant (u.s. National hand book, 1978).

Les principaux types de préleveurs qui sont utilisés pour les sédiments en suspension :

- 1** – Préleveur à intégration, est préféré pour la plupart des recherches, parce qu'il est utilisé pour recueillir des mélanges eau-sédiments pendant un certain intervalle de temps, ce qui contribue à réduire les variations dues aux fluctuations temporelles ; ce peut être un :

a – Préleveur à intégration ponctuelle qui est employé à recueillir des échantillons en plusieurs points par verticale

b – Préleveur à intégration sur une verticale qui fournit un échantillon intégré de la surface au fond obtenu en déplaçant l'appareil à vitesse constante dans un aller retour de la surface au fond .

2 – Préleveur à pompe est un embout formé d'un tube métallique faiblement coudé, fixé sur une perche permet d'effectuer, à l'aide d'un tuyau flexible et d'une pompe, des prélèvements en divers points de la section de mesure, on les utilise généralement lorsqu'il est important de recueillir un échantillon à des intervalles de temps déterminés au cour d'une crue par exemple.

3 – Préleveurs instantanés, tous fournissent un échantillon instantané du mélange eau-sédiments en un point donné, ils sont constitués d'un récipient largement ouvert qui peut se refermer, de façon quasi instantanée au moyen d'une commande appropriée.

On analyse généralement en laboratoire les échantillons de sédiments en suspension, une fois ceux-ci prélevé pour déterminer la concentration et la taille des particules.

III.2.6. Difficulté de mesure :

La difficulté essentielle de la mesure réside dans la non uniformité de la concentration en sédiment dans la section de mesure et son extrême variation temporelle. Prélevé en surface de l'oued, l'échantillon aura une teneur en suspension moindre que la teneur moyenne de la verticale (sauf zone de prélèvement extrêmement turbulente).

III.2.7. Mesure du transport solide de fond :

Ce type de transport solide concerne les gros matériaux, ces derniers se déplacent sur le fond par roulement, glissement, saltation, et leur vitesse est inférieure à celle de l'écoulement.

* La méthode de base d'échantillonnage du transport solide de fond est la prise directe d'échantillon, les appareils les plus répandus sont de genre capteur de fond. Les mesures de transport de fond, à l'aide d'un capteur de fond, sont faites sur plusieurs verticales dans une section en travers. On choisit le nombre de verticales de mesure selon la longueur de la zone ou se produit le transport de fond.

Les mesures de chaque verticale fournissent le débit unitaire à cette verticale.

$$qsb = (m/l \cdot T) \cdot \epsilon \quad (7)$$

Où

q_{sb} : transport de fond par unité de largeur

m : masse de sédiments piégés

l : largeur de l'orifice d'entrée du capteur

τ : temps de prélèvement au point de mesure

ε : coefficient d'efficacité du capteur

On détermine le transport de fond total par l'équation :

$$Q_{sb} = \sum_{i=1}^n (q_{sb1} + q_{sb2}) \Delta b_i / 2 \quad (8)$$

Avec :

Q_{sb} : débit solide de fond total

Δb_i : distance entre les points de mesure

III.2.8. Calcul du débit solide de fond :

Les débits solides des transports par charriage peuvent être calculés par différentes formules empiriques. Pour appliquer ces formules il faut disposer d'informations sur les caractéristiques des matériaux du lit ou des particules se déplaçant au fond. La répartition granulométrique et la masse volumique des matériaux du fond sont les caractéristiques les plus importantes.

Le principe de la force tractrice, attribué à Du Boys, permet de traiter le problème de la détermination quantitative du débit solide de charriage, il est intéressant de constater l'analogie de la forme de la plupart de ces formules, Elle contiennent toutes la différence entre τ et τ' ou d'autre forme analogues telles que $(Q - Q_{cr})$ ou encore $(\omega - \omega_0)$.

1 - Formule de Chang :

$$q_s = A \cdot \tau_0 \cdot (\tau_0 - \tau_c) \quad (9)$$

avec :

q_s : débit solide par unité de largeur

A : dimension du matériaux

τ_c : force tractrice critique correspond au début de mouvement des grains.

τ_0 : force tractrice

$$(\tau_0 = \gamma h I) \quad (10)$$

2 - Formule de Meyer- Peter :

L'auteur a proposé la formule suivante pour rivière à gravier

$$q_s = 45 \cdot D_{50}^{3/2} [\tau_* (D_{50}) - 0.138]^{3/2} \quad (11)$$

Tel que :

τ_* : contrainte de Shields

D_{50} : diamètre moyen des sédiments.

3- Formule de Meyer- Peter et Müller (1948)

La formule de Meyer- Peter et Müller donne la capacité de transport solide par charriage, lorsque les sédiments ont une taille uniforme.

$$q_s = 8\sqrt{g} \cdot \sqrt{\gamma_s/\gamma_w - 1} \cdot (\beta\tau_* - 0.047)^{3/2} \cdot d^{3/2} \quad (12)$$

$$\tau_* = R \cdot i / (\gamma_s/\gamma_w - 1) \cdot d \quad (13)$$

Avec :

q_s : débit solide par unité de largeur m³/s

τ_* : paramètre de Shields sans dimension

d : diamètre médian des sédiments (m)

γ_s et γ_w : poids volumique de l'eau et du matériau solide

$$\beta = (0.06/\tau_* + 0.41 \cdot \tau_*)^{15/16} \quad (14)$$

Paramètre dépend de la rugosité des grains et de la rugosité du fond.

Meyer- Peter et Müller ont établi leur formule dans les conditions suivantes :

- écoulement uniforme ;
- $0.01 \text{ m} < R < 1.20 \text{ m}$;
- $4 \cdot 10^{-4} < i < 2 \cdot 10^{-2}$
- $0.4 \text{ mm} < d < 30 \text{ mm}$
- granulométrie uniforme.

4 - Formule de Shields

$$g_s = 10 \cdot q \cdot i \cdot (\tau_o - \tau_{cr}) / [(\rho_s - \rho) - 1]^2 \cdot D_{50}$$

avec :

g_s : débit charrié de fond par unité de largeur (kg/s.m)

Q_l : débit liquide instantané (m³/s)

i : pente (%)

τ_{cr} : contrainte critique de début de charriage pour laquelle Shields admet :

$$\tau_{cr} = 0.060 (\gamma_s - \gamma) d_{50}$$

τ_o : contrainte de frottement dépendant de l'écoulement.

5- Formule de Engelund et Hansen (1967)

A partir d'une banque mondiale de 1900 données de laboratoire et 800 données de fleuves, des chercheurs portugais ont établi que la formule de Engelund et Hansen donnait de bon résultats. 66% des valeurs calculées sont entre la moitié et le double des valeurs mesurés

La formule empirique de Engelund et Hansen (1967) donne le transport solide totale pour des sédiments non cohésifs (charriage +suspension).

$$q_s / \left(\sqrt{(\gamma_s / \gamma_w - 1) \cdot g \cdot d^3} \right) = 0.08 (k^2 \cdot y^{1/3} / g)$$

k est le coefficient de Strickler global des parois incluant la rugosité des berges.

En remplaçant g par sa valeur, en supposant $\gamma_s / \gamma_w = 2.6$ et tenant compte de la largeur du lit, nous obtenons la formule suivante :

$$Q_s = 0.032 \cdot k^2 \cdot L \cdot y^{1/3} \cdot \tau^{*5/2} \cdot d^{3/2}$$

Cette formule a été établie pour $0.15\text{mm} < d < 5\text{mm}$

6- Formule d'Einstein Brown (1950)

$$q_s = 3.13 \cdot [(\rho_s / \rho) - 1]^{1/2} \Phi \cdot F \cdot D_{50}^{3/2}$$

$$F = \sqrt{2/3 + 3.67 \cdot v^2 / (\rho_s / \rho - 1) D_{50}^3} - \sqrt{3.67 \cdot v^2 / (\rho_s / \rho - 1) D_{50}^3}$$

Cette formule est utilisable pour un transport solide se faisant soit uniquement par charriage, soit par charriage et suspension en même temps,

$$\Phi = 2.15 \cdot e^{-0.311/\tau(D_{50})} \quad \text{si } \tau_*(D_{50}) < 0.2 \text{ (charriage seul)}$$

$$\Phi = 40 \cdot \tau_*(D_{50})^3 \quad \text{si } \tau_*(D_{50}) > 0.2 \text{ (charriage et suspension)}$$

Elle est valable pour $D > 0.3$ mm sans indication de limite supérieure.

Avec : ν : est la viscosité cinématique du fluide.

7- Formule de Sogreah-Lefort (1992) :

$$Q_s = 2.7 \cdot (d_{90} / d_{30})^{0.2} \cdot I^{1.5} \cdot [I - (Q_0 / Q_l)^{0.375}] \cdot Q_l$$

Cette formule est établie dans les conditions suivantes :

Avec : $0.2\% < I < 20\%$

$d_{50} > 1\text{mm}$

$Q_0 / Q_l < 25$

Chapitre IV

Processus de l'envasement des barrages

Chapitre IV. Processus de l'envasement des barrages

IV.1. Introduction :

La construction des barrages par l'aménagement des cours d'eau modifie les conditions d'écoulement du débit solide.

A l'entrée de la retenue et par suite de la chute de la vitesse du cours d'eau le transport des sédiments diminue, les éléments les plus grossiers déposent immédiatement, quand aux fins ; plus légers, continuent leurs trajets en suspension jusqu'à se déposer aux eaux mortes, où ils se décantent lentement au pied amont du barrage là où les vitesses d'écoulement deviennent nulles.



Figure IV.1 : Envasement des barrages

IV.2. Problemes posés par la sedimentation

La sédimentation dans les barrages pose d'énormes problèmes au niveau du réservoir lui même, mais aussi en amont et en aval du réservoir. Elle entraîne la réduction de la capacité utile du barrage. Le blocage des organes de vidange. La sédimentation peut mettre la stabilité de l'ouvrage en danger.

Elle peut aussi accélérer l'eutrophisation du lac. Les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par les canaux, à partir des barrages, se déposent dans ces ouvrages, réduisent leur débitance, et rendent difficile leur exploitation.

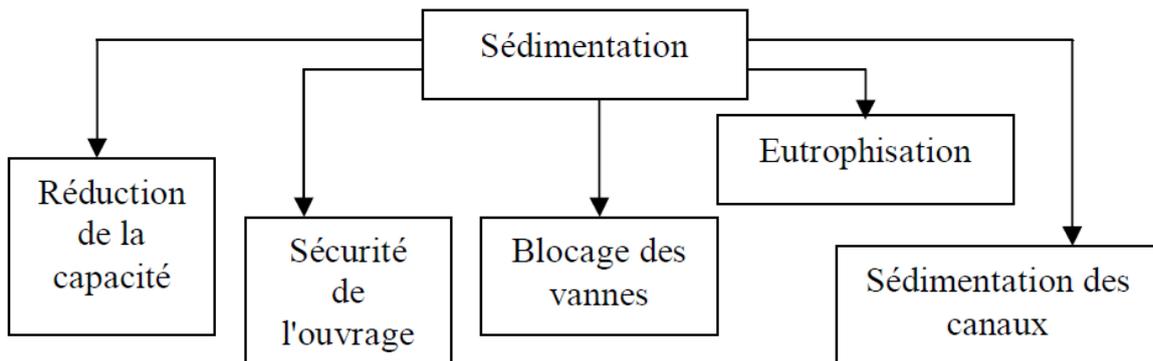


Figure IV.2 : Problèmes posés par la sédimentation

IV.3. Origine de l'envasement d'une retenue:

Tout cours d'eau est le vecteur de deux débits :

- Le débit hydraulique Q .
- Le débit solide Q_s

Ce débit solide appelé transport solide est généré par l'érosion de ruissellement des sols ou l'érosion des berges du cours d'eau.

Il est donc constitué de particules de tailles différentes selon que l'on a affaire à des limons, du sable ou des galets.

Les éléments solides se déplacent soit en suspension dans l'eau, soit par charriage sur le fond de la rivière.

Lorsque le cours d'eau débouche dans une retenue, le passage vers une section beaucoup plus large que celle de la rivière entraîne le ralentissement de l'écoulement, ce qui a pour effet de provoquer la décantation au fond de la retenue de ces particules.

Ces matières qui se sont décantées vont avec le temps se fixer au fond et se sédimenter.

C'est ainsi qu'une retenue s'envase au gré de l'évolution de ce transport solide.

IV.4. Conséquences

Au cours du temps, si aucune action de désenvasement n'est mise en place, la retenue va augmenter son volume de sédiments. Si ce volume devient trop important des effets vont se faire sentir à plusieurs niveaux.



Figure IV.3 : Envasement du barrage d'Ighil Emda (cliché Ouaret, 2004)

Tout d'abord on risque de colmater les organes de prise d'eau et de vidange. Ce qui peut gêner le bon déroulement d'une vidange et même être dangereux lorsqu'il est nécessaire, pour des mesures de sécurité, de vider rapidement la retenue.

De la même façon, si l'eau, qui est prise dans la retenue pour être turbinée, est chargée de matières en suspension, on risque d'encombrer les conduites d'amenée et les conduites forcées avec ces matériaux et donc de limiter les possibilités de turbinage, voire même d'abîmer les turbines.

Plus la retenue est envasée, plus, lors des vidanges, l'eau qui passera à l'aval de la retenue, dans la rivière, sera chargée en sédiments remis en suspension.



Figure IV.4 : Chariage très important dans l'oued Labiod en période de crue
(cliché.Benguemouza, 2011)

Ce qui confèrera à l'eau, tout d'abord, une couleur brunâtre sur une distance plus ou moins longue, ainsi qu'une certaine toxicité due à la diminution du taux d'oxygène dessous (consommé par les MES organiques) et l'augmentation de polluants (relargués par ces mêmes MES).

En conséquence le secteur à l'aval direct risque d'être gravement affecté:

- Colmatage des frayères.
- Mortalité piscicole.
- Dégradation des berges.

Pour finir, lorsque de petites retenues sont beaucoup envasées, celles-ci perdent alors une bonne partie de leur capacité, et donc de leur utilité et, par là même, de leur rentabilité pour la production d'hydro-électricité.

Face à tous ces inconvénients plus ou moins graves une politique de gestion des sédiments s'impose de plus en plus. Cette gestion qui existe déjà pour les petites retenues tend à se généraliser pour des ouvrages plus importants.

Il convient donc de gérer une retenue non plus en fonction seulement de l'hydraulicité mais en tenant également compte du transport solide des rivières, d'où l'idée de notre étude.

IV.5. Etapes de l'envasement d'un barrage

Le processus de l'envasement d'un barrage débute dans la première phase par l'arrachage des particules fines de leurs positions initiales par le ruissèlement. Dans la seconde phase, les sédiments seront drainés par les cours d'eau jusqu'au barrage. Enfin dans la troisième partie, les particules seront pièges pour se décanter et se tasser au fond du lac du barrage.

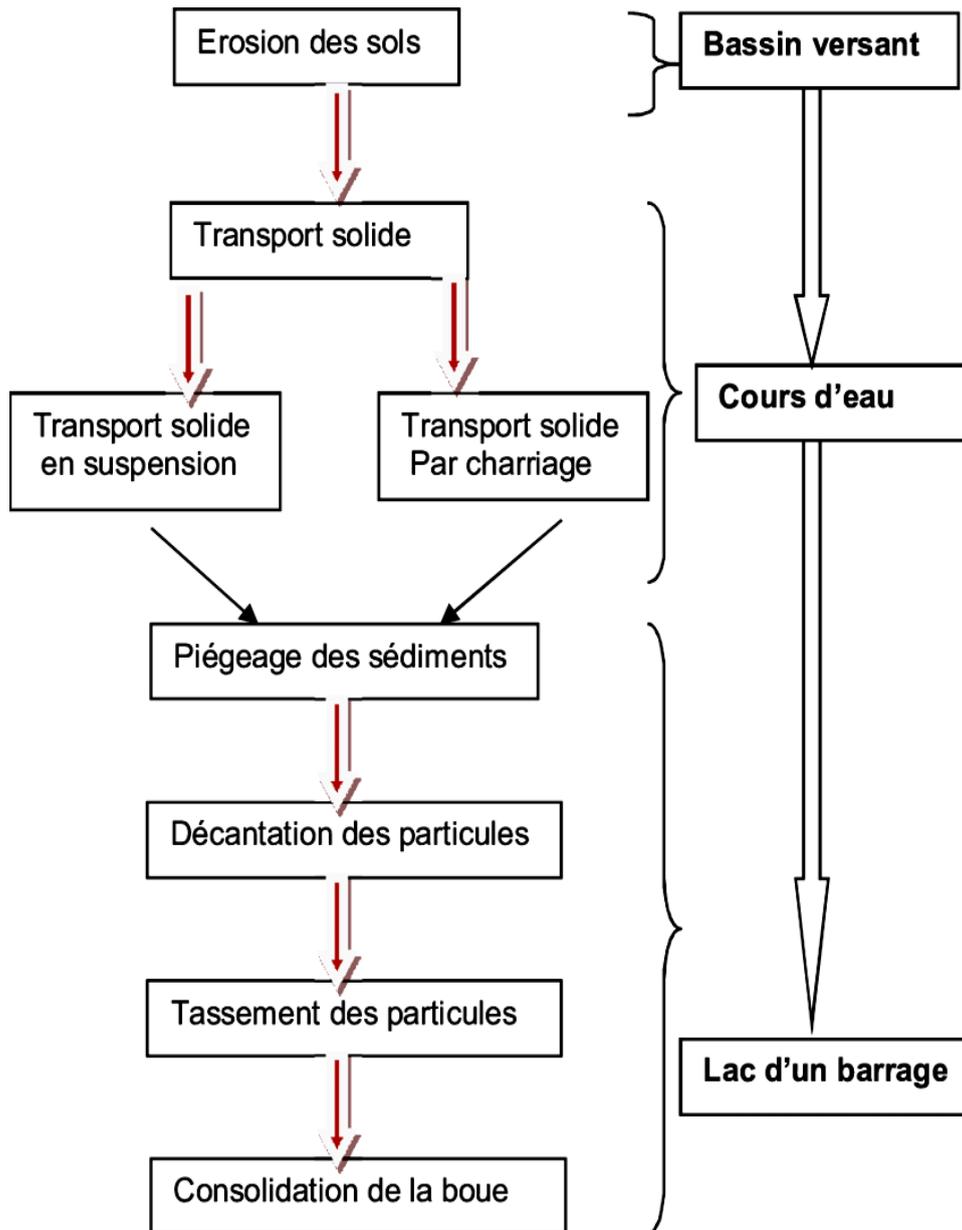


Figure IV. 5 : Processus d'envasement d'un barrage Réservoir (Remini, 1990)

IV.6. Influence des différentes caractéristiques des retenues sur le mécanisme de l'envasement

IV.6.1. Influence de la topographie de la retenue

La topographie de la retenue modifie l'envasement en modifiant les conditions d'écoulement des courants. Cet effet, bien peu étudié est difficile à quantifier. Il est probablement déterminant pour la localisation des dépôts. En général, plus la forme de la retenue est tortueuse, plus l'envasement se déplace vers l'amont.

IV.6.2. Présence de la végétation

La végétation existante en fond de retenue peut retenir une grande partie des sédiments, de plus, elle accélère la consolidation des vases par la succion de l'eau interstitielle.

IV.6.3. Présence d'affluents

Des affluents se jetant dans le réservoir (lac) de la retenue perturbent parfois le mécanisme classique d'envasement, notamment s'ils sont eux mêmes chargés de matière en suspension.

IV.6.4. Influence du mode d'exploitation du réservoir

La mise en mouvement des sédiments dans la partie découverte dans la retenue, ou la rivière va en général retrouver son lit d'origine, ou en tout cas divaguer en creusant son chenal parmi les alluvions précédemment déposées.

De plus des talus glissent, soit du fait de l'érosion progressive due au rétablissement du cours d'eau, soit simplement parce que les pentes d'équilibre des talus sont plus faibles hors d'eau.

L'exploitation de la retenue à niveau bas déplace vers l'aval l'ensemble de l'alluvionnement. Ceci explique que dans la pratique on n'observe pas toujours un classement granulométrique régulier en fonction de la distance au barrage. L'utilisation fréquente des vidanges de fond contribue à limiter l'envasement, soit en favorisant l'écoulement des courants de densité, soit en ayant un effet de chasse.

IV.7. Périodes privilégiées pour la sédimentation:

Le transport solide est le plus abondant au moment des crues. C'est donc durant ces périodes que la sédimentation des retenues s'effectue principalement.

Les périodes de crues ont lieu généralement chaque année à la fonte des neiges, et également en automne lors de pluies ou d'orages importants. En plus de ces périodes annuelles, il existe tous les 5, 10, 100 ans des crues beaucoup plus importantes (crues décennales, centennales...) qui vont aggraver ce phénomène. C'est pourquoi nos calculs se sont basés sur des débits de crues de retour 1, 10 et 50 ans.

Dans le cas où, à ce moment là, le barrage est vide et ouvert, le flot solide et liquide transite à travers le barrage et poursuit son chemin vers l'aval de façon naturelle. Dans cette configuration, le barrage est "transparent" vis à vis du transport solide et de l'écoulement. Dans ce cas on parle de "transparence" ou de "chasse en période de crue".

IV.8. Piégeage des sédiments

Une fois l'eau de crue arrive au niveau du lac du barrage, les matériaux sont piégés par les eaux calmes du barrage. Les particules grossières seront freinées à l'entrée du barrage sous forme d'un delta. Par contre les particules fines continueront leur chemin en fonction de la concentration, soit sous forme de courants de densité ou par diffusion.

Les barrages Maghrébins sont considérés comme de véritables fosses à sédiments.

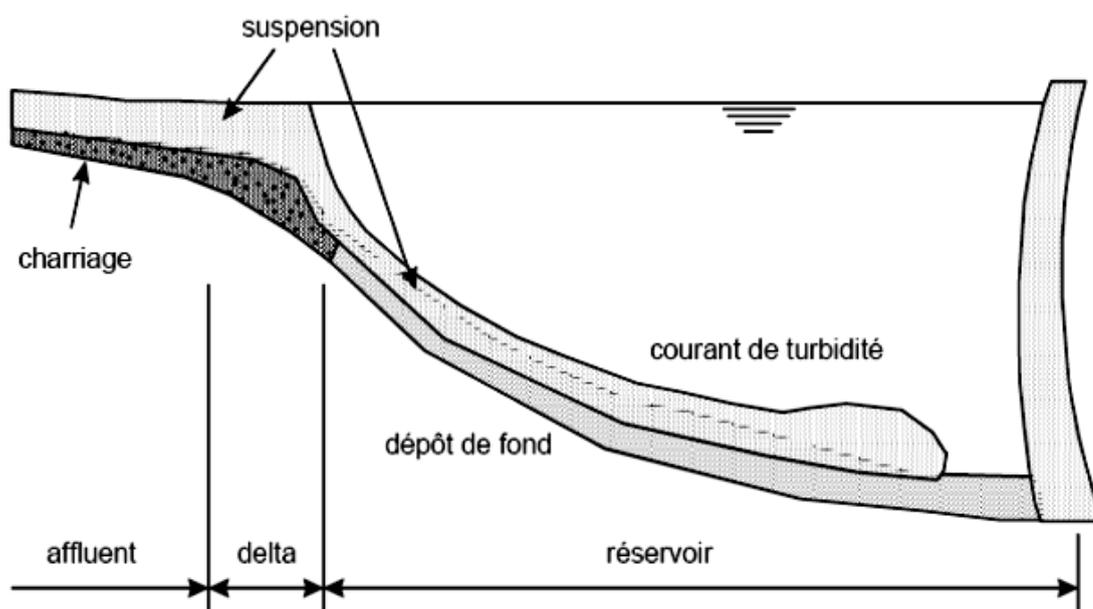


Figure IV. 6 : Mode d'envasement

IV.9. Courants de densité dans les barrages

Dans les régions arides, les crues drainent des quantités élevées en particules fines dépassant généralement la concentration de 100 g/l (Remini, 1997). Le contact des eaux chargées d'une crue avec celles du lac d'un barrage engendre l'apparition des courants de densité qui se propagent sur le fond au-dessous des eaux claires du lac d'un barrage sous forme d'une couche très dense bien individualisée. Arrivés devant l'obstacle (digue), les courants de densité après avoir buter contre le mur se stabilisent sous forme d'un lac boueux sous les eaux claires du lac. La succession des courants de densités provoquées par les différentes crues durant la saison d'automne augmentera rapidement l'envasement du barrage. L'apparition des courants de densité à l'entrée d'un lac (point de plongée) est conditionnée par des concentrations très élevées en particules fines (Remini, 1997). La géométrie du lac du barrage de type « canal » favorise la propagation des courants de densité. Ils peuvent parcourir une distance de plus de 10km du point de plongée jusqu'au pied du barrage.

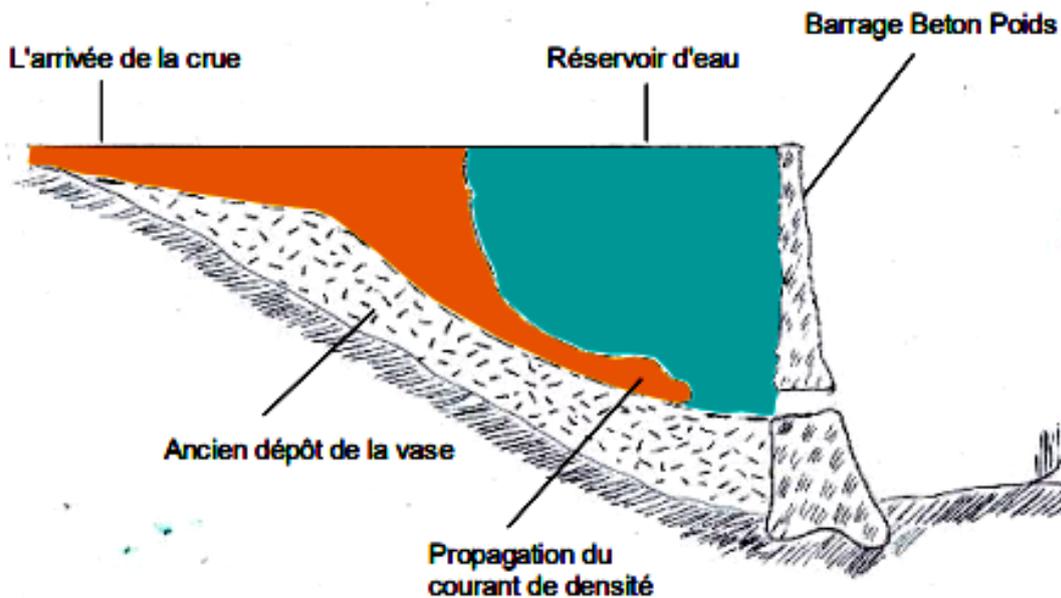


Figure IV. 7 : Schéma de la propagation d'un courant de densité au fond d'un barrage
(Schéma Remini, 2016)

IV.10. Influence des barrages sur la continuité sédimentaire

L'implantation de barrages sur les cours d'eau s'accompagne toujours de modifications hydromorphologiques et physico-chimiques en perturbant notamment la continuité sédimentaire mais aussi écologique.

Ces ouvrages vont modifier le régime hydrologique des cours d'eau concernés, passant de régimes dynamiques fluviaux (avec turbulences liées aux courants) à des régimes statiques proches des domaines lacustres (régimes plus calmes, moins de turbulences).

Cette modification de régime permet l'accumulation privilégiée de particules fines à proximité du barrage alors que les plus grossières seront plus abondantes en queue de barrage (Figure IV. 8).

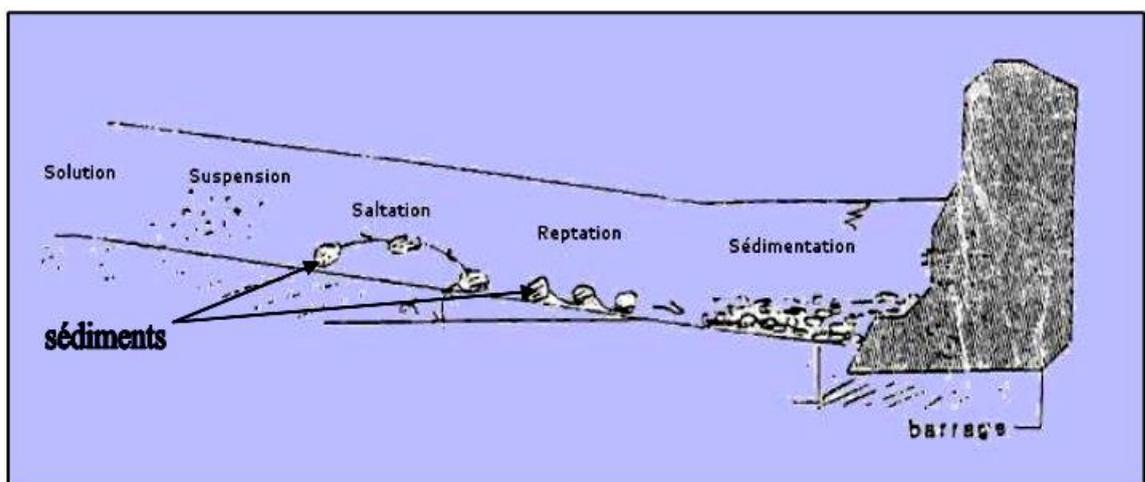


Figure IV. 8 : Schéma illustrant le mode de transport par ruissellement : www.ma.auf.org

Les barrages peuvent perturber le transit des sédiments de l'amont vers l'aval d'un cours d'eau sur des longues distances, parfois jusqu'à l'estuaire. Ils constituent des barrières physiques qui représentent des pièges à sédiments efficaces. On estime une rétention de 70 à 90 % du volume des sédiments exportés du bassin versant, avec comme corolaire un tri granulométrique des sédiments. Par exemple, les galets ou les sables grossiers vont s'accumuler au sein des retenues. Cela aura des incidences en aval sur les habitats des écosystèmes aquatiques et ripariens (sur les rives) ainsi appauvris, mais aussi favoriser les phénomènes d'enfoncement du lit d'un cours d'eau au cours du temps.

A l'opposé, la perte de sédiments fins également piégés au sein des retenues de barrages va avoir des effets négatifs, par exemple sur le transport en aval des nutriments. Cela peut aussi diminuer la turbidité des cours d'eau, essentielle pour certaines espèces piscicoles.

Toutefois le pourcentage de sédiments piégé va être fonction du temps de résidence de la masse d'eau dans le barrage. Les retenues de barrage sont ainsi alimentées par les produits d'érosion des bassins versants au sein desquels ils sont édifiés. De même l'aménagement du bassin versant va jouer un rôle fondamental sur la nature et l'abondance des sédiments. En effet, l'apport en matériel issu de l'érosion des formations géologiques est fonction de la prédominance des forêts, de l'agriculture, des activités industrielles, de l'urbanisation principalement.

Toutefois, tous les barrages n'ont pas les mêmes incidences sur les cours d'eau. Cela dépend notamment de la hauteur de l'ouvrage, de son implantation – plus ou moins en amont du bassin versant, de l'existence de barrages successifs sur un même cours d'eau. Dans l'absolu, l'implantation des barrages a pour effet d'augmenter l'érosion des zones amont des bassins versants et donc d'augmenter leur charge sédimentaire. Cela est dû notamment aux modifications du fonctionnement hydrologique du cours d'eau. Or, ce que l'on constate est une réduction de la quantité de sédiments en aval, du fait de leur rétention au sein des retenues.

IV.11. Problèmes posés par l'envasement

Les problèmes que pose l'envasement des retenues de barrages, on peut retenir cinq inconvénients majeurs qui sont :

1) Réduction de la capacité de stockage :

Cette réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement, chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.

2) Obturation des organes de vidange :

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond, et de ce fait toute opération de vidange de la retenue est impossible.



Figure IV. 9 : Blocage de la vanne de fond de la deuxième digue du barrage Boughezoul
(cliché. Remini, 2011)

3) Envasement des canaux d'irrigation :

Le dépôt des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation, dans les pays arides et semi-arides, l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées et bien sûr le débit d'eau véhiculée.



Figure IV. 10 : Curage d'un canal par les moyens mécaniques (Cliché. OPIM, 2008)

4) Dégradation de la qualité de l'eau :

Les sédiments véhiculent des produits chimiques provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs, entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau et favorisant l'eutrophisation de ces réservoirs.

5) Sécurité de l'ouvrage :

La sédimentation des retenues a un impact sur la sécurité des barrages, par la mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la force hydrostatique produite par le remplacement accéléré du volume d'eau par la vase.

IV.12. Conclusion

La sédimentation des barrages est un phénomène naturel très complexe qu'il faut l'étudier de l'amont à l'aval du barrage. Les conséquences de ce phénomène sont extrêmement gênantes. Elle a un impact au niveau du réservoir lui même, mais aussi en amont et en aval du barrage. Le mécanisme de la sédimentation et plus particulièrement les courants de densité restent l'étape la plus délicate de ce processus et leur maîtrise aboutira directement à la proposition des méthodes de lutte adéquates

Chapitre V

Moyens techniques de lutte contre l'envasement

Chapitre V : Moyens techniques de lutte contre l'envasement

V.1. Introduction :

Les risques d'envasements des ouvrages peuvent être évités ou atténués par la mise en place d'un programme d'aménagement des bassins versants, lié à la protection des ouvrages. Pour cela, la mise en œuvre de mesures adéquates de protection des berges, de reboisement, de la plantation fruitière, correction torrentielle est indispensable. Les techniques de lutte contre l'érosion sont appelées à être généralisées en vue, notamment de contrer les effets du ruissellement des eaux. Il faut veiller, également à ce que les aménagements de protection afférents soient strictement et vigoureusement entretenus, car leur négligence ou abandon aura un effet inverse, c'est à dire une accélération de l'érosion.

V.2. Aménagements antiérosifs

V.2. 1. Différents aménagements antiérosifs

L'érosion reste encore mal connue et surtout mal maîtrisée car elle est discontinue dans le temps et dans l'espace. Les processus, les causes et les facteurs déterminant l'érosion étant très variable, il n'y a pas de recette généralisable de lutte antiérosive.

En matière de traitement des zones touchées par l'érosion hydrique, il est recommandé d'appliquer un traitement à 2 volets :

- Un volet mécanique appelé communément correction torrentielle, consistant à implanter un réseau de seuils à travers des ravins de différents type.
- Un volet biologique nécessitant la végétalisation des versants et des ravins.

Il est essentiel d'appliquer ce traitement dans les 2 volets pour avoir l'effet souhaitable, attendu que l'application du seul volet d'implantation de seuils ne sera conduire à des résultats satisfaisants car les seuils se sédimentent rapidement et perdent leur efficacité. En effet le traitement par l'établissement de la végétation sur les versants assure une permanence des effets positifs.

La majorité des techniques antiérosives s'intègrent dans l'un des deux objectifs : maîtriser l'érosivité du ruissellement ou réduire l'érodibilité de la surface, or ces principales méthodes sont décrites et organisées en fonction des facteurs sur lesquels agissent les techniques de lutte contre l'érosion.

Les principes qui peuvent être retenus pour limiter efficacement l'érosion sont :

- Identifier d'abord les différentes zones suivant les processus dominants, tant du point de vue de la formation du ruissellement que l'érosion elle-même (travail à l'échelle du bassin versant, unité spatiale de base).
 - Protéger le sol de l'impact de la pluie.
 - Retarder et réduire la formation d'un écoulement superficiel : augmenter la capacité d'infiltration et la capacité de stockage.
 - Accroître la protection et la résistance des zones où les conditions morphologiques peuvent favoriser l'incision.
 - Réduire les capacités de détachements et de transport du ruissellement en limitant sa vitesse et sa concentration.

V.2. 2. Aménagements mécaniques

Un seuil est un ouvrage construit au travers du lit d'un ravin. Il peut être en maçonnerie, en béton, en pierres sèches, en grillage métallique ou en gabion.

Il est placé perpendiculairement à l'axe du lit pour arrêter l'érosion en profondeur et sur les côtés, retenir les matériaux charriés, et stabiliser les éboulis des berges en leur procurant un appui. Son efficacité est fonction de sa durabilité, il faut donc donner au seuil une réelle solidité par l'emploi de matériaux convenables et une construction soignée.

Ces aménagements servent surtout dans les ruisseaux, ravins, et ravines. Ils consistent à réduire la vitesse de ruissellement, retenir les sédiments et protéger les infrastructures socio-économiques en aval.

Il existe plusieurs types de seuils selon les matériaux de construction utilisés :

- **Les seuils en pierres sèches :**

Cette technique consiste à stabiliser le fond des ravines par la construction de quelques seuils en pierres non cimentées mais bien ancrées sur les berges de manière à en augmenter la cohésion et la rigidité. Les pierres doivent être arrangées soigneusement de façon à ce que l'ouvrage soit bien stable, Celles-ci doivent être déposées sur le sol sans architecture spéciale et on continue à construire la diguette jusqu'à une hauteur qui dépasse de 10 à 15 cm du niveau initial du sol avant l'incision par érosion.

Cette technique est efficace du fait qu'elle contribue à casser l'énergie du ruissellement et à limiter sa capacité au creusement.



Figure V.1: Seuil en Pierre Sèche

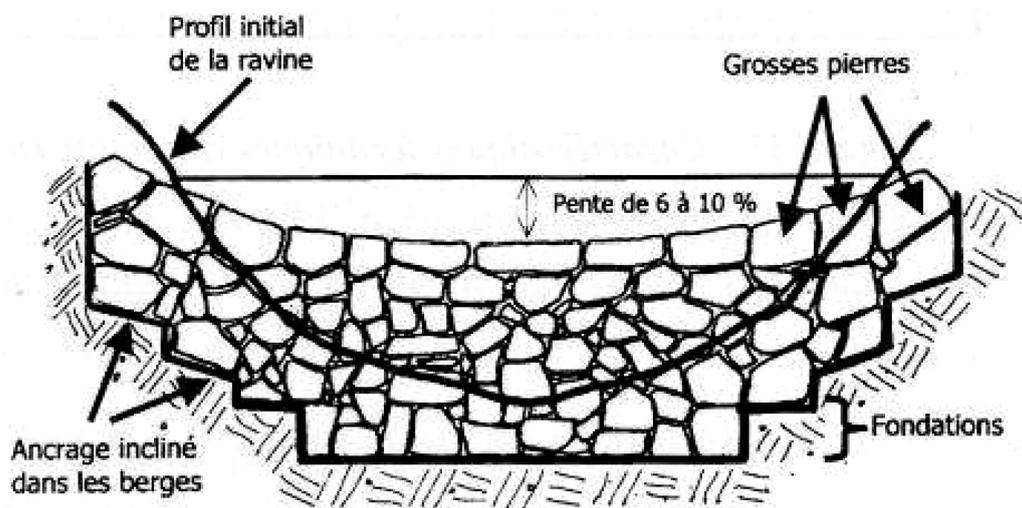


Figure V.2: coupe longitudinale d'un seuil en pierre sèche

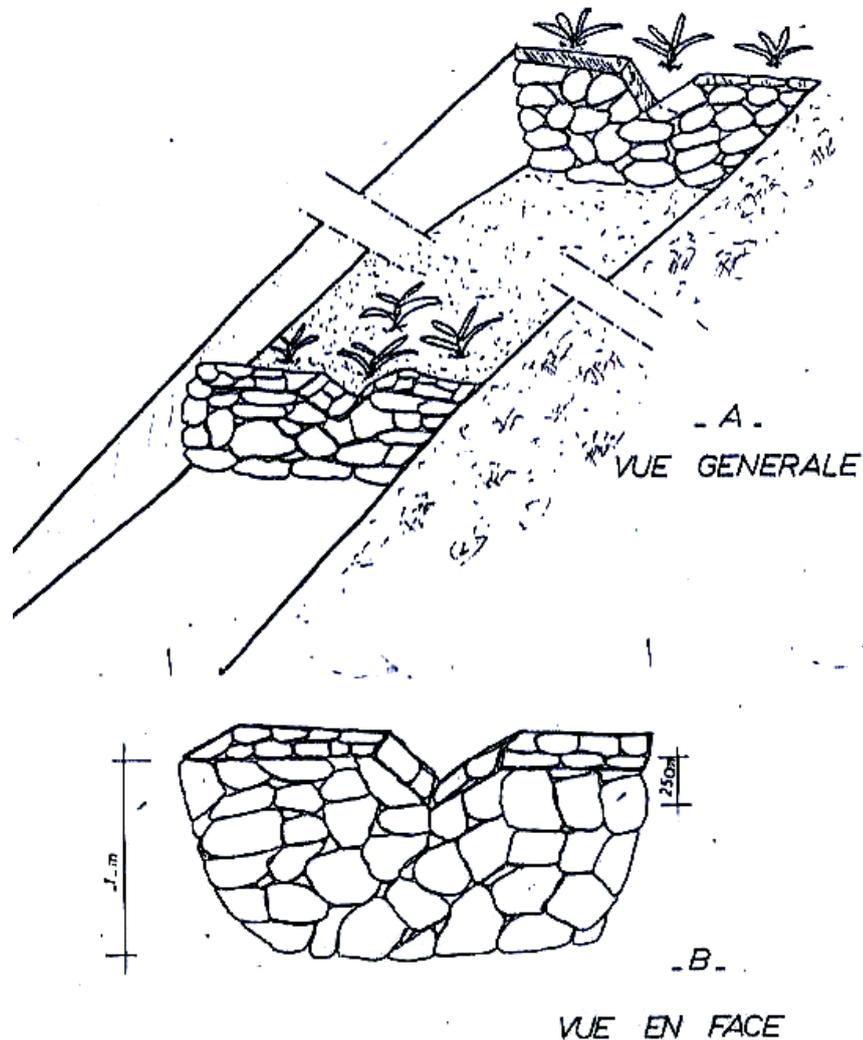


Figure V.3: seuil en pierres sèches combinés avec la plantation

- **Les seuils en gabion :**

Les gabions sont des caisses en grillage formées de pierres rangées avec soin et entourées de fil de fer galvanisé. Ces caisses sont transportées pliées et déployées sur le terrain, En chantier, les gabions sont assemblées et reliait régulièrement et soigneusement les uns aux autres avec un fil de ligature, les pierres ne doivent pas être friables ni gélifiées et de dimension plus grande que celle de la maille de grillage.

Les gabions sont destinés à freiner la vitesse d'écoulement des eaux de crues et permettent ainsi de recharger nappe souterraine irriguer les terrasses avoisinantes par épandage d'une partie des eaux de ruissellement réduire le pouvoir érosif des eaux et les risques d'inondation dans les zones en aval. (Boufaroua et Al ,1998).

V.2. 3. Caractéristiques des seuils en gabion :**Hauteur :**

Elle est en fonction des profils en travers et en long des ravins. Plus un ouvrage est grand, plus le risque de renversement accroît, plus le prix de revient est élevé.

La hauteur conçue pour le seuil en gabion est d'environ : $H = 1.5 \text{ m}$

Épaisseur :

L'épaisseur moyenne (**d**) d'un seuil de hauteur **H** est donnée par la formule :

$$d = 1/2 H \quad (\text{V.1})$$

Dans le cas des seuils en maçonnerie de pierres sèches, ou de moellons l'épaisseur à la base doit être supérieure à celle de la crête. Généralement, le fuit du seuil est de l'ordre de 20 %, l'on recommande que :

- L'épaisseur de la crête soit égale à $0,4 H$ (H étant la hauteur du seuil)
- L'épaisseur à la base du seuil soit égale à $0,6 H$.

Les dimensions des seuils doivent être suffisantes pour assurer l'écoulement des plus fortes crues, sans débordement.

Nombre des seuils :

Pour construire les premiers seuils, une pente de compensation est calculée par mesure des pentes d'atterrissement naturelles ou artificielles. Le nombre des seuils à construire sera alors :

$$N = L \times (P - I) / H \quad (\text{V.2})$$

Avec :

N : nombre de seuils

L : longueur du ravin

P : pente du lit de la ravine

I : pente de compensation

H : hauteur moyenne de l'ouvrage.

Sur les pentes assez forte, le nombre d'ouvrage pourra être réduit pour des raisons économiques généralement de 3 à 5% pour les ravins a traitées d'ordre 4 et plus.

Le nombre de seuils mis en place dans la zone d'étude est de l'ordre de 33 seuils.

Espacement :

L'espacement entre les ouvrages est donné par plusieurs relations :

- la relation liant la longueur du ravin avec le nombre des seuils :

$$E = L / N \quad (V.3)$$

- l'équation de Ramser permettant de calculer la dénivelée qui nous renseigne sur

l'espacement :

$$HS = 0.305 \times (a + [P\% / b]) \quad (V.4)$$

Avec :

HS : la dénivelée entre deux structures anti érosives

P : inclinaison de la pente

a : constante égale à 2

b : varie de 2 à 4 si le climat est plus agressif

Ou bien il sera calculé en prenant en considération la hauteur de l'ouvrage et la pente moyenne de la ravine on utilisant la formule de (HEEDE) :

$$E = HS / K \times G \times \cos a \quad (V.5)$$

Avec:

E: Espacements entre seuils

HS : Dénivelée

a : pente du ravin

G : $\tan a$

K = 30% Pour **G** < 0.20 ; **K** = 50% Pour **G** > 0.20

Avant la mise en place des seuils mécaniques sur les ravins, l'espacement doit être bien calculé ; il dépend surtout de la hauteur valeur de la pente. Plus la pente est élevée, plus l'espacement est réduit et donc plus le nombre de seuils est élevé. Lorsque la pente est faible, l'espacement a tendance à être élevé et le nombre de barrage réduit. Bien sure, quand cela est nécessaire, le nombre des seuils à construire est rectifié en fonction des données du terrain.



Figure V.4 : Seuil en gabion

- **Seuil en maçonnerie :**

Un seuil en maçonnerie est un barrage construit avec de la pierre cimentée ou du béton, souvent sur des terrains rocheux. Ces ouvrages sont réalisés au travers du lit d'un torrent ou d'un gros ravin pour empêcher le lit de se creuser en remettant ainsi en cause la stabilité des berges et des versants. Il s'agit là de travaux de génie civil auxquels on fait appel pour renforcer, sur le même ravin, une série de seuils moyens (en pierre sèche et en gabions) construits à l'amont ou bien lorsque le torrent ou le ravin est assez important et que les matériaux charriés n'ont aucune chance d'être arrêtés par les ouvrages simples. Le lit du torrent peut être transformé dans ce cas en un grand escalier dans lequel se succèdent plusieurs seuils en escalier, car la correction d'un torrent, est une question de profil en long".



Figure V.5 : Seuil en maçonnerie

- **Seuil en grillage métallique :**

barrage filtrant, très efficace souple sur le terrain, moins cher que les deux premiers mais difficile à manier surtout dans les endroits d'accès difficile. On le suggère dans les régions dépourvues de pierres de qualité.

- **Seuil en sacs plastiques :**

Se sont des sacs de récupération remplis de terre et protégés par une petite couche de cailloux ou de ciment ou simplement de terre car le plastique résiste mal aux rayons ultra violets, il est très efficace, souple et facile à mettre en place, meilleur marché. Pour améliorer ces performances on compte utiliser du plastique noir plus résistant au soleil que le plastique vert.

V.3. Dévasement des barrages

Pour des solutions préventives, des tentatives de reboisement et des corrections torrentielles ont été appliquées sur plusieurs bassins versants. En parallèle, des opérations de dévasement se déroulent sur plusieurs barrages. Deux modes de désenvasement peuvent être opérés au niveau d'un barrage. Il s'agit d'un dévasement périodique et d'un dévasement occasionnel.

V.4. Moyens de lutte currative

Le but de ces moyens est de récupérer une partie de la capacité du barrage perdu par l'effet du dépôt sédimentaire causé par le phénomène de l'envasement et transports solide, on cite :

V.4.1. Soutirage des sédiments

Elle est possible grâce à l'ouverture partielle ou totale des vannes d'un barrage lors du passage d'une crue, ce qui permet d'exporter ou de chasser une partie des sédiments avant de se décanter au fond du réservoir par la force du torrent d'eau. Cela permet une réduction partielle estimée de 30% jusqu'à 70% de la vase permettant d'atténuer l'ampleur du dépôt dans une retenue.

V.4.2. Dévasement périodique : Soutirage des courants de densité

A l'arrivée des crues, l'ouverture des pertuis de vidange permet de soutirer les courants de densité qui se rapprochent du mur du barrage. Grâce à la forte concentration en particules fines, le courant de densité arrive au pied du barrage après avoir parcouru plusieurs kilomètres. La technique de soutirage des courants de densité a obtenu de très bons résultats au niveau des barrages d'Ighil Emda et d'Erraguene. Avec un rendement de 55%, la durée de vie du barrage d'Ighil Emda a triplé (Remini et al, 2009 ; Remini, 2000 ; Remini et Avenard, 1999 ; Remini et al, 1997 ; Remini et al, 1996 ; Remini et al, 1995).

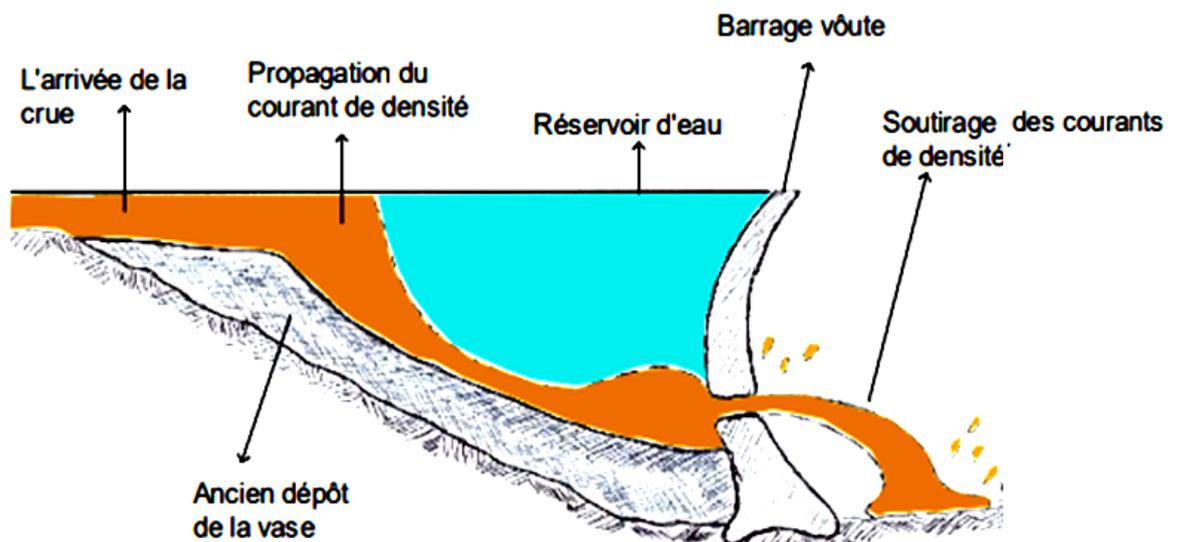


Figure V.6 : Schéma du soutirage d'un courant de densité par les pertuis de vidange d'un barrage (schéma Remini, 2016)

V.4.3. Dévasement périodique : Evacuation de la vase par la vanne de fond

Pour éviter le blocage des vannes de fond. L'ouverture périodique des pertuis de vidange permet d'extraire les dépôts vaseux. Dans ce cas, uniquement la vase située dans la zone basse qui peut être perturbée par les manœuvres des vannes. De telles manoeuvres sont extrêmement nécessaires pour alléger l'ouverture des pertuis. Un retard dans l'ouverture pourra avoir des dégâts. A titre d'exemple, la vanne de fond du barrage d'Oued Fodda est bloquée depuis 1939. Le barrage de fond es Zardezas a été bloquée durant les années 90.

La vanne de fond du barrage de Foug El Gherza a permis d'évacuer environ $0,5.10^6$ m³ durant l'année 1989/1990 (Remini, 1997). Or du fait de la rapidité de l'envasement, cette vanne a été bloquée au bout de 7 ans (1982-1989) (Remini, 1997). De 1990 jusqu'en 1993, une quantité de $0,1.10^6$ m³ de vase a été évacuée (Remini, 1997).



Figure V.7 : Deux vannes de fond du barrage de Boughezoul (Cliché. Remini, 2011)



Figure V.8 : Vanne de fond du barrage de Foug El Gherza (Cliché. ANBT Biskra, 2006)

V.4.4. Dévasement occasionnel : Dragage d'un barrage

Dragage hydraulique :

Les dragues hydrauliques sont généralement équipées d'une élinde, sorte d'aspirateur situé au bout d'un long tube, qui remonte les sédiments qui seront stockés à bord ensuite l'évacuation du produit dragué jusqu'à la zone de rejet.



Figure V.9 : Navire spécial drague suceuse a désagrégateur.

Dragage mécanique :

Il nécessite soit une drague à godets, benne preneuse ou du matériels de terrassement (tel que le bulls, pelles hydraulique, chargeurs hydraulique).

Le dragage hydraulique est généralement le plus utilisé car il est généralement moins coûteux que le dragage mécanique pour de grandes quantités de sable.



Figure V.10 : La drague à pelle rétro-caveuse à benne preneuse.

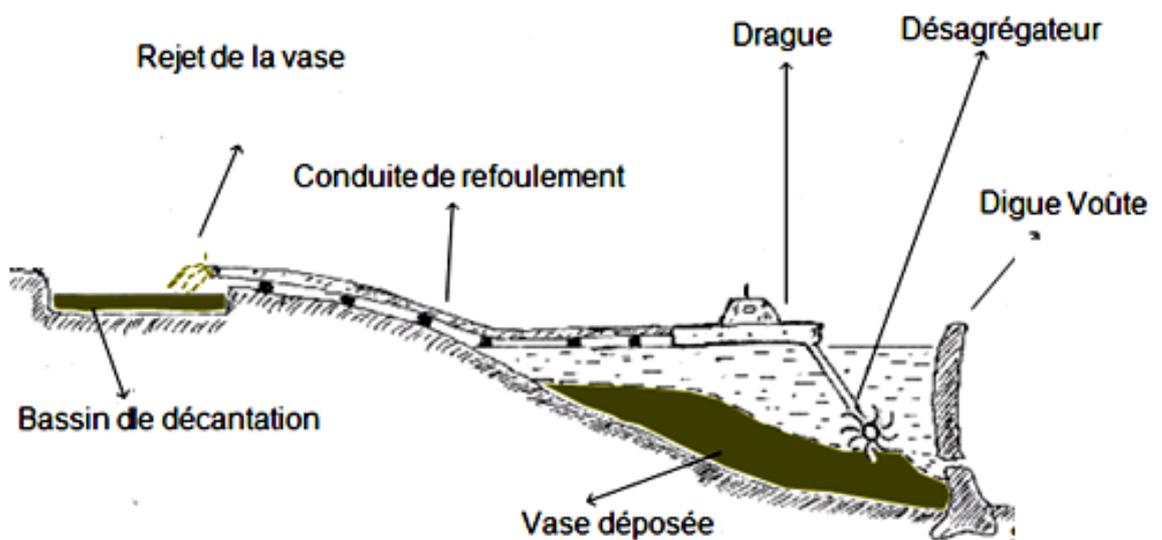


Figure V.11 : Schéma synoptique d'une opération de dragage dans un barrage (Schéma Remini, 2015)



Figure V.12: Rejet de la vase lors de l'opération de dragage de 2005-2006 (cliché Remini, Mai 2006)

V.5. Surélévation du barrage

Dans le cas d'un envasement très avancé, la surélévation d'un barrage surtout s'il s'agit d'un grand barrage peut s'avérer une solution efficace (Remini, 2008 ; Remini et al, 2009). Au lieu d'enlever la vase de la cuvette, on surélève la digue de quelques mètres pour gagner un volume supplémentaire.

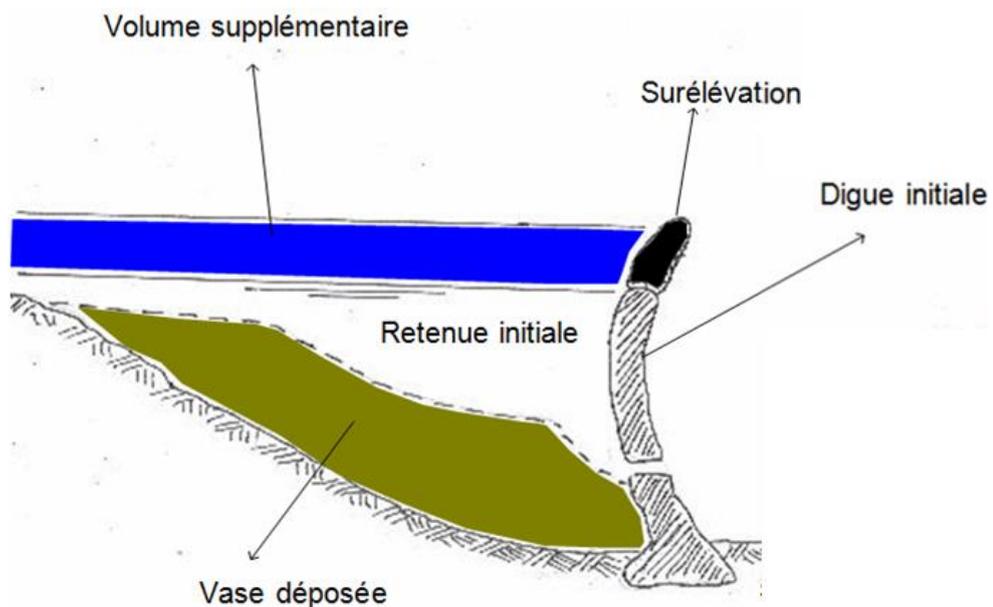


Figure V.13 : Schéma synoptique d'une surélévation d'un barrage (Schéma Remini, 2015)

Il existe plusieurs techniques de surélévation du seuil du barrage selon la nature de cette surélévation. Parmi ces techniques, on citera la surélévation par l'emplacement de hausses fusibles, comme l'exemple du barrage du Ghrib.

L'emplacement de 20 hausses fusibles de type labyrinthe avec 2 clapets automatiques centrales de hauteurs respectives de 4,50 m et 4,00 m, a permis à ce dernier de gagner une tranche de sa capacité initiale qui était à la base de 280 Hm³, puis elle a atteint les 115,3 Hm³ en 2004 pour passer finalement à un volume de 185,32 Hm³ après la surélévation.

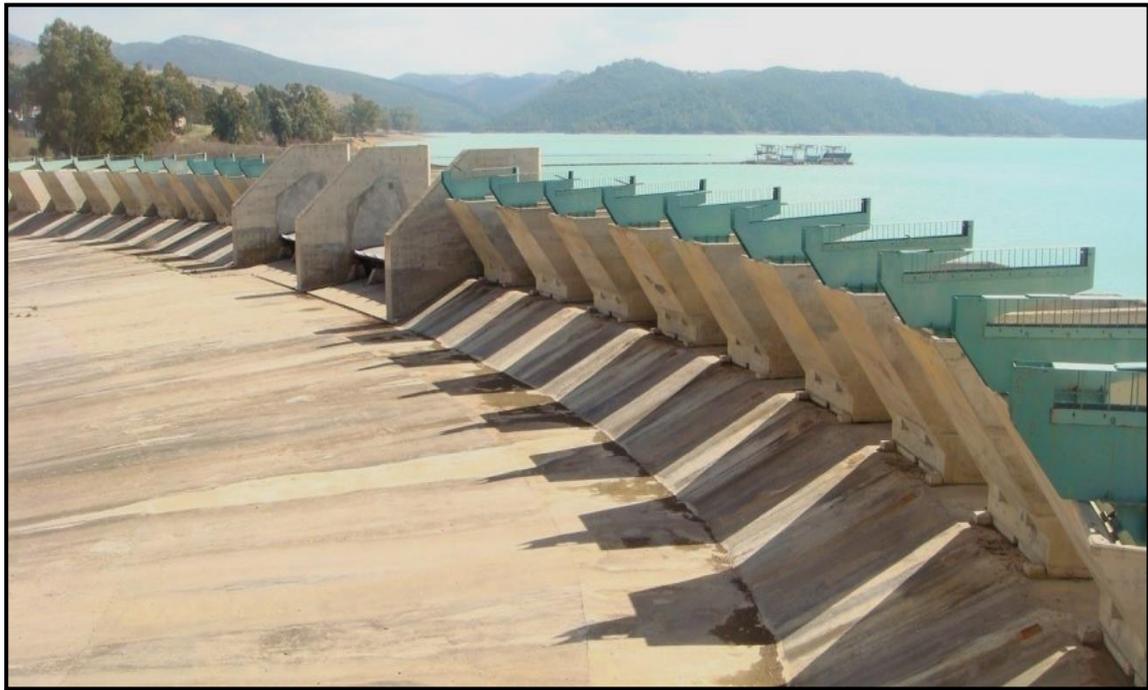


Figure IV.14 : Surélévation du barrage Ghrib par des hausses fusibles (Azzi, 2016).

V.6. Conclusion

Diverses méthodes ont été développées pour lutter contre l'érosion comme la création de banquettes sur les versants les plus menacés, petits ouvrages de correction torrentielle en gabions dans les thalwegs et les ravines pour réduire les vitesses d'écoulement des eaux de ruissellement, le reboisement des zones non cultivées et sensibles à l'érosion.

Pour les barrages à faible taux d'envasement, le suivi périodique du toit de vase par les levés bathymétriques est indispensable.

Pour les barrages à moyen taux d'envasement, la priorité sera donnée au traitement de leurs bassins versants.

Cependant, pour les barrages à fort taux de comblement, des moyens curatifs (dragage et surélévation) sont devenus aujourd'hui le seul moyen pour prolonger leurs durée e vie. Quant aux barrages en projets, le traitement et l'aménagement de leurs bassins versants doivent se faire en parallèle avec la construction du barrage.

Chapitre VI
Contribution aux mesures
préventives contre
l'envasement du barrage
Bekhadda

Chapitre VI Contribution aux mesures préventives contre l'envasement (cas du barrage Bekhadda)

VI.1. Introduction

Pour prolonger la durée de vie du barrage Bekhadda, Plusieurs méthodes (curatives et préventives) de lutte contre l'envasement doivent être appliquées. l'entretien de ces ouvrages est devenu aujourd'hui une nécessité.

VI.2. Situation géographique de la zone d'étude

la wilaya de Tiaret se présente comme une zone de contact entre le Nord et le Sud. Le territoire de la wilaya est constitué de zones montagneuses au Nord, de hautes plaines au centre et des espaces semi-arides au Sud. Elle s'étend sur un espace délimité entre 0.34° à 2.5° de longitude Est et 34.05° à 35.30° de latitude Nord.

Tiaret occupe une superficie de 20.086,62 km², elle couvre une partie de l'Atlas tellien au Nord et les hauts plateaux au centre et au Sud. Elle est délimitée au Nord par les wilayas de Relizane, Cheleff et Tissemsilt, à l'Ouest par les wilayas de Mascara et Saida, à l'Est par la wilaya de Djelfa, au Sud et Sud-Est par Laghouat et El Bayad (SOT, 2014).

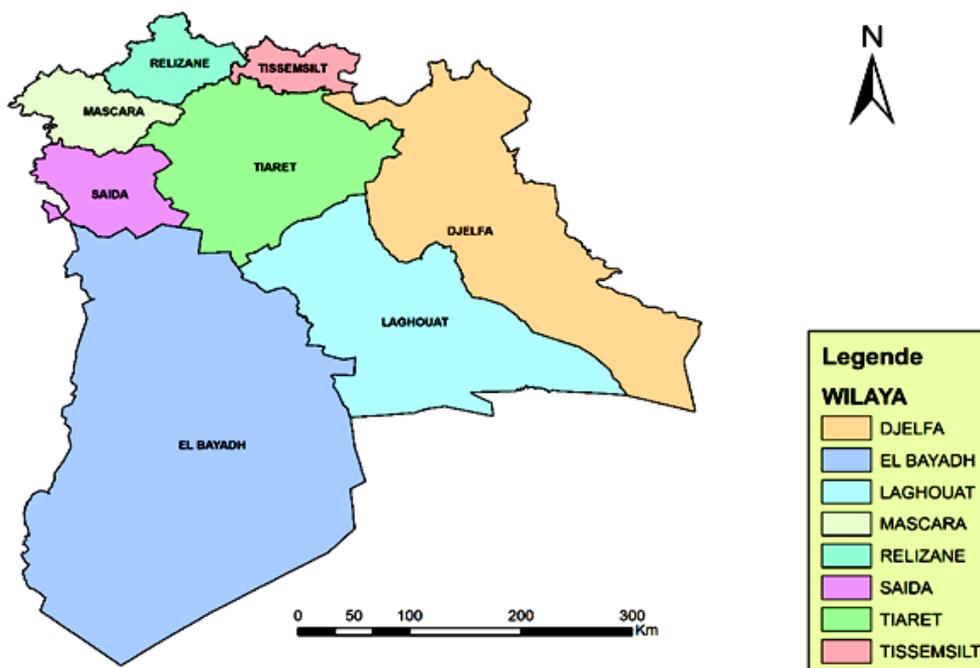


Figure VI.1: Situation géographique de la wilaya de Tiaret (SOT, 2021).

VI.3. Présentation du Barrage Bekhadda Tiaret

Le Barrage bekhadda se situe à l'ouest de l'Algérie à 40 Km à l'ouest de la ville de tiaret dans la commune de Mechraa Sfa à une altitude de 665 mètres. Le barrage est destiné à AEP des localités de Tiaret, Rahouia, Mechraa Sfa, Djillali Ben Ammar, Kharouba, Guertoufa et Temda, a pour but de stoker les eaux de l'oued Mina, affluent de l'oued Chellif.

Ce barrage se trouve sur le cours d'eau supérieur de la Mina (affluent de l'oued Chellif), il est un barrage en enrochement à masque amont, de 45 mètre de haut (fig I.2 et I.3).

Le masque étanche d'une technique un peu plus ancienne, est en béton armé souple.

La surélévation du barrage sur la haute mina : en 1960 fut un travail intéressant puisqu'il permis, moyennant une dépense relativement faible, d'augmenter de 14 millions de m³ la capacité de la retenue, celle-ci étant portée de 37 à 51 millions de m³.

VI.4. Fiche technique de barrage Bekhadda

- Nom de plan d'eau : Barrage Bekhadda.
- Type : en enrochement avec masque étanche en béton armé disposé sur le parement amont.
- Situation : 40 km à l'Ouest de Tiaret.
Les coordonnées géographiques (Coordonnées Lambert) : X : 349,000 Km
Y : 228,750 Km
Z : 545 m
- Entreprise de réalisation : la société des grands travaux de Marseille en 1936.
- Capacité portante : 45.143 Hm³.
- Volume régularisable : 43 Hm³.
- Dévasement : chasse d'eau par les vidanges.
- Degré d'envasement : 10% (0.22 Hm³ /An).
- La surface de Bassin Versant : 1283 km².
- La source d'approvisionnement en eau : Oued Mina.
- Utilisation : AEP, irrigation et industrie.
- Disponibilité de terrains susceptibles de faire l'objet d'un aménagement piscicole : oui.
- Altitude de la retenue maximale : 584.75 m.
- Surface de la retenue au niveau maximum : 451.6 ha.
- Capacité totale et utilisable du réservoir : 46 millions de m³.



Figure VI.2: Digue du barrage BAKHADDA

VI.5. Relief de la wilaya

Le nord qui coïncide en gros avec l'ensemble tellien, regroupe la vallée de la Mina et les monts de Tiaret. Ces monts constituent une zone collinaire et montagneuse dont le plus important est le Djebel Guezoul qui culmine à plus de 1200 m et s'oriente suivant la direction Sud-ouest Nord-est. Le relief est accidenté, avec des versants raides et fortement entaillés par de profonds ravins ; A cela s'ajoute à l'est, le plateau de Sersou qui est une bande étroite plus ou moins tabulaire marquant une transition vers le domaine steppique. L'altitude moyenne est de 950m, et il se caractérise par une succession de cônes de déjection, de pentes moyennes à faibles. Le sud correspond aux zones steppiques avec des sous espaces : le massif du Nador, le secteur oued Soussalem, Rechaiga, la vallée d'oued Mina avec ses affluents, la zone des expérimentations d'aménagement de la steppe, la sous zone périphérique du Chott Chergui abritant le périmètre aménagé d'Ain Skhouna et les sebkhas.

VI.6. Pédologie

Le sol reste l'élément principal de l'environnement, qui règle la répartition des espèces végétales.

La mise en place du climat, de la végétation et des sols méditerranéens est très ancienne et très complexe. Elle commença au début du quaternaire et s'affirme à partir de l'holocène. Il s'agit dans ce contexte de sols anciens selon le concept de (Duchaufour, 1983) c'est-à-dire des sols ayant évolué pendant plus de dix mille ans, avec des phases d'accélération et de ralentissement, mais dont le processus fondamental est resté pratiquement le même pendant toute la durée de l'évolution.

Les sols les plus répandus sur les monts de Tiaret sont (CFT, 2014):

- Les sols marneux.
- Les sols calcaires et dolomites dures.
- Les sols calcaires friables.
- Conglomérat, alluvions et sables.

VI.7. Etude climatique de la zone d'étude

Les données climatiques retenues pour caractériser le climat sont celles de la station météorologique située à proximité de la zone d'étude.

Notre étude climatique est basée sur des données qui s'étendant avec d'observation de 33 ans (1884 – 2017).

Tableau VI.1: Caractéristiques géographiques de la station météorologique du barrage Bekhadda.

Nom de station	Coordonnées UTM			Altitude(Z)	Période d'observation
	X	Y	Zone		
Barrage Bekhadda	321690,71 m	3913239,25 m	31 S	607 m	1984-2017

Source : ANBT, 2016.

VI.8. Présentation du bassin versant d'oued Mina

Le bassin de l'oued Mina est exposé à un climat semi-aride méditerranéen (pluie d'hiver, sécheresse estivale). Ses pluies sont torrentielles et irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. Mais les averses orageuses de forte intensité sont particulièrement fréquentes en automne lorsque le couvert végétal est absent. Les roches dominantes sont les marnes (partie amont du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda), d'âge tertiaire avec des grès et des calcaires intercalés.

De part de son climat, sa géologie, son relief et les facteurs anthropiques qui ont largement contribué à l'accélération des processus érosifs, le bassin de l'Oued Mina est soumis à une érosion intense. Elle est la cause principale de l'envasement des ouvrages de stockage de l'eau dans la région, en particulier le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda et le barrage de Bekhadda, et de plusieurs retenues collinaires qui se trouvent abandonnées, du fait d'un taux d'envasement élevé qui atteint 100 % pour une majorité.

VI.9. Situation géographique

Le bassin d'Oued Mina se situe dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie. Il fait partie du grand bassin versant « Chélif » et compte parmi les principaux affluents de l'Oued Cheliff. D'une superficie de 8200 km², il est encadré par le moyen Chélif à l'est, le bassin de la Macta à Ouest, le massif de Dahra au Nord et le Chott Ech-Chergui au Sud. La partie septentrionale s'insère dans le Tell occidental et comprend la retombée sud-orientale de l'Ouarsenis, à l'est. À l'Ouest, il est limité par les Monts des Béni Chougrane. Il est situé entre les latitudes Nord de 36° 1' et 34° 41' et les longitudes est de 0° 16' et 1° 30'.

L'altitude, variant entre 1 300 m et 30 m, décroît vers le nord. Le relief est très contrasté, constitue de plateaux entaillées et de versants raides, seuls 12 % de la surface sont occupées par des plaines. Le bassin versant de l'oued Mina est soumis à un climat de type méditerranéen contrasté, avec une aridité estivale marquée et un hiver froid, présentant un régime pluviométrique fortement influencé par les orages.

L'Oued Mina, c'est le principal et dernier affluent de la rive gauche du Cheliff, prend sa source dans les monts de Frenda pour confluer avec l'Oued Chélif après un parcours de 125 km.

Il parcourt une distance de 135km environ entre les barrages de BEKHADDA et de Sidi M'Hamed Ben Aouda, avec une orientation Sud-est, Nord-Ouest.

VI.10. Caractéristiques physiographiques du bassin

- Superficie du bassin versant: 8162.98Km²
- Périmètre du bassin versant: 674.28Km
- Le plus long talweg:199Km
- Indice de compacité de Gravelius(KG) : 2.09
- Longueur du rectangle équivalent: (L) 125()
- Largeur du rectangle équivalent (l) :65.3
- Altitude max:1324m
- Altitude min: 30m
- Élévation moyenne: 673.05m
- Altitude à 5% de la superficie du bassin: 1277m.
- Altitude à 95% de la superficie du bassin: 76m.
- Indice de pente global (Ig) :9.976.
- Dénivelée spécifique (Ds) :1201.
- Densité de drainage (Dd) : 2.5 (Toumi, 2013)

VI.11. Réseau hydrographique

Le bassin de l'Oued Mina draine une superficie de 8200 km² comprise depuis les hautes terres (monts de Frenda) jusqu'à la mer Méditerranée par le biais du Oued Chélif (33 m). Les principaux affluents prenant naissance à partir des montagnes et se déversant dans l'Oued Mina sont :

- Oued Abd, prend naissance des monts à partir des monts de Sidi Youcef et Boudfir et draine le djebel d'Argoub, Toukiret, Moualek et Djebel Maida.
- Oued Tat draine les monts de Kaf Safsaf passant par les monts de Keskas et Coulamzan.
- Oued Haddad draine les monts de Loukda.
- Oued Kreloua, draine les monts de Sidi Yahia et de Bou Barha.

La figure III.3 représente le profil au long de l'oued Mina. A 200 m d'altitude se situe le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda sur l'oued Mina qui rejoint l'oued Chélif environ 80 Km à l'aval du site du barrage. A quelques kilomètres en amont du barrage de S.M. Ben Aouda, l'oued mina est contrôlé par le barrage de Bakhada (à 600 m) qui draine un bassin de 1300 Km² (Toumi, 2013).

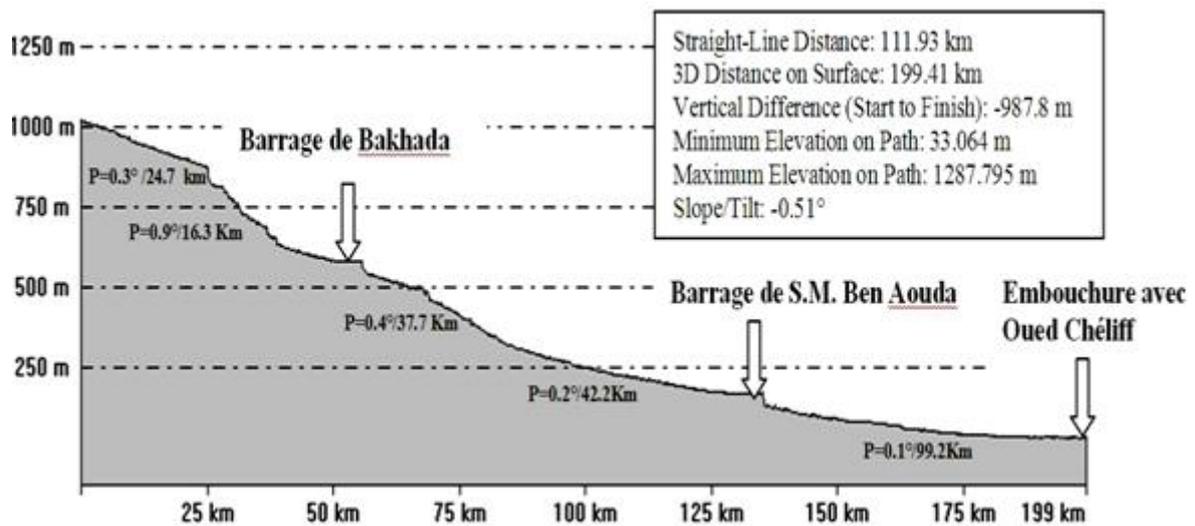


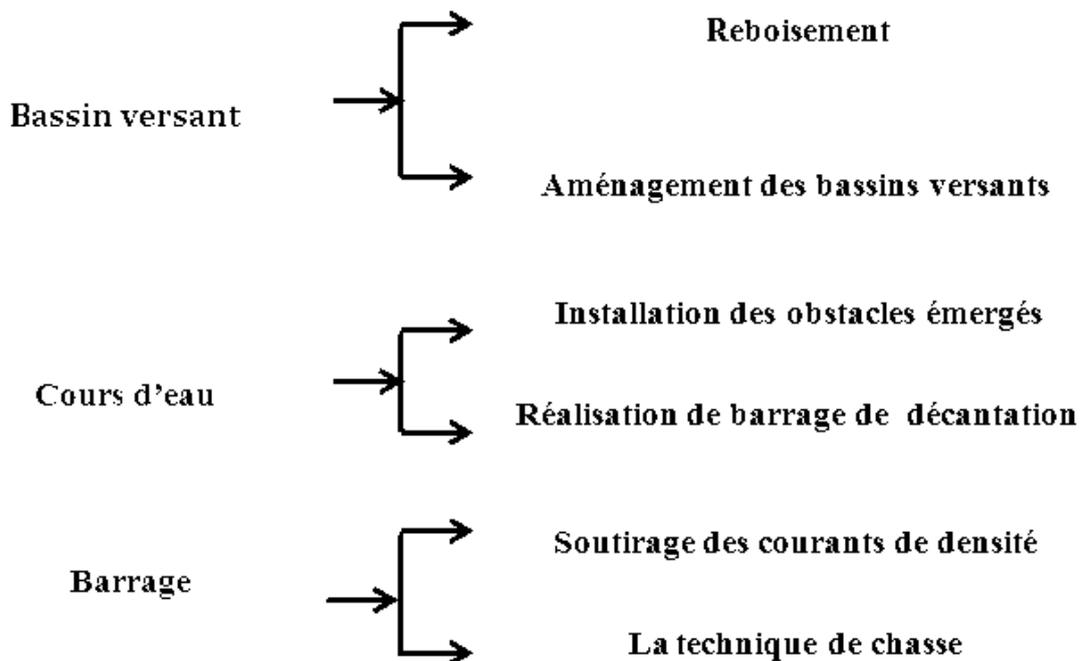
Figure VI.4 : transport solide (entrée du barrage BAKHADDA)



Figure VI.5 : amont du barrage BAKHADDA transport solide (rivière principale)

VI.12. Actions proposées pour la protection du bassin versant (barrage de BAKHADDA):

Pour permettre la protection de la retenue du barrage BAKHADDA contre le transport sédimentaire, on propose plusieurs solutions pour lesquelles on cite :



VI.12.1. Le reboisement

l'effet de la végétation a pour but de piéger et retenir les sédiments à l'amont des cours d'eau peut servir de façon efficace à empêcher les matériaux solides d'atteindre la retenue.

elle permet de maintenir les berges contre l'érosion grâce à l'enracinement des arbres et arbustes.



Figure VI.6 : barrage BAKHADDA (absence de couvert végétal)

VI.12.2. Aménagements en versant avant le lit du cours d'eau

a) Banquettes

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

La banquette mécanique se divise en quatre zones(Fig. VI.7) :

1. Le fossé large reçoit les eaux de ruissellement de l'impluvium.
2. Le talus reçoit la pluie et un apport latéral des eaux du fossé.
3. L'impluvium à l'amont du fossé ; zone cultivé entre les bourrelets, qui ne reçoit plus que la pluie moins le ruissellement.
4. La zone de l'impluvium à l'aval et proche du bourrelet qui pourrait recevoir un appoint d'eau par drainage à travers le bourrelet lors des grosses averses

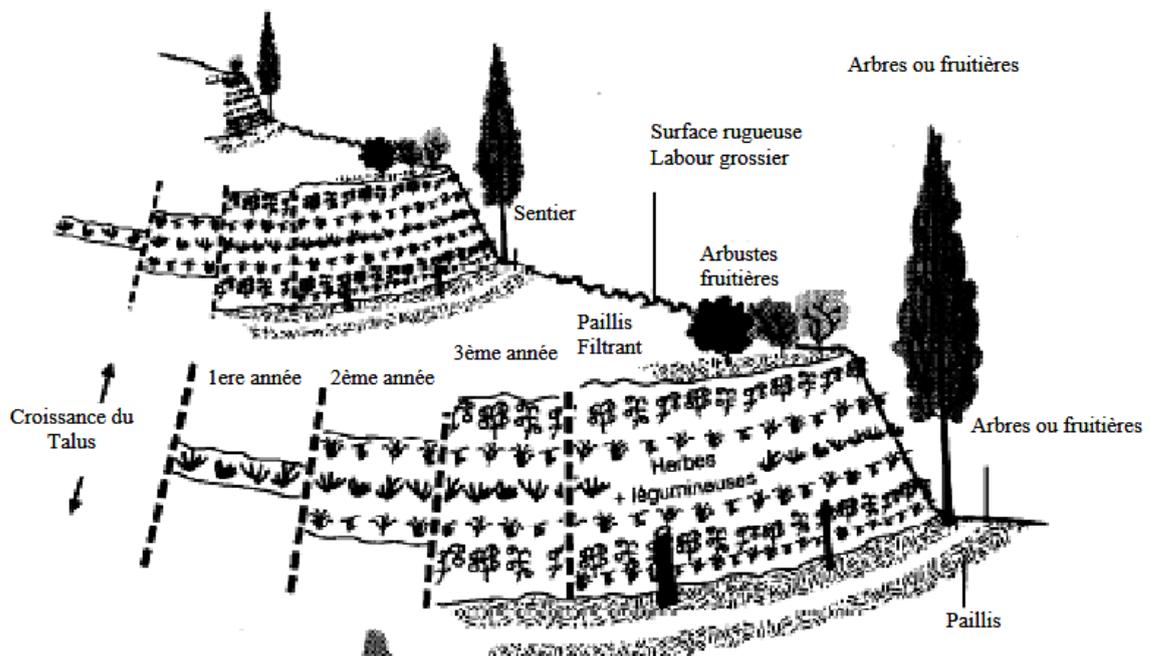


Figure VI.7: Technique de banquettes

b) Ouvrages de stockage en dérivation

ce type d'ouvrages est alimenté par dérivation de cours d'eau par un ouvrage de prise et un chenal d'amené.

Selon la topographie, ils peuvent être aménagés en plusieurs bassins en cascade qui se remplissent successivement de l'amont vers l'aval par diversement.

Le schéma de fonctionnement de ces ouvrages est montré dans la figure suivante (Fig.VI.8)

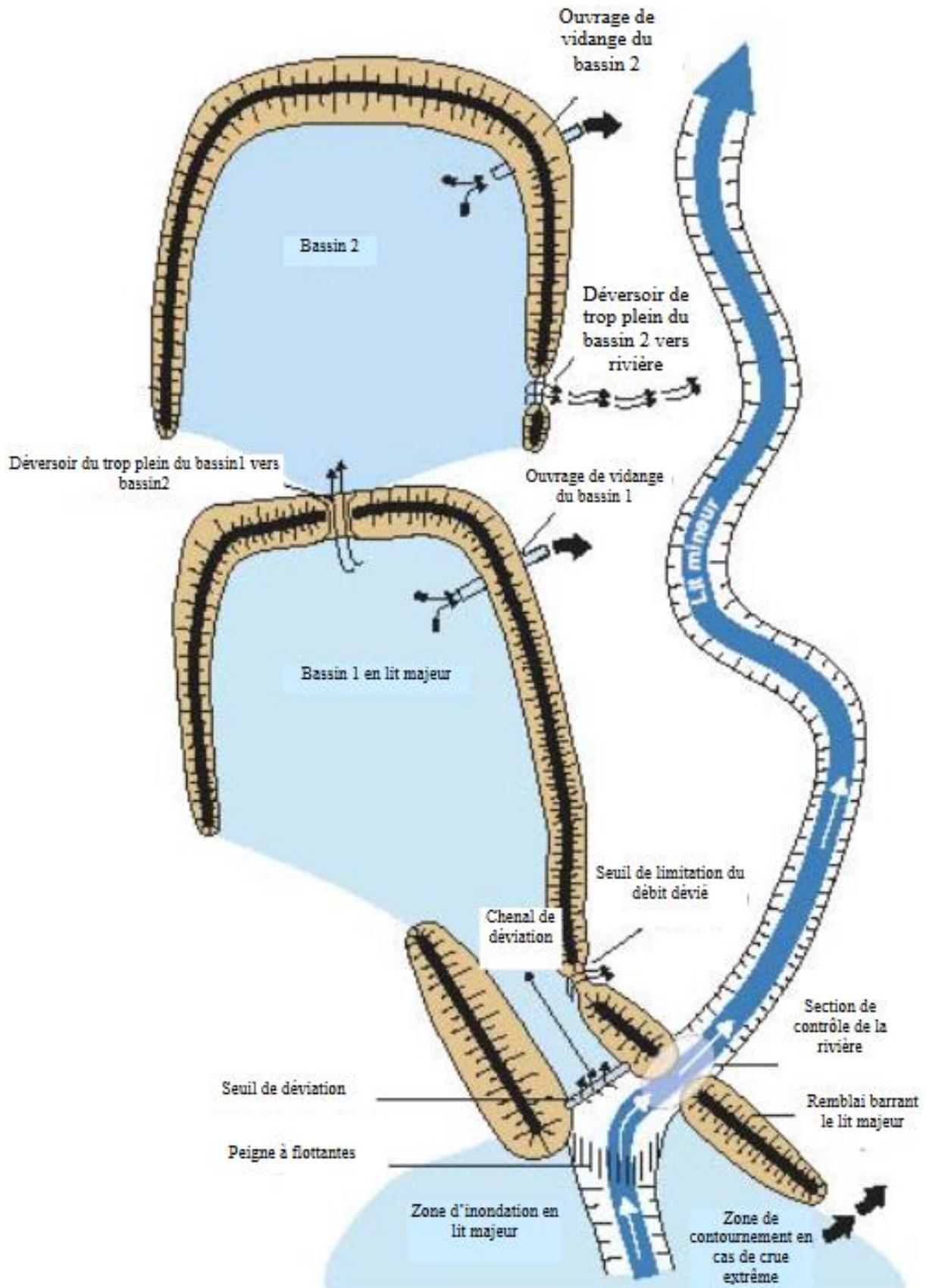


Figure VI.8: Fonctionnement d'ouvrage de stockage en dérivation (DUNGLAS et al.2004)

VI.12.3. Les cours d'eau :

L'érosion du réseau hydrographique est la cause principale des pertes en capacité des réservoirs d'eau.

Plusieurs procédés sont employés dans le but de protéger le cours d'eau principal contre le dépôt de sédiments causé par le phénomène d'érosion.

a) Revêtement des berges :

Le mode de protection des berges le plus courant est la mise en place d'un revêtement de protection fait d'un matériau résistant à l'érosion (les enrochements, le béton, etc.) et déposé directement sur le talus des berges.

b) Freinage de l'écoulement :

On peut obtenir un freinage de l'écoulement en mettant en place des structures perméables parallèlement à la base des berges. La diminution de la vitesse réduit les risques d'érosion et facilite, lorsque les conditions sont favorables, le dépôt de sédiments et la croissance de la végétation le long de berges.



Figure VI.9: structures perméables



Figure VI.10 : Seuil en grillage avec piquets

c) Guidage de l'écoulement :

Pour écarter les courants et les vagues des zones sensibles, les jetées, épis et les chicanes sont souvent employés.

La déflexion du courant modifie les processus de transport des sédiments et l'effet habituel est la formation de dépôts le long des berges menacées. On peut utiliser des structures perméables ou imperméables.

d) Aménagements hydrauliques :

Les barrages modernes et d'autres ouvrages hydrauliques sont souvent de très grande taille, nécessitant la maîtrise de débits très élevés sous une forte charge. On doit mettre en place des dispositifs efficaces pour empêcher des affouillements indésirables du lit à l'aval de l'ouvrage, on utilise souvent :

- Bassins d'amortissement.
- Sauts de ski.

VI.12.4. Aménagement d'un piège à sédiments

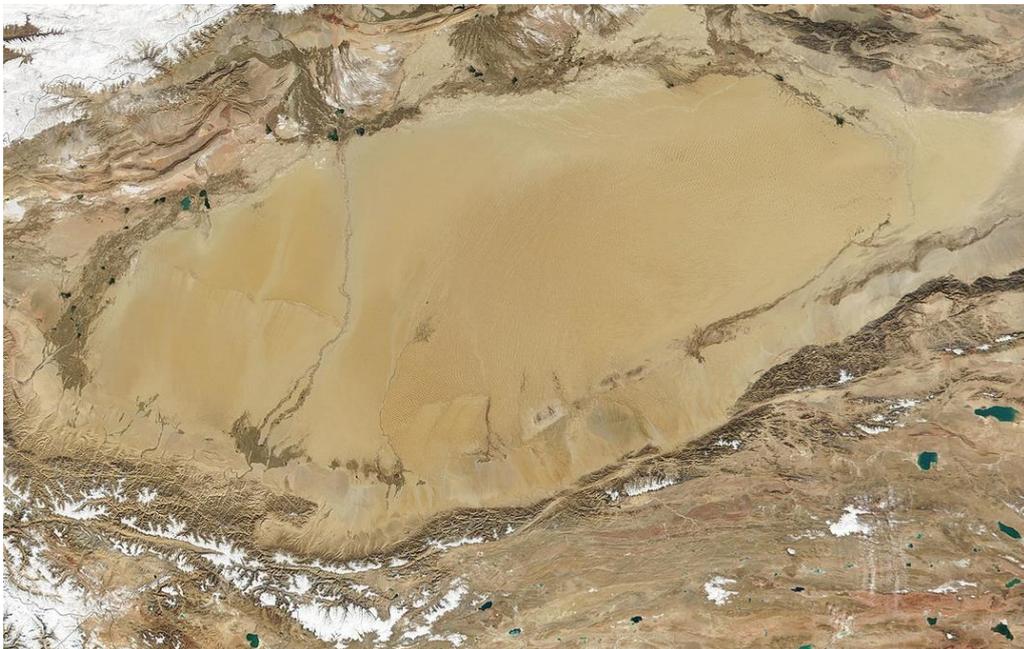


Figure VI.11: Aménagement d'un piège à sédiments

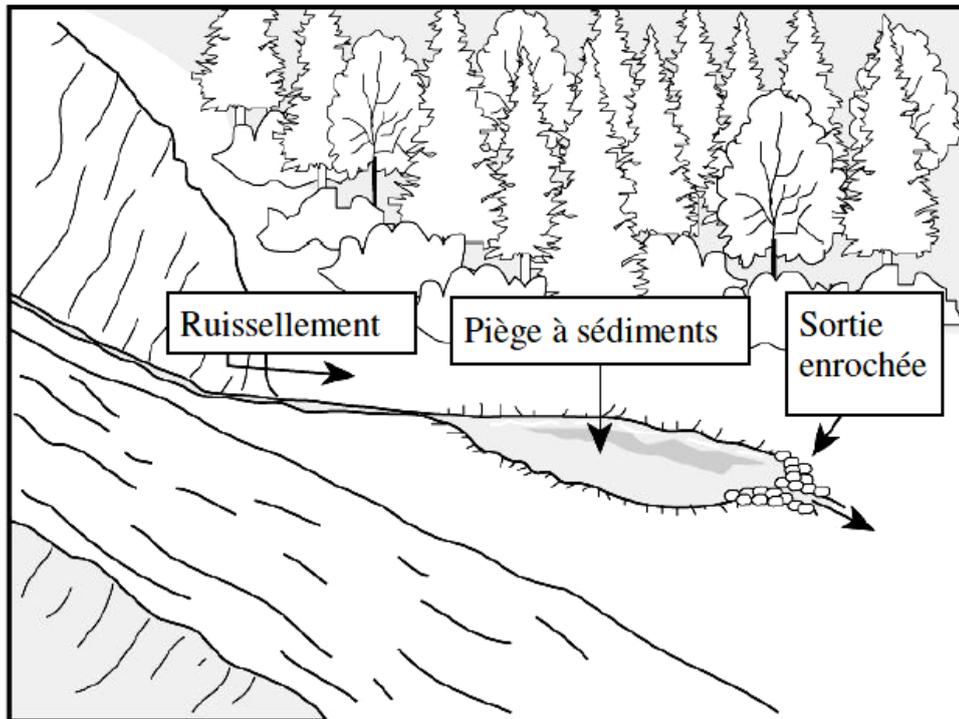


Figure VI.12: Aménagement d'un piège à sédiments

1) Détermination des grandeurs caractéristiques et du débit de pointe :

Le bassin de décantation récupérera la totalité des eaux de ruissellement drainées sur les zones qui représentent un seul bassin versant. La superficie retenue est donc de 10 ha.

nous prendrons les hypothèses de calcul suivantes :

- Temps de retour de 2 ans ;
- Durée de pluie de 2 heures ;
- Taille minimale de particules à décanter : 10 μm

Le calcul du débit de pointe pour une période de retour de 2 ans est effectué par la méthode rationnelle.

Calcul du débit de pointe

Le calcul des débits caractéristiques est réalisé selon la méthode rationnelle qui consiste à appliquer la relation suivante :

$$Q_p (\text{période de retour}) = 10 \cdot C \cdot I (\text{période de retour}) \cdot A$$

Avec:

Q_p : débit de pointe pour une période de retour donnée en m^3/h

C : coefficient de ruissellement moyen du bassin versant

I : intensité pluviométrique sur une période de retour déterminée (mm/h)

A : surface du bassin versant (ha)

Intensité pluviométrique I sur une période de retour T de 10 ans

On utilise la formule suivante :

$$I(10) = (h/t_c) \cdot 60$$

I : intensité (mm/minutes)

h : hauteur de pluie (mm)

t_c : temps de concentration (heures)

Calcul du temps de concentration « t_c »

Le temps de concentration est déterminé en utilisant la formule de Kirpish :

$$T_c = 0,0195 \left(\frac{L}{\sqrt{P}} \right)^{0,77}$$

T_c : temps de concentration (minutes)

L : longueur (m)

P : pente (m/m)

On considérera une longueur L de 1000 m et une pente P de 1,5 %. On obtient : $t_c = 20,05$ minutes.

Nous considérerons dans notre calcul une durée de pluie de 2 heures car le temps de concentration calculé crée un surdimensionnement tel que les bassins de décantation ne seraient pas économiquement acceptables.

Calcul de l'intensité pluviométrique

L'intensité pluviale pour une pluie décennale est égale à :

$$I \text{ (mm/min)} = a \cdot t_c^b$$

Les coefficients de Montana (a et b) permettent d'obtenir localement l'intensité pluviométrique (en mm/min) pour une durée de pluie (2 heures = 120 min) et une période de retour définie (2 ans).

On prendra les coefficients de Montana suivant évalués pour une période de concentration comprise entre 1 heure et 6 heures :

$$a = 10,00$$

$$b = - 0,59$$

Résultat

Par conséquent, en prenant les hypothèses suivantes :

$$I (t_c, T) = 0,59 \text{ mm/min}$$

$C = 0,6$: valeur moyenne car presque la totalité du bassin est occupée par des sols argileux massifs imperméables en surface)

$$A = 10 \text{ ha}$$

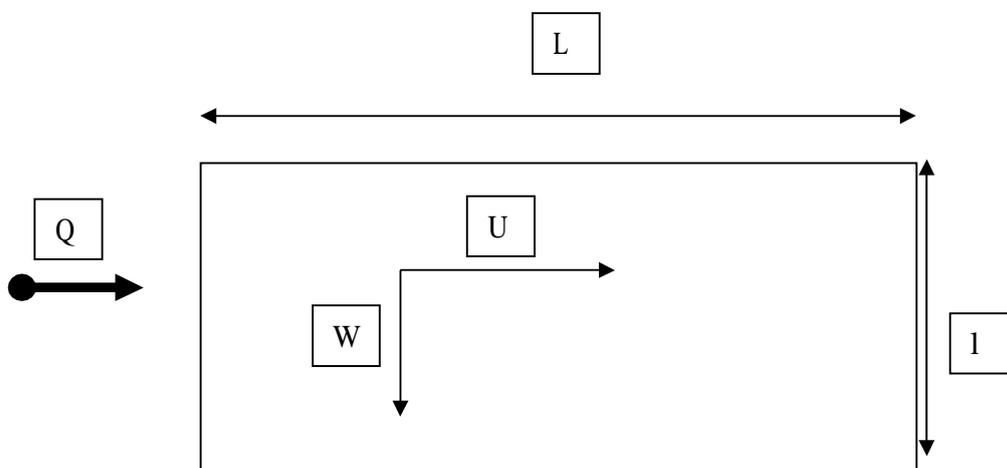
Le débit de pointe pour une période de retour de 2 ans pour le bassin versant du Bassin de décantation est de :

$$Q (10) = 10 \cdot C \cdot I \cdot A$$

$$Q(10) = 10 \cdot 0,6 \cdot 0,59 \cdot 10 = 35,4 \text{ m}^3/\text{min} = 0,59 \text{ m}^3/\text{s} \text{ soit } 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

2) Dimensionnement des Bassins de décantation

La méthode de dimensionnement des bassins de décantation employée s'appuie sur la méthode de HAZEN.



Selon Hazen, le rapport $\frac{L}{l}$ est égal au rapport $\frac{U}{W}$

Débit d'entrée dans les bassins

Le débit en entrée du bassin est égal au débit de ruissellement calculé en phase d'exploitation au chapitre précédente.

	unité	Valeur
Taille de particule	µm	10
Temps de retour	années	2
Durée de pluie	Heures	2
Coefficient de ruissellement	-	0,6
Intensité pluviométrique	Mm/min	0,59
Surface drainée	Ha	10
Débit de pointe	m ³ /s	0,6

Tableau VI.2. Récapitulatif du calcul du débit de pointe

Vitesse de décantation des particules

La vitesse de décantation des particules calculée selon la loi de Stokes :

$$V_D = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot \Delta(\rho)}{9 \cdot \mu}$$

- V_D : vitesse limite de chute (m/s)
- r : rayon de la particule à décanter (m)
- g : accélération terrestre (m/s²)
- $\Delta(\rho)$: différence de la masse volumique entre la particule et l'eau (à 30°)

$$\Delta(\rho) = 2000 - 995,71 = 1004,29 \text{ kg/m}^3$$

- μ : viscosité dynamique de l'eau = 0.000798 Pa.s (30°)

$$V_D = \frac{2 \cdot (10 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9,81 \cdot 1004,29}{9 \cdot 0,000798} = 2,74 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Pour des particules de granulométrie de 10 µm, la vitesse de décantation est de $2,74 \times 10^{-4}$ m/s.

Temps de décantation (t_d)

Le temps de décantation minimal t est égal au rapport

$$\frac{\text{Profondeur du bassin}}{\text{Vitesse de décantation}}$$

$$t_d = \frac{\text{Profondeur du bassin}}{\text{Vitesse de décantation}}$$

$$t_d = \frac{3}{2,74 \cdot 10^{-4}} = 10948,90s = 3,04 \text{ heures}$$

La profondeur des bassins de décantation est fixée à 3 m.

Le temps de décantation est donc dans le cas présent égal à environ 3 heures pour une décantation des particules les plus petites considérée, c'est-à-dire celles de 10 μm .

Temps de transfert (t_t)

La décantation des particules dans le bassin sera complète si le temps de séjour (ou temps de transfert) du flux les transportant est suffisant. C'est-à-dire si $t_t \geq T_d$. Le temps de transfert minimum devra donc être de 3.04 heures.

Détermination des dimensions du bassin

Le débit d'entrée est égal au produit de la section du bassin par la vitesse de transfert de l'eau au point d'entrée

$$Q = l \cdot h \cdot V_t$$

La vitesse de transfert (V_t)

$$V_t = \frac{\text{Débit en entrée (Q)}}{\text{Section du bassin (l x h)}}$$

$$V_t = \frac{0,6}{15,3} = 0,013m/s$$

La vitesse de transfert (V_t) est par ailleurs égale à $V_t = \frac{L}{t_t}$

$$\text{Soit } L = t_t \cdot V_t$$

$$L = (3,04 \cdot 0,013) \cdot 3600 = 142,27 \text{ m}$$

Le tableau suivant synthétise les données nécessaires au calcul des dimensions :

Hauteur fixée (m)	3
Largeur fixée (m)	15
Débit en entrée (m ³ /s)	0,6
Temps de transfert (heures)	3,04

Tableau VI.3. Récapitulatif des données pour le dimensionnement du bassin

En fixant une hauteur de 3 mètres et une largeur de bassin de 15 mètres, obtient les dimensions suivantes pour le bassin :

Profondeur (m)	3
Largeur (m)	15
Longueur (m)	142
Surface (m ²)	2134
Volume (m ³)	6402

Tableau IV.4. Dimensions du bassin (10 µm)

Conclusion

Les dimensions obtenues sont encore difficilement acceptables, et ce, malgré l'application des paramètres du guide (taille de la particule, période de retour de la pollution, durée de pluie).

Compte tenu de la faible proportion de particules de taille comprise entre 10 µm et 15 µm, nous avons choisi de prendre une taille minimale de particule à décanter de 15 µm. Cela permet d'obtenir un bassin de dimensions bien plus acceptables économiquement et écologiquement qu'un bassin qui décanterait des particules de 10 µm, et pour un rejet de qualité très proche.

Dimensionnement du bassin en prenant pour taille minimale de particule : 15 μm

En appliquant la même méthodologie de calcul, on obtient les paramètres suivants :

$$V_D = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot \Delta(\rho)}{9 \cdot \mu}$$

$$V_D = \frac{2 \cdot (15 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9,81 \cdot 1004,29}{9 \cdot 0,000798} = 6,17 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

- Vitesse de décantation $6,17 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

$$t_d = \frac{\text{Profondeur du bassin}}{\text{Vitesse de décantation}}$$

$$t_d = \frac{3}{6,17 \cdot 10^{-4}} = 4862,24 \text{ s} = 1,35 \text{ heures}$$

- Temps de transfert : 1,35 heures

$$V_t = \frac{\text{Débit en entrée (Q)}}{\text{Section du bassin (l x h)}}$$

$$V_t = \frac{0,6}{15,3} = 0,013 \text{ m/s}$$

$$V_t = \frac{L}{t_t}$$

$$L = t_t \cdot V_t$$

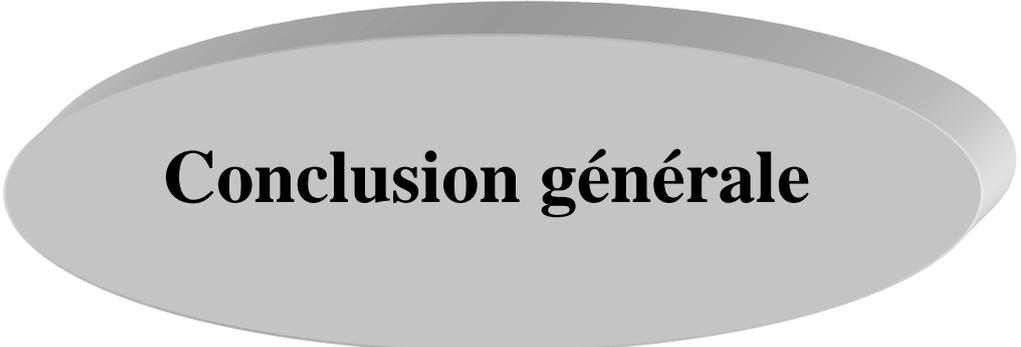
$$L = (1,35 \cdot 0,013) \cdot 3600 = 63,18 \text{ m}$$

En fixant une profondeur de bassin de 3 mètres et une largeur de 15 mètres, on obtient les dimensions suivantes :

Profondeur (m)	3
Largeur (m)	15
Longueur (m)	63
Surface (m ²)	945
Volume (m ³)	2835

Tableau VI.5. Dimensions du bassin (15 μm)

Les longueurs obtenues en augmentant la taille minimale de particule à 15 μm et en prenant en compte les hypothèses du guide précité sont donc plus acceptables et réalisables.



Conclusion générale

Conclusion générale

La sédimentation des barrages est un phénomène naturel très complexe qu'il faut l'étudier de l'amont à l'aval du barrage.

Les conséquences de ce phénomène sont extrêmement gênantes. Elle a un impact au niveau du réservoir lui même, amis aussi en amont et en aval du barrage. Le mécanisme de la sédimentation et plus particulièrement les courants de densité restent l'étape la plus délicate de ce processus et leur maitrise aboutira directement à la proposition des méthodes de lutte adéquates.

L'importance du transport solide en Algérie s'est toujours traduit par un comblement rapide des retenues de barrage diminuant considérablement leur capacité de stockage et par conséquent leur durée de vie.

Les processus de transport solide sont influencés par de nombreux facteurs, tels que la topographie du bassin versant, la taille des particules, la vitesse de l'eau et les conditions météorologiques.

La compréhension de ces processus est essentielle pour la prédiction de l'alluvionnement des barrages, ce qui est crucial pour la gestion des réservoirs et la prévention des catastrophes naturelles.

L'alluvionnement peut affecter la capacité de stockage et la durée de vie des barrages, ainsi que les écosystèmes aquatiques et les populations riveraines.

Il est donc important de continuer à approfondir nos connaissances dans ce domaine afin de mieux comprendre les mécanismes de transport solide et de développer des stratégies de gestion efficaces pour les barrages et les ressources en eau.

Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent mais aussi et surtout de développer certaines techniques d'études pour améliorer les methods de lute contre l'alluvionnement rapide des barrages.

La genèse des processus d'érosion et de transport des sédiments grossiers et fins a comme origine également l'intensité et l'énergie cinétique des pluies, la pente et l'inclinaison des pentes, ainsi que l'absence du couvert végétal et la fragilité des sols.

Le mécanisme de la sédimentation et plus particulièrement les courants de densité restent l'étape la plus délicate de ce processus et la cause principale de l'envasement de retenues. du fait de l'érosion assez forte

Nous avons abordé dans cette étude, l'importance de l'envasement dans les retenues de

barrages, et la mise en évidence du rôle joué par la dégradation du bassin versant amont dans ce comblement, La réduction de la capacité de la retenue et l'obturation des organes de vidange sont des menaces qui pèsent lourdement sur la rentabilité des infrastructures hydrotechniques quand ce n'est pas sur la sécurité même de l'ouvrage

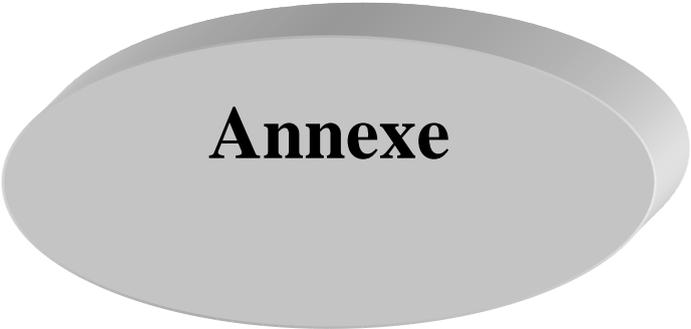
Les sédiments déjà consolidés dans les fonds des retenues, nécessiteront plus d'efforts à leur mise en mouvement. Leur remise en suspension est liée au degré de consolidation des couches. Les plus récents sont les plus érodables et s'adaptent à des moyens de dévasement relativement peu coûteux. par contre les couches inférieures sont caractérisées par une rigidité initiale ne permettant leur mise en mouvement qu'avec des moyens mécaniques performants.

Nous avons rencontré quelques contraintes durant la réalisation de ce travail parmi lesquelles le manque des données hydrométriques dans la région étudiée.

Nous avons émis des recommandations et suggestions pour limiter l'érosion hydrique au niveau des bassins versants et aussi des mesures à prendre au niveau des cuvettes de barrages.

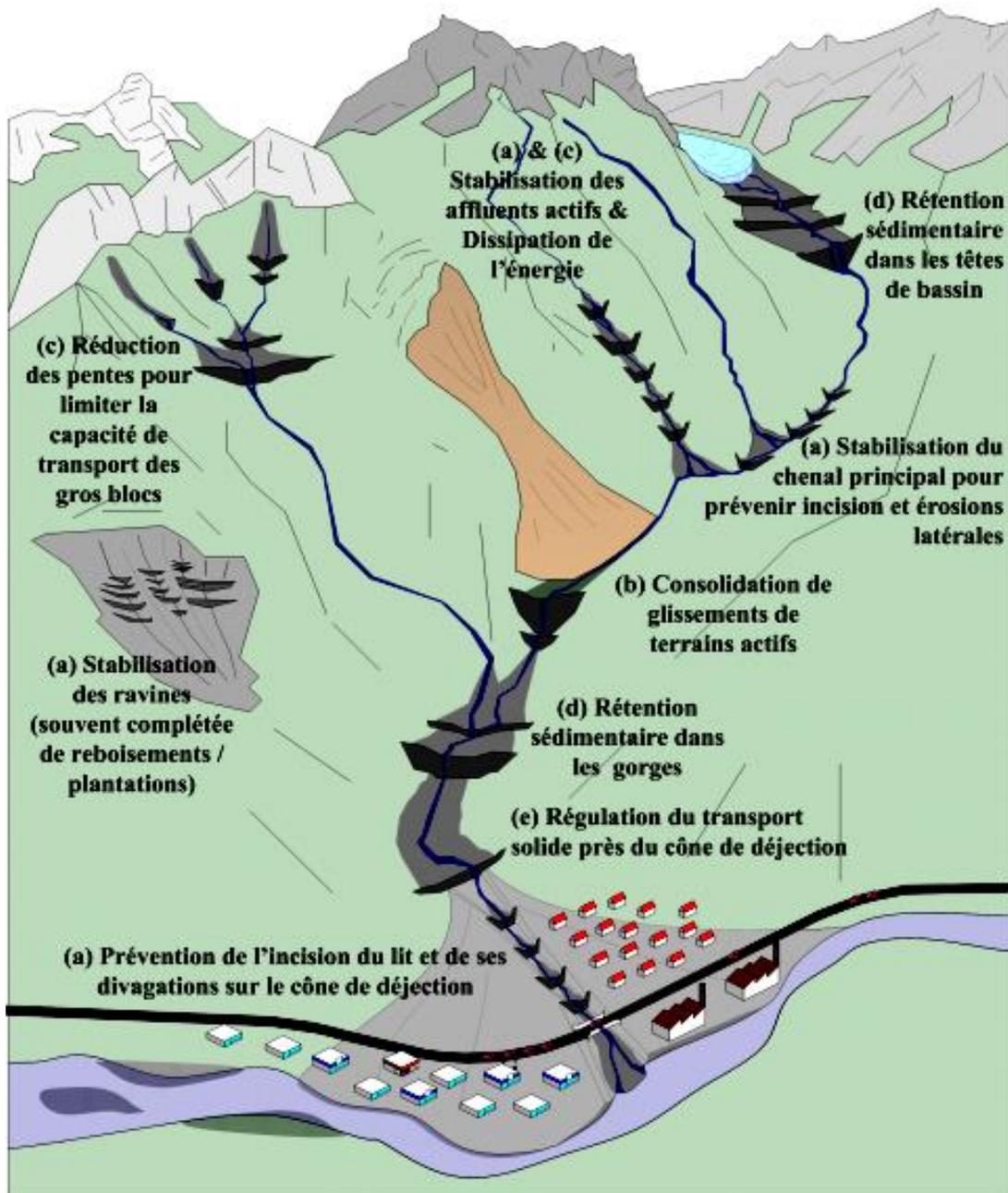
Certains barrages fortement envasés nécessitent un dragage, d'autres nécessitent la mise en place de corrections torrentielles et implantation d'une couverture végétale, et d'autres des banquettes anti érosion et des mesures pour éviter le surpâturage.

Cette étude doit être suivie et améliorée par d'autres études complémentaires afin de construire une base des données qui peuvent être bénéfique dans les études de réalisation des ouvrages hydrauliques.



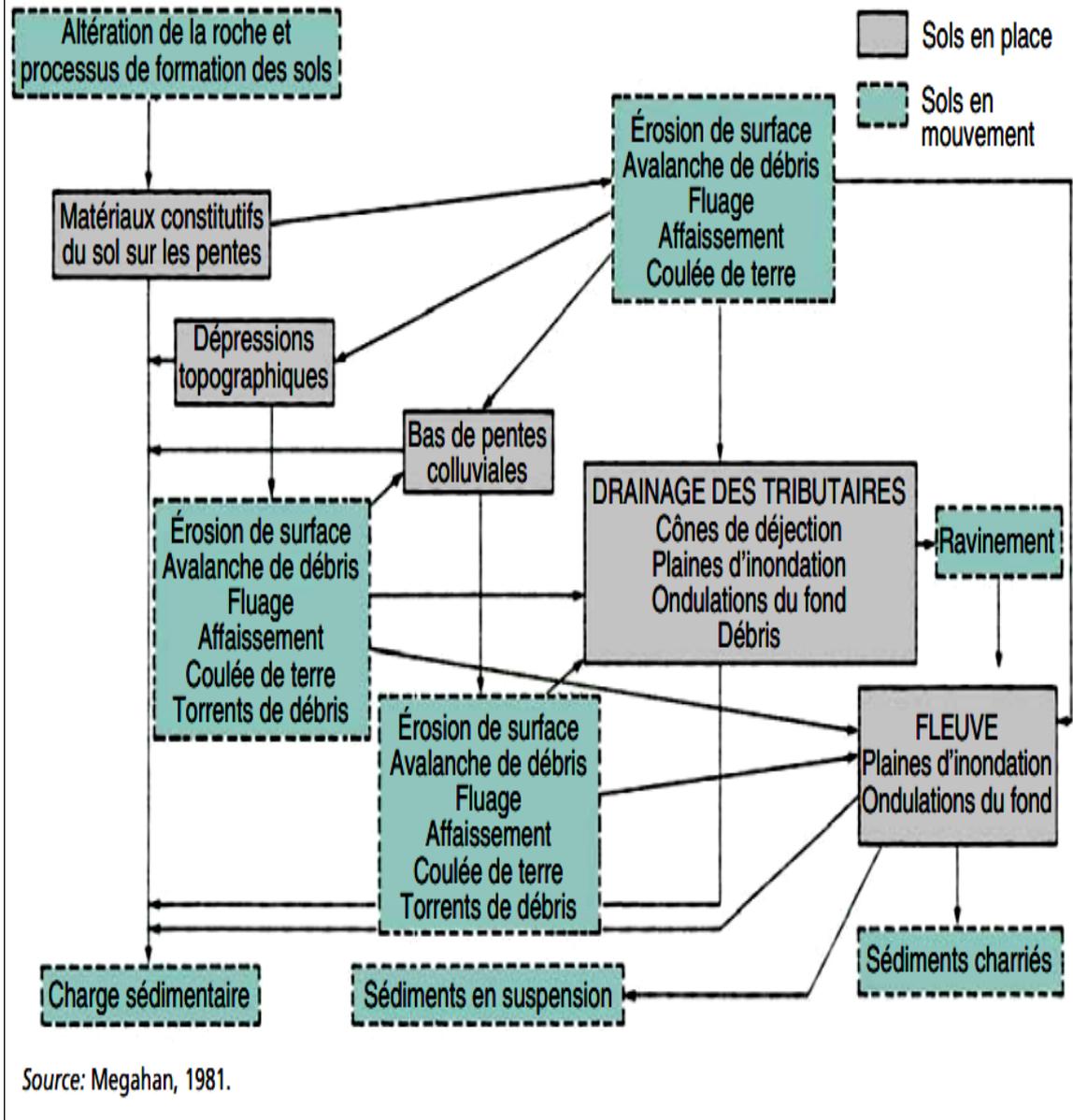
Annexe

Exemples de localisations typiques de protections torrentielles dans un bassin versant et fonctions principales associées



Légende : (a) stabilisation du lit, (b) consolidation de versant, (c) réduction de la pente, (d) rétention et (e) régulation du transport solide. Les mesures de correction complémentaires (reboisement, drainage, chenalisations, endiguements et plages de dépôt) ainsi que les fonctions et effets secondaires n'ont pas été mentionnés par souci de clarté.

FIGURE 2
Processus d'érosion et de sédimentation
dans un bassin versant



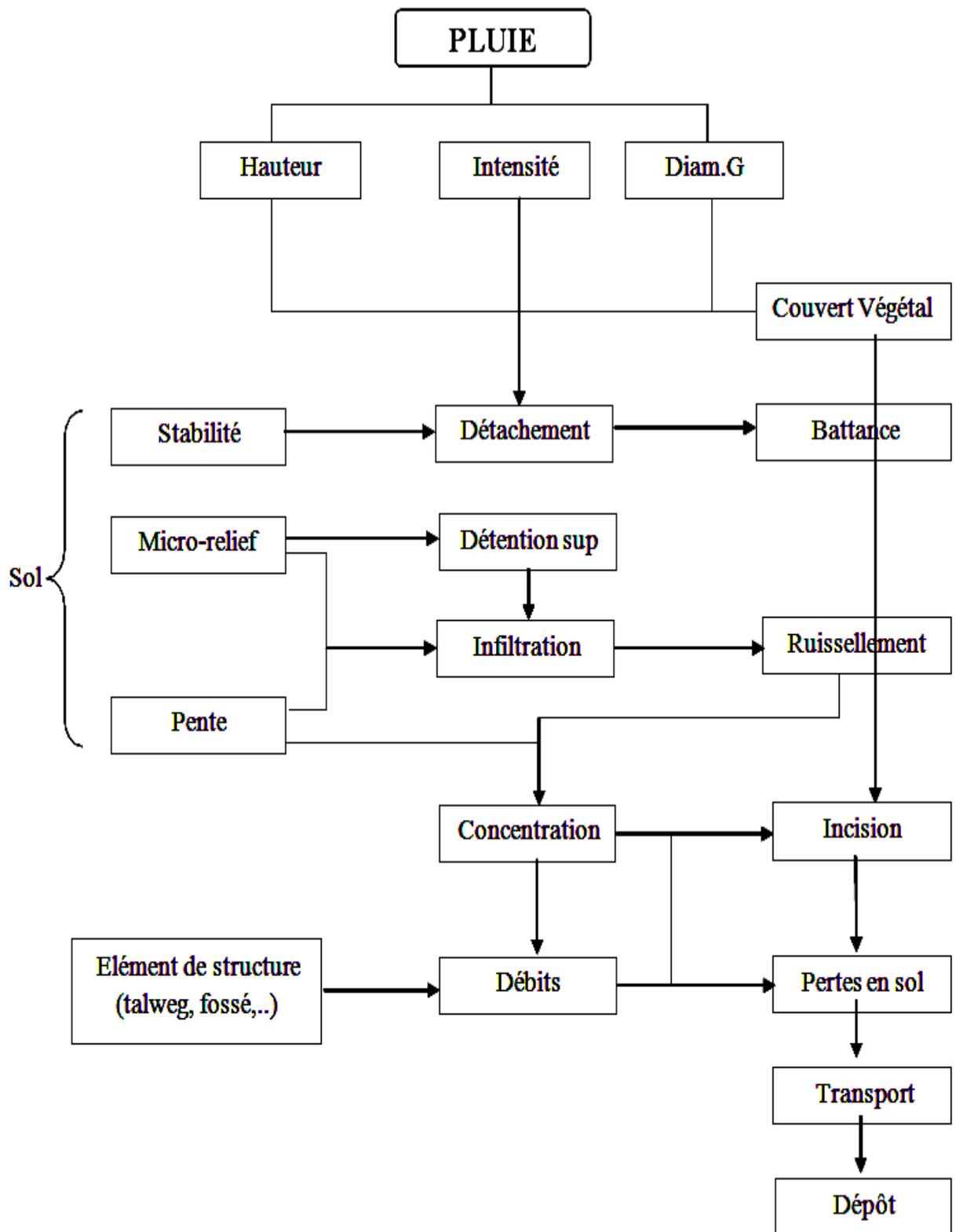
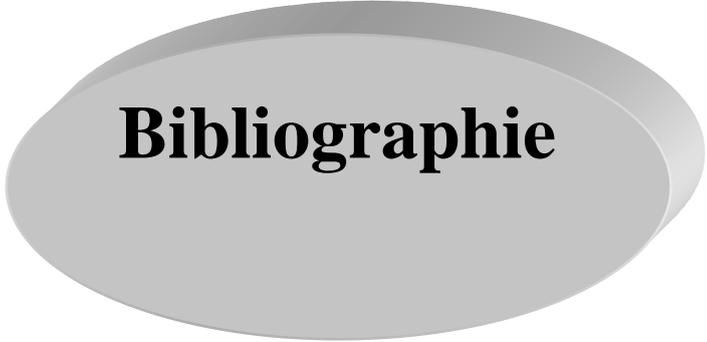


Figure . Différentes étapes de l'érosion (Eimberck, 1990).



Bibliographie

Bibliographie

- [1]. AMMARI,A. 2012. Vulnérabilité à l'envasement des barrages (cas du bassin hydrographique des côtiers Algérois). thèse de Doctorat. Université de Mohamed Khider (Biskra).Algérie.
- [2]. AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES (ANRH, Alger) : Actes du Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages –Alger-Décembre 1991
- [3]. AZZI, F. (2017). « Contribution à l'étude prédictive de l'envasement et la durabilité du barrage du Ghrib », Thèse de Master, ENSH, 91 pages.
- [4]. Achite M., Meddi M. (2004). Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest Algérien). Revue Sécheresse No.4, Vol.15: 367-373.
- [5]. Bouanani A. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie).Thèse de Doctorat d'Etat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 250p.
- [6]. Badraoui A., Hajji A. (2001). Envasement des retenues de barrages, Revue la Houille Blanche, No.6/7: 72-75.
- [7]. Benkhaled A. (2005). Contribution à l'étude du transport solide en suspension, bassin d'Oued Ouahrane, Cheliff. Thèse de Doctorat Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 215p.
- [8]. Boubakeur, M., Lakhal, R., (2021). « Problèmes de risque d'envasement des barrages - cas du barrage Ain Dalia Souk Ahras » Thèse de Master, université de Bordj Bou Arreridj, 91 pages.
- [9]. BADRAOUI A, HAJJI A, 2001. Envasement des retenues de barrages. Revue la Houille Blanche n° 6/7, pp 72 - 75.
- [10]. Dernane et al, 2014 ; Contribution à l'estimation des taux d'érosion et l'envasement des barrages du bassin versant de l'Oued Chélif 69p.
- [11]. ELAHCENE, Omar. 2013. Etude du transport solide par charriage et en sususpension dans le bassin versant de l'oued Bellah (Tipaza). Alger.
- [12]. Ferradji.I(2002). Mémoire d'Ingéniorat. Quantification du transport solide au droit du barrage de Beni-Amrane (W.Boumerdes). ENSH N° 02 pp93.
- [13]. Ghernaout R. (2014). Impact du transport solide en suspension sur l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda. Thèse Université Blida 01, Thèse doctorat .
- [14]. HALA, Z., KARROUR, M., (2019). « Étude de la problématique de l'envasement du barrage Djorf-Torba Wilya de Bechar », Thèse de Master, université d'Adrar, 89 pages.

- [15]. Kassoul M, 2002 Contribution à l'étude de la sédimentation des barrages en Algérie. Mémoire fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida ,66p.
- [16]. Remini B, Hallouche W, 2003 La sédimentation dans les barrages de L'Afrique du Nord, larhyss/journal n°02, juin 2003, pp.45-54.
- [17]. REMINI, B. AVENARD J., (2003), « Envasement des barrages », Edition CEDOC. Kettab, A.
- [18]. REMINI B. (1997). Envasement des retenues de barrages en Algérie: importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage. Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 348 pages.
- [19]. Remini B, (2012) l'envasement des barrages quelques exemples algériens.
- [20]. Remini B, Hallouche W, 2004 La sédimentation dans les barrages Algériens, Revue internationale la houille blanche/n°1.
- [21]. REMINI B, hallouche W, (2007) Evolution de l'envasement du barrage d'Oued El Fodda. Revue Eau énergie air, n°1, Avril, pp 75-78.
- [22]. Saidi.A(1991).Erosion spécifique et prévision de l'envasement. Communication du colloque sur l'érosion en Algérie (ANRH+GTZ°) Algérie.
- [23]. Touabia B. (2010). Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. Revue Sécheresse Vol.21, No.1: 1-6.
- [24]. Touibia .B ; Ddaoui, A, GOMER.D et Achit.M (2001) Variabilité temporelle de l'écoulement solide dans le bassin versant de l'Oued Mina-Angleterre..Journal des Sciences Hydrologique .AISA N°46,1.
- [25]. Touabia B., Gomer D., Aidaoui A., Achite M. (2001). Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi aride de l'Algérie du Nord. J. Science Hydrologique Vol.46, No.1: 41-53.
- [26]. Touaibia B., Achite M. (2003). Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. J. Sciences Hydrologiques No.2, Vol.48: 235-242.
- [27]. Touaibia B. (2000). Erosion - Transport solide - envasement de barrages, cas du bassin versant MINA. Thèse de Doctorat d'Etat, INA, El-Harrach, Algérie.
- [28]. ZEKRI N., 2001. – Analyse des aménagements anti- érosifs dans le micro-bassin versant du village Tafna tout juste à l'amont du barrage de Hammam Boughrara – Tlemcen. Thèse d'ing, foresterie, Univ de Tlemcen, 67p.