

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID_TLEMCEM

Faculté de TECHNOLOGIE

Département de GENIE-CIVIL

Mémoire de **MASTER EN GENIE CIVIL**

Option : **GEOTECHNIQUE**

Thème :

Analyse géotechnique de sédiments dragués des retenues

Présenté et Soutenu le : **11 / 2020 /26**

par :

EL HADJ ALI Nassima et

DAHMANI Imane

Devant le jury composé de :

Dr. SMAIL Nadia

Présidente

Dr. BOURABAH Maghnia Asmahane

Encadrante

Dr. KHELIFI Zakia

Examinatrice

Année Universitaire : **2019-2020**

Remerciements

On remercie en premier lieu ALLAH qui nous a donné le courage et la volonté afin de poursuivre des études en graduation.

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos profonds remerciements à notre encadrante:

BOURABAH Maghnia Asmahane, Docteur à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.

*Nos remerciements iront également vers tous ceux qui ont accepté avec bienveillance de participer au jury de ce mémoire : Mme **SMAIL Nadia**, Docteur à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen et Mlle **KHELIFI Zakia**, Docteur à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen.*

Un remerciement très spécial pour nos collègues Mr. Talbe younce, Mr. Hadjadji Amri , Mr. Zakaria Aouane, Mr Laydjune et Mr Abdelghani Belbachir pour leurs conseils et motivations.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

*A nos chers parents pour l'effort, leurs soutiens et leurs guides
durant les moments les plus pénibles de ce long chemin.*

A toutes nos familles.

*À tous mes ami(e)s et camarades qui m'ont aidé à réaliser ce
travail, en particulier
ceux de l'option GEOTECHNIQUE.*

À mon binôme EL HADJ ALI Nassima et à sa famille.

*À tous les enseignants du Département de Génie Civil, en particulier
mon*

Encadrante Dr. BOURABAH Maghnia Asmahane

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

À tous ceux que j'aime

*À tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce
travail.*

À mon pays,

Avec l'expression de tous mes sentiments de respect,

Je dédie ce modeste travail

*À tous l'ensemble du LTPO (Laboratoire des Travaux Publics
Ouest)*

Imane

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*À mes chers parents pour l'effort, leurs soutiens et leurs guides
durant les moments les plus pénibles de ce long chemin.*

À toute ma famille.

*À tous mes ami(e)s et camarades qui m'ont aidé à réaliser ce
travail, en particulier*

ceux de l'option GEOTECHNIQUE.

À mon binôme DAHMANI Imane et à sa famille.

*À tous les enseignants du Département de Génie Civil, en particulier
mon*

Encadrante Dr. BOURABAH Maghnia Asmahane

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

À tous ceux que j'aime

*À tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce
travail.*

À mon pays,

Avec l'expression de tous mes sentiments de respect,

Je dédie ce modeste travail

*À tous l'ensemble du LTPO (Laboratoire des Travaux Publics
Ouest)*

Nassima

RÉSUMÉ

Le barrage de Beni Bahdel est exposé à de forte sédimentation en raison des grandes quantités de sédiments qui y sont transportés depuis les rivières, en particulier pendant la période de fortes inondations, où le volume de particules granulaires déposées dans le barrage a atteint environ $0,107 \text{ mm}^3$ par année, abaissant le pourcentage estimé du barrage pour stocker l'eau à 10,47%. La durée de fonctionnement du barrage doit être exclue des énormes quantités de sédiments extraits des vannes inférieures du barrage, ce qui est actuellement considéré comme un problème difficile qui menace l'environnement, à ne pas exploiter ni à évaluer.

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'analyse des propriétés physico-chimiques du sédiment extrait du barrage de Beni Bahdel en vue de son exploitation en domaine du Génie-Civil.

Mots clés : Barrage de Beni Bahdel, Sédiments dragués, Propriétés physico-chimiques, Envasement, Classification.

ABSTRACT

The Beni Bahdel dam is exposed to heavy sedimentation due to the large amounts of sediment transported to it from the rivers, especially during the period of heavy flooding, when the volume of granular particles deposited in the dam reached about $0,107 \text{ mm}^3$ per year, lowering the estimated percentage of the dam to store water to 10,47%. The operating life of the dam must be excluded from the huge amounts of sediment extracted from the lower gates of the dam, which is currently considered a difficult problem that threatens the environment, not to be exploited and evaluated.

In this study, we focused on the analysis of the physico-chemical properties of the sediment extracted from the Beni Bahdel dam with a view to its exploitation in the field of Civil Engineering.

Keywords: Beni Bahdel dam, Dredged sediments, Physico-chemical properties, Siltation, Classification.

ملخص

يتعرض سد بني بهدل الى ترسب عالي نظرا للكميات الكبيرة من الرواسب المنقولة اليه و المحمولة من الانهار خاصة في فترة الفيضانات الغزيرة, حيث بلغ حجم الطمي الراسب في السد حوالي $0,107 \text{ مم}^3$ في السنة, مما خفض من نسبة قدرة السد لتخزين المياه الي 10,47%; وحتى نضمن اطالة الفترة الزمنية لاستغلال السد يجب ازالة الكميات الهائلة من الرواسب المستخرجة من الابواب السفلية للسد و التي تشكل حاليا مشكلة كبيرة تهدد البيئة وذلك لعدم استغلالها و تقيمها.

نرتكز في هذه الدراسة إلى تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للرواسب المستخرجة من سد بني بهدل بهدف استغلالها في مجال الهندسة المدنية.

الكلمات المفتاحية: سد بني بهدل ، رواسب مجروفة ، خصائص فيزيو-كيميائية ، ترسيب ، تصنيف.

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur les sédiments de dragage

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure I.1 | Classification des sédiments par la taille selon l'échelle de Wentworth [1] | 17 |
| Figure I.2 | Cycle altération –transport – sédimentation [2] | 18 |
| Figure I.3 | Processus sédimentaire | 19 |
| Figure I.4 | Accumulation de sédiments marins sous une route | 20 |
| Figure I.5 | Schéma de la composition simplifiée des sédiments portuaires (Proulhac et Lann, 2006) | 22 |
| Figure I.6 | Classification du transport solide | 23 |
| Figure I.7 | Mode d'envasement d'une retenue (Baker et al.2016) | 24 |
| Figure I.8 | Diagramme érosion-transport-sédimentation d'après Hjulstrom (1935) | 25 |
| Figure I.9 | Schématisation de la bathymétrie par nivellement (Proulhac et Lann, 2006) | 26 |
| Figure I.10 | Schématisation de la bathymétrie par échosondeur (Proulhac et Lann, 2006) | 27 |

Chapitre II : Problématique d'envasement des barrages

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure II.1 | Carte d'envasement des barrages en Algérie (Remini et al., 2009) | 35 |
| Figure II.2 | Représentation schématique de trois types de dragues mécaniques : a) drague à godets; b) drague à benne; c) drague à pelle (D'après Kenneth et Hardy, 1980) (ALZIEU, 1999). | 37 |
| Figure II.3 | Dragues hydrauliques : a) aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement; b) aspiratrice en marche; c) dragues fendables (D'après Kenneth et Hardy, 1980) (ALZIEU, 1999). | 38 |
| Figure II.4 | Proportions draguées par les dragues hydrauliques (Boutin, 2000) | 39 |
| Figure II.5 | Dragage à l'américaine | 39 |

Chapitre III : Caractérisation Géotechnique des sédiments de Beni Bahdel

| | | |
|--------------|--|----|
| Figure III.1 | Classification GTR d'un sol selon sa teneur en matières organiques (MO) | 48 |
| Figure III.2 | Courbes granulométriques du sédiment de Beni Bahdel | 50 |
| Figure III.3 | Variation d'états de consistance d'un sol fin. | 51 |
| Figure III.4 | Détermination de la limite de liquidité (w_L) pour le sédiment du barrage de Beni bahdel | 53 |
| Figure III.5 | Classification du sédiment de Beni Bahdel par utilisation du diagramme de plasticité de Casagrande | 54 |
| Figure III.6 | Courbes de compactage du sédiment de barrage Beni Bahdel | 57 |
| Figure III.7 | Classification du sédiment du barrage de Beni Bahdel selon le guide GTR (2000) | 58 |

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur les sédiments de dragage

| | | |
|-------------|--|----|
| Tableau I.1 | Les plus simples définitions des faciès d'après Allen (Boutin, 2001) | 21 |
|-------------|--|----|

Chapitre II : Problématique d'envasement des barrages

| | | |
|--------------|---|----|
| Tableau II.1 | Pertes de capacité dues à l'envasement dans certains pays du monde (Remini et Hallouche, 2004). | 31 |
|--------------|---|----|

| | | |
|--------------|---|----|
| Tableau II.2 | Caractéristiques d'envasement des barrages en Tunisie (Ben Mammou et Louati, 2007). | 32 |
|--------------|---|----|

| | | |
|--------------|--|----|
| Tableau II.3 | La dégradation annuelle des bassins versants et l'envasement des barrages Marocains (Lahlou, 1988) | 33 |
|--------------|--|----|

| | | |
|--------------|--|----|
| Tableau II.4 | Quantification de l'envasement des barrages Algériens [A.N.B.T]. | 35 |
|--------------|--|----|

| | | |
|--------------|--|----|
| Tableau II.5 | Taux d'envasement des barrages en Algérie (Remini et Bensafia, 2016) | 36 |
|--------------|--|----|

Chapitre III : Caractérisation Géotechnique des sédiments de Beni Bahdel

| | | |
|---------------|--|----|
| Tableau III.1 | Teneur en eau naturelle des sédiments de Beni Bahdel | 47 |
|---------------|--|----|

| | | |
|---------------|--|----|
| Tableau III.2 | Analyse granulométrique des sédiments de Beni Bahdel | 50 |
|---------------|--|----|

| | | |
|---------------|---|----|
| Tableau III.3 | Récapitulatif des résultats des limites d'Atterberg pour le sédiment de Beni Bahdel | 53 |
|---------------|---|----|

| | | |
|---------------|--|----|
| Tableau III.4 | Potentiel de gonflement d'après Snethen (1980) | 54 |
|---------------|--|----|

| | | |
|---------------|---|----|
| Tableau III.5 | Valeurs des paramètres VBS et SST pour le sédiment de Beni Bahdel | 55 |
|---------------|---|----|

| | | |
|---------------|---|----|
| Tableau III.6 | Classification des sols d'après la valeur au bleu (VBS) | 56 |
|---------------|---|----|

| | | |
|---------------|--|----|
| Tableau III.7 | Récapitulatif des résultats des essais de compactage à l'OPN pour le sédiment de Beni Bahdel | 57 |
|---------------|--|----|

| | | |
|---------------|--|----|
| Tableau III.8 | Récapitulatif des paramètres d'identification du sédiment du barrage Beni Bahdel pour la classification du GTR (2000). | 58 |
|---------------|--|----|

Liste des Photos

Chapitre I : Généralités sur les sédiments de dragage

| | | |
|-----------|---|----|
| Photo I.1 | Estimation de l'envasement par la méthode de nivellement (Tachéomètre) (Benahmed, 2015) | 27 |
|-----------|---|----|

Chapitre III : Caractérisation Géotechnique des sédiments de Beni Bahdel

| | | |
|--------------|---|----|
| Photo III.1 | Barrage de Beni Bahdel (wilaya de Tlemcen) | 42 |
| Photo III.2 | Localisation du bassin versant de l'Oued Tafna | 43 |
| Photo III.3 | Travaux de surélévation du barrage de Beni Bahdel [2] | 44 |
| Photo III.4. | Vue du tracé topographique du site du barrage de Beni Bahdel | 45 |
| Photo III.5 | Prélèvement des échantillons de sédiments sur les côtés amont et aval de la retenue. | 46 |
| Photo III.6 | Détermination de la teneur en matières organiques (MO) du sédiment de Beni Bahdel par la méthode de calcination | 47 |
| Photo III.7 | Analyse granulométrique des sédiments de Beni Bahdel | 49 |
| Photo III.8 | Appareil de Casagrande pour déterminer la limite de liquidité | 52 |
| Photo III.9 | Les étapes d'exécution de l'essai de la limite de plasticité. | 52 |
| Photo III.10 | Essai au bleu de méthylène sur le sédiment de Beni Bahdel | 55 |
| Photo III.11 | Vérifications effectuées lors de l'essai au bleu de méthylène | 55 |
| Photo III.12 | Étapes de réalisation de l'essai Proctor Normal sur le sédiment de Beni Bahdel. | 56 |

Liste des Symboles

GTR : Guide des terrassements routiers

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

IP : Indice de plasticité

VBS : Valeur au bleu du sol

SST : Surface spécifique totale

D_{max} : Diamètre maximum

C_u : Coefficient d'uniformité

IP : Indice de plasticité

C_c : Coefficient de courbure

d₁₀ : Diamètre des particules pour 10 % de passants cumulés

d₃₀ : Diamètre des particules pour 30 % de passants cumulés

d₆₀ : Diamètre des particules pour 60 % de passants cumulés

W_L : Limite de liquidité

W_P : Limite de plasticité

N : nombre des coups

MO : Matières organiques

w : Teneur en eau

OPN : Optimum Proctor Normal

γ_d : poids volumique sec

w_{OPN} : Teneur en eau optimale

γ_{dOPN} : Masse volumique sèche maximale

Sommaire

| | |
|--|--|
| Liste des figures | 6 |
| Liste des tableaux | 7 |
| Liste des photos | 8 |
| Liste des symboles | 9 |
| INTRODUCTION GENERALE | 13 |
| Chapitre I : Généralités sur les sédiments de dragage | |
| I.1 | Introduction 16 |
| I.2 | Principaux types de sédiments 16 |
| I.3 | Processus de transport et de sédimentation 18 |
| I.4 | Causes et Origine de L'envasement 19 |
| I.5 | Définition de la vase 20 |
| I.5.1 | Qu'est-ce qu'une vase ? 20 |
| I.6 | Composition des sédiments 21 |
| I.6.1 | Structure physico-chimique des sédiments 21 |
| I.7 | Distribution des sédiments des barrages 22 |
| I.8 | Les modèles d'estimation de l'envasement 25 |
| I.8.1 | Bathymétrie par nivellement 25 |
| I.8.2 | Bathymétrie par sondeur «Echosondeur bathymétrique» 27 |
| I.9 | Les moyens de lutte contre l'envasement 28 |
| I.9.1 | La conservation des sols 28 |
| I.10 | Conclusion 29 |
| Chapitre II : Problématique d'envasement des barrages | |
| II.1 | Introduction 31 |
| II.2 | Envasement des barrages dans le monde 31 |
| II.3 | Envasement des barrages dans le MAGHREB 32 |
| II.3.1 | Envasement en TUNISIE 32 |
| II.3.2 | Envasement au MAROC 33 |
| II.3.3 | Envasement en ALGERIE 34 |
| II.4 | Conséquences du phénomène d'envasement 36 |
| II.5 | Moyens de lutte contre l'envasement en Algérie 36 |
| II.6 | Les techniques de dragage disponibles 37 |
| II.6.1 | Les dragages mécaniques 37 |

| | | |
|---|--|----|
| II.6.2 | Les dragages hydrauliques | 37 |
| II.6.3 | Les dragages à l'américaine | 39 |
| II.7 | Conclusion | 39 |
| Chapitre III : Caractérisation Géotechnique des sédiments de Beni Bahdel | | |
| III.1 | Introduction | 42 |
| III.2 | Présentation du site d'étude | 42 |
| III.2.1 | Localisation du barrage | 43 |
| III.2.2 | Historique du Barrage | 43 |
| III.3 | Prélèvement d'échantillons du site | 45 |
| III.4 | Caractérisation physico-chimique des sédiments | 46 |
| III.4.1 | Teneur en eau naturelle (wn) | 47 |
| III.4.2 | Teneur en matières organiques (MO) | 47 |
| III.4.3 | Analyse granulométrique | 48 |
| III.4.4 | Les limites d'Atterberg | 51 |
| III.4.5 | Essai au bleu de méthylène (VBS) | 54 |
| III.4.6 | Essai de compactage (Proctor Normal) | 56 |
| III.5 | Classification du sédiments de Beni Bahdel | 58 |
| III.6 | Conclusion | 59 |
| Conclusion Générale | | 61 |
| Références Bibliographiques | | 64 |

Introduction

Générale

Introduction Générale

Ces dernières années, l'envasement des barrages en Algérie devient de plus en plus inquiétant et fréquent. Plus de 32 millions de m³ de sédiments se déposent chaque année au fond des retenues. Le barrage de Beni Bahdel (wilaya de Tlemcen) n'a pas échappé à ce problème d'envasement.

Présentant actuellement une capacité de stockage d'eau de 45% où il est donc utile procéder aux travaux de dragage afin de conserver la pérennité de cet ouvrage. Cependant, les opérations de dragage peuvent conduire à certaines anomalies à savoir :

Le cout élevé des opérations de dragage ainsi que l'impact des sédiments une fois évacués par le dragage sur la faune et la flore d'un côté et sur la géométrie du cours d'eau en aval de l'autre côté. En effet, les grandes quantités de sédiments rejetés en aval du barrage, de sérieux problèmes d'environnement sont apparus où il a été alors plus judicieux de mener une réflexion pour une utilisation rationnelle de ces sédiments qui peuvent être valorisé dans plusieurs domaines du Génie-Civil. Dans cette étude, nous avons mené une série d'analyses physique, chimique et mécanique sur des échantillons de sédiments prélevés de la retenue du barrage Beni Bahdel au niveau des côtés amont et aval de la retenue.

On s'intéresse donc dans ce travail à étudier le comportement mécanique de sédiments de dragage extraits du barrage de Beni Bahdel qui est situé sur l'Oued Tafna, commune de Beni Snous, à une dizaine de kilomètre au sud de la ville de Tlemcen, permettant de constituer sur l'Oued Tafna une retenue d'une capacité totale de 63 millions m³ dont sa réalisation a débuté en 1934 et sa mise en eau en 1944.

L'objectif de cette étude portera en grande partie à l'identification géotechnique ainsi que la classification des sédiments de cette retenue.

Ce mémoire est scindé en une introduction générale et trois chapitres avec une conclusion générale finalisant cette étude.

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les sédiments de dragage des barrages en décrivant les modèles utilisés pour l'estimation du phénomène d'envasement ainsi que les différents moyens de lutte contre ce phénomène.

Le deuxième chapitre décrit la problématique de l'envasement des barrages à l'échelle maghrébine et nationale.

Le troisième chapitre donne une présentation globale de l'aspect géologique et géomorphologique du site d'étude (Barrage de Béni Bahdel). Une description des principaux

essais physico-chimique et mécanique dans le processus de caractérisation géotechnique des sédiments prélevés des deux côtés amont et aval de la retenue est présentée.

L'analyse des paramètres géotechniques sont ainsi discutée suivie d'une classification des sédiments étudiés. Cette classification établie nous conduira à mettre en place une synthèse des paramètres guides intervenant dans ce processus de gestion de ces sédiments.

Notre travail est finalisé par une conclusion générale contenant l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre I :
Généralités sur les sédiments de dragage

I.1 Introduction

Les sédiments sont un ensemble de matériaux déposés par les cours d'eau, le vent, la glace qui provient de l'usure des continents, c'est à dire de la destruction des roches ou d'être vivants. Cette destruction se fait par des mécanismes physiques produisant la fragmentation des matériaux et des réactions chimiques donnant des solutions de lessivage (altération chimique).

Les éléments solides sont déplacés sous l'effet de la gravité, souvent par l'intermédiaire d'un fluide transporteur (eau, glace), et sous l'effet des variations de pression atmosphérique qui produisent les vents. Les éléments en solution sont transportés par l'eau :

- Une partie des produits de destruction peut s'accumuler momentanément sans être transportée, et constitue alors une couche d'altération ou éluvion.
- Les débris, dans leur majeure partie, sont déplacés puis déposés, généralement dans l'eau, pour former un sédiment détritique (alluvions au sens large). Les éléments en solution qui précipitent, sous avec intervention des êtres vivants, forment un sédiment d'origine chimique ou biochimique.

Selon leur lieu de récupération, on peut distinguer deux types de sédiments : Les sédiments marins et les sédiments fluviaux (lac, fleuve, rivières, etc.). On abordera dans ce chapitre, un état de l'art sur ces sédiments de dragage.

I.2 Principaux types de sédiments

Il est de classer les sédiments selon leur taille, c'est à- dire leur diamètre apparent (diamètre minimal de la sphère entourant le sédiment) par exemple, selon l'échelle de Wentworth (Figure I.1). On peut distinguer trois (03) grands types de sédiments:

- Les galets et les gravillons qui proviennent de l'embouchure des fleuves torrentiels ou de l'érosion des falaises ;
- Le sable dont la taille du grain varie de quelques dizaines de micromètres à 2 millimètres, produit ultime de l'érosion des roches cristallines par les fleuves et les glaciers disparus ;
- Les limons et les vases dont la taille du grain est inférieure à 60 micromètres.

Cette distinction provient de la particularité des vitesses de chute de ces sédiments. En effet, les sables correspondent à la zone intermédiaire entre les vases pour lesquelles la résistance hydrodynamique varie proportionnellement à la vitesse de chute, c'est-à-dire tombent en régime laminaire et les galets qui tombent en régime turbulent.

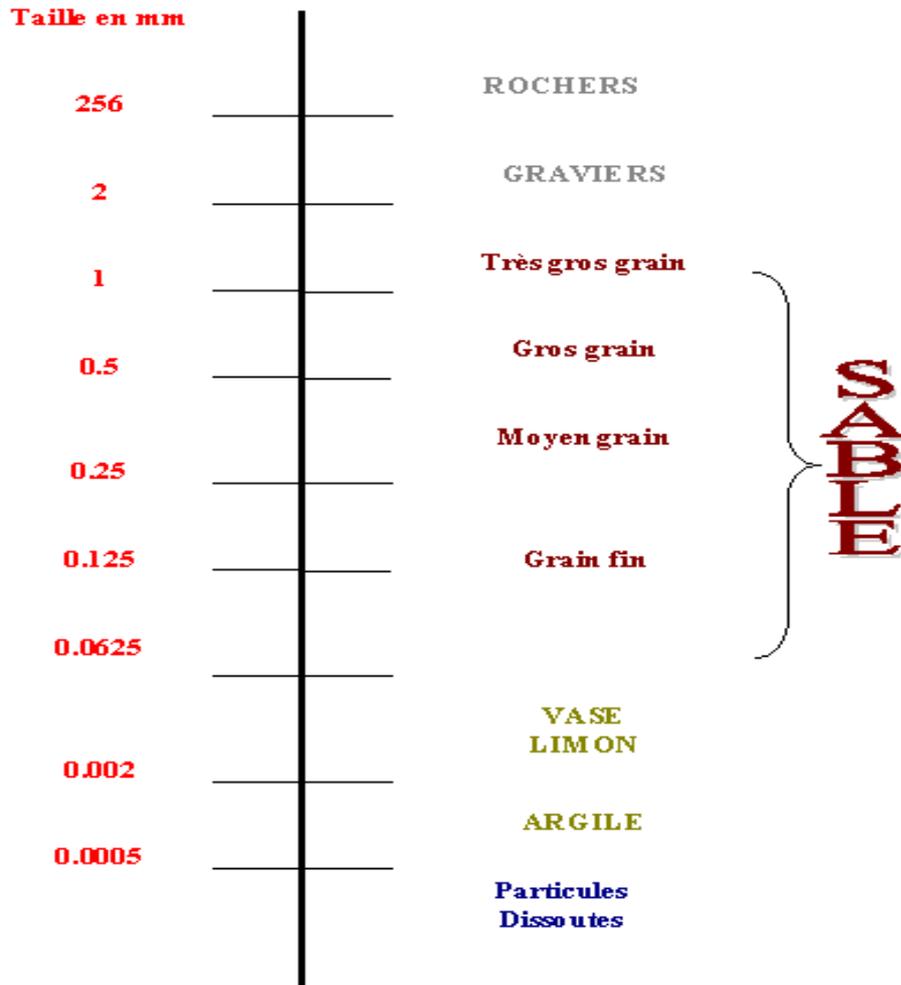


Figure I.1 : Classification des sédiments par la taille selon l'échelle de Wentworth [1]

D'autre part, il faut distinguer deux (02) configurations de sédiments :

a) Les Sédiments Cohésifs

La cohésion des sédiments a un effet significatif sur l'érosion des sédiments et résulte de la présence d'argile (même en faible proportion: 5 à10 % du total des sédiments déposés). Les particules ont tendance à former des conglomérats dans lesquels les flocons sont liés entre eux par de fortes forces électrostatiques.

b) Les Sédiments Non Cohésifs

Les sédiments non cohésifs contiennent des sédiments de grosse taille, non soumis à des forces d'interactions leur permettant de bouger indépendamment les uns des autres. Ils incluent le sable et les limons.

I.3 Processus de transport et de sédimentation

La désagrégation et l'altération des matériaux rocheux fournissent une matière meuble désorganisée et peu résistante, qui peut être entraînée par la gravité et les agents d'érosion. Les principaux agents d'érosion sont : l'eau, la glace et le vent. Les eaux courantes en particulier vont transporter la matière meuble jusqu'à une nouvelle situation d'équilibre où une sédimentation va s'effectuer.

Les sédiments ainsi formés seront d'abord des alluvions, c'est-à-dire le dépôt est parfois situé très loin de la partie d'origine de ses éléments. Les alluvions sont susceptibles de se transformer ensuite, par cimentation naturelle, en roches sédimentaires détritiques indurées (Joye, 2005). L'histoire de la terre étant longue et complexe, ce processus de cycle (altération-transport sédimentation) peut se reproduire plusieurs fois au cours des temps géologiques (Figure I.2).

Le faciès des sédiments sera lié à ses conditions de dépôt, en milieu marin, lagunaire et lacustre.

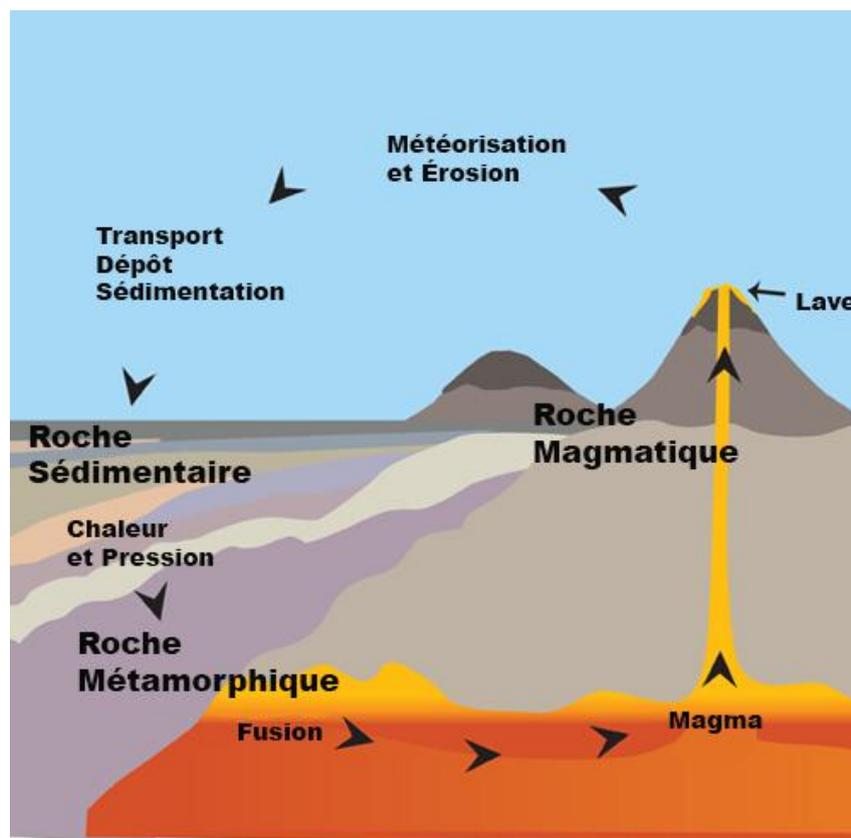


Figure I.2 : Cycle altération –transport – sédimentation [2]

I.4 Causes et Origine de L'envasement

L'envasement est un phénomène dont la dynamique est régulière et homogène. Les dépôts s'effectuent de façon linéaire le plus souvent homogène sur le fond des retenues.

Cet envasement des retenues et des estuaires est lié directement aux phénomènes de l'érosion où les processus de ce phénomène ont des définitions diverses, suivant chaque auteur. On retient la définition qui combine l'arrachement (creusement de la surface du sol, dégradation et altération des roches), le transport et le dépôt de matériaux (Semcha, 2006).

L'origine de l'envasement se trouve dans le dépôt de particules solides, minérales et organiques sur le lit du cours d'eau. Elles sont transportées, par charriage, en suspension ou par ruissellement, pour se déposer dès que le débit du cours d'eau soit faible (Figure I.3).

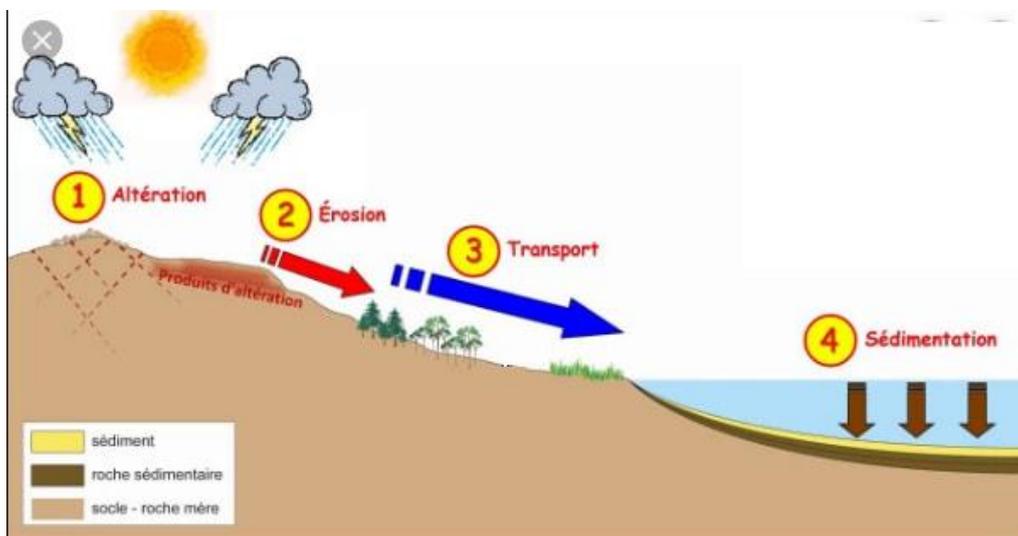


Figure I.3 : Processus sédimentaire

L'érosion, le transport de matériaux et la sédimentation constituent les trois termes de l'évolution géodynamique de la croûte terrestre conduisant à une pénélplanisation des reliefs montagneux sur l'ensemble du globe. Les agents de l'érosion qui sont principalement la pluie, le ruissellement et le vent, ainsi que des facteurs qui vont conditionner les quantités de particules arrachées: caractéristiques des pluies, des sols, de la végétation, de la topographie et enfin les activités humaines.

La définition de l'érosion suivant la trilogie «creusement, transport et accumulation des matériaux» conduit à imaginer un système fluvial idéal comprenant trois (03) zones:

1. La zone 1 : Cette zone correspond à la zone de production des matériaux (amont).
2. La zone 2: Cette zone est celle des transferts des matériaux arrachés en zone 1 (cours d'eau).
3. La zone 3 : Elle couvre les sites des dépôts de ces matériaux (retenues et estuaires).

Il ressort dans les processus de l'érosion que l'eau en est le principal agent moteur. Elle est la cause première de l'altération des roches qui donnent des particules, du détachement et de l'arrachement des agrégats permettant l'enlèvement des agrégats détachés. L'énergie cinétique développée par le ruissellement, le creusement du sol et le transport des matériaux qui sont déposés où accumulés progressivement avec la dissipation de cette énergie.

I.5 Définition de la vase

1.5.1 Qu'est-ce qu'une vase ?

Le nom de vase (mot emprunté au Néerlandais) est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (crème de vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) présentant alors un caractère plastique, compressible et thixotropique.

Elle contient souvent l'habitat d'une faune riche et diversifiée (vers, mollusques, bactéries) (Proulhac et Lann, 2006).

Les vases sont des sols contenant plus de 90% de particules inférieures à 0,2 mm, dont la matière organique (MO) est comprise entre 2 et 10%. Elles sont composées de sable, limon, argile et de colloïdes organiques. Elles sont en particulier très abondantes dans les estuaires, et sont fréquemment thixotropes. La figure I.4 donne un exemple de l'accumulation de sédiments marins sous une route.



Figure I.4 : Accumulation de sédiments marins sous une route

Selon Migniot 1989, les vases sont des sédiments complexes qui couvrent une gamme étendue de particules inférieures à 40 μm mais peuvent contenir une quantité notable d'éléments sableux. (Tableau I.1). Les différentes classes de sédiments interviennent rarement seules. On définit alors différents faciès lithologiques qui varient encore avec les auteurs et les pays.

Tableau I.1 : Les plus simples définitions des faciès d'après Allen (Boutin, 2000)

| Dénomination | Caractéristiques |
|--------------|--|
| Sable | Plus de 80 %s d'éléments supérieurs à 50 μm |
| Sable vaseux | De 20 à 80 % d'éléments supérieurs à 50 μm |
| Vase | Plus de 80 % d'éléments inférieurs à 50 μm |

I.6 Composition des sédiments

I.6.1. Structure physico-chimique des sédiments

Les sédiments se composent d'une fraction solide et d'une fraction liquide (eau) qui sont intimement liées les unes aux autres. Les proportions respectives de chacune de ces fractions sont variables d'un milieu à un autre mais demeurent dans une fourchette, qui par expérience, peut être estimée si l'on considère des matériaux de type vases.

Il y a quatre éléments principaux constituant les sédiments :

1. La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates) ;
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite) ;
3. La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acide fulvique et humiques) ;
4. Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

La distribution granulométrique d'un sédiment constitue son empreinte physique, elle caractérise la taille des particules, constituant la phase solide du matériau. Pour l'obtenir, il est procédé à un tamisage mécanique. En dessous d'une taille de 20 μm , il est nécessaire de recourir à des mesures au laser, qui utilisent le principe de la diffraction de la lumière cohérente sur un écoulement d'une suspension très diluée de fines. Il est communément considéré que les Vases correspondent à la fraction inférieure à 63 μm (Proulhac et Lann, 2006).

La figure I.5 ci-dessous retrace les grands ensembles de la composition des sédiments portuaires vis-à-vis notamment de leur siccité ou de leur granulométrie :

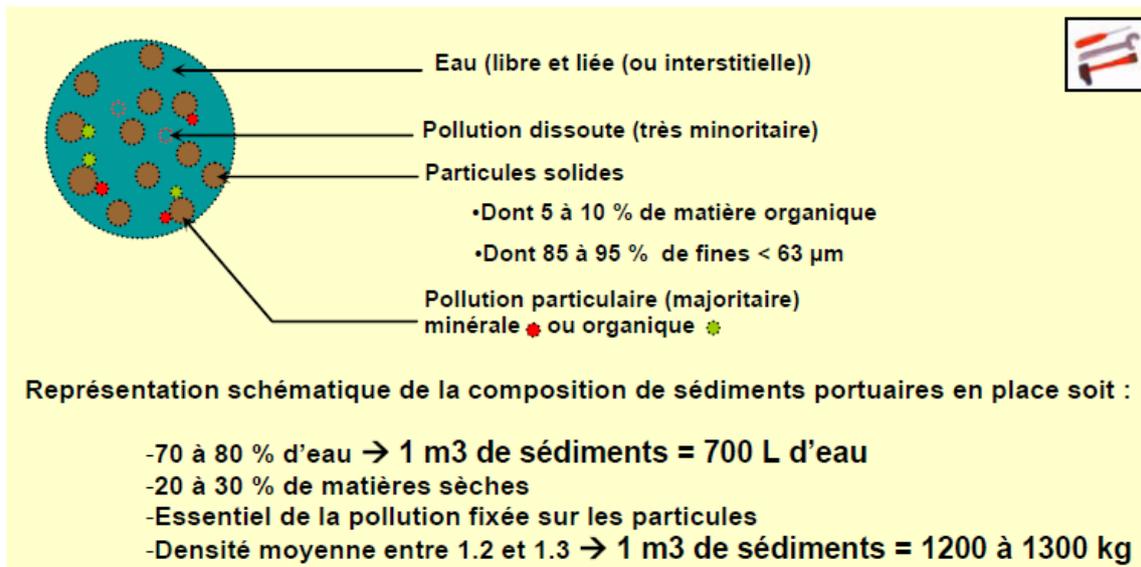


Figure I.5 : Schéma de la composition simplifiée des sédiments portuaires (Proulhac et Lann, 2006)

I.7 Distribution des sédiments des barrages

La distribution des sédiments sur un bassin versant et son transport spécifique dans les fleuves regroupent deux processus différents. Ces deux notions permettent de distinguer d'une part les processus de détachement et de transport de matériaux du sol avant leur entrée dans le système "rivière" et d'autre part leur transport dans la rivière elle-même.

Les taux de particules transportées vont à leur tour être régis par de nombreux facteurs dont la vitesse de l'eau, les caractéristiques du lit et la granulométrie des particules.

Les particules ainsi transportées par le cours d'eau ne refléteront qu'en partie les phénomènes d'érosion sur les versants puisqu'une partie des sédiments arrachés au bassin pourra se déposer entre les sources d'érosion et l'exutoire du bassin de drainage. D'autre part, l'érosion des berges pourra contribuer à la charge en suspension mesurée dans le cours d'eau tandis que la présence de lacs, réservoirs entraînent une sédimentation des particules mais la question qui se pose, c'est de quelle manière ces particules solides se sont réparties et distribuées dans l'ensemble de la retenue ?

On sait que ce phénomène complexe dépend de certains paramètres tel que :

- La forme géométrique de la retenue
- La profondeur de la retenue.
- L'apport solide de la retenue.
- La pente du fond de la retenue.

À l'état naturel les oueds transportent progressivement des quantités importantes de sédiments :

Soit par charriage (bed load) : Ils concernent les matières minérales en phase solide plus particulièrement les plus gros éléments. Ces particules roulent sur le fond ou se déplacent par saltation ou glissement.

Soit par suspension (suspended) : Le transport en suspension est en général constitué de matériaux fins, argiles et colloïdes et quelquefois de silts, de se déplacer sans toucher le fond du lit (Figure I.6).

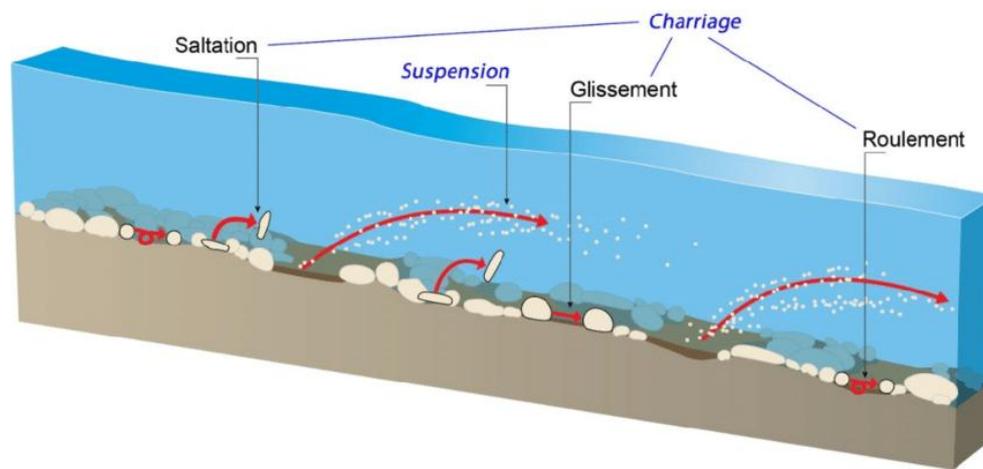


Figure I.6 : Classification du transport solide

Les eaux chargées de matériaux fins forment un courant de densité qui s'écoule sur le long de la retenue et transportent ainsi la vase jusqu'au pied du barrage. D'après DUQUENNOIS. H (1952-1957) la formation des courants de densité dans une retenue est conditionnée par deux paramètres :

1. Un apport solide important «concentration élevée» dans la retenue.
2. Un écoulement torrentiel à l'entrée de la retenue «Le court d'eau principal présente une forte pente». Ces écoulements peuvent se faire : Au-dessous «Underflow», Au-dessus «Overflow» et à travers «Interflow». Dans ce trajet, les sédiments se déposent, des plus grandes particules aux plus petites, de l'amont vers l'aval de la retenue (Figure I.7).

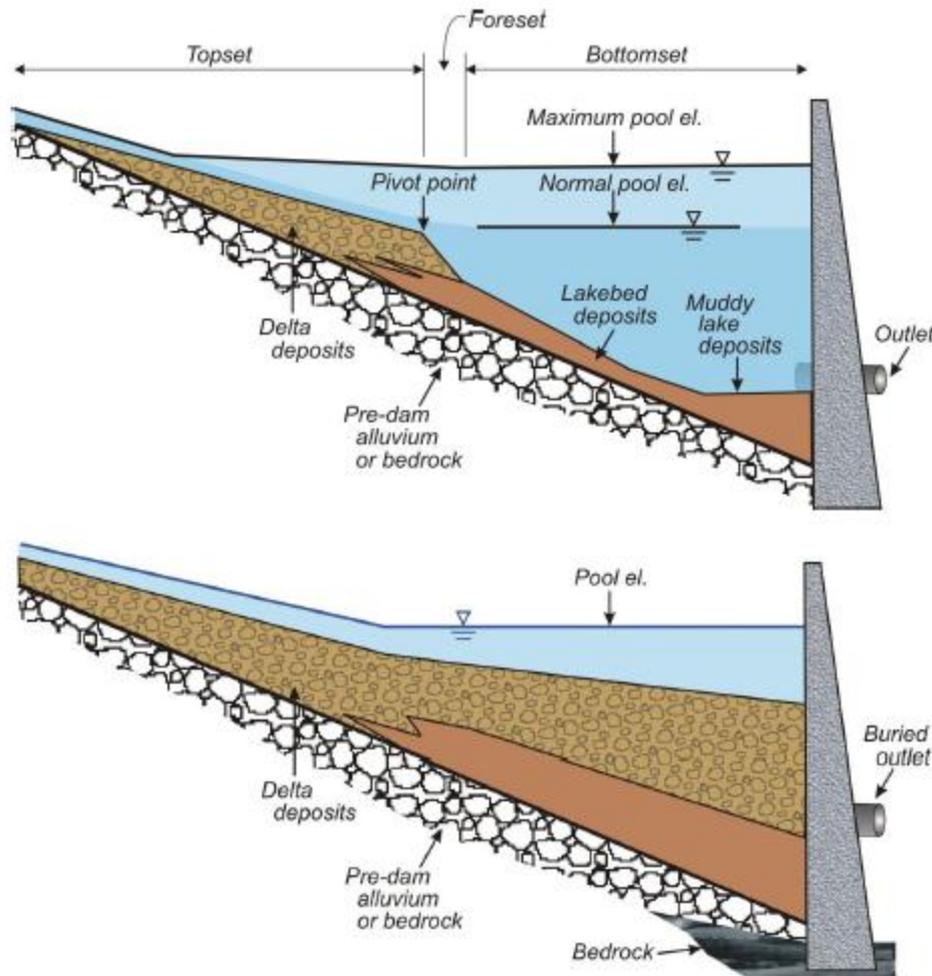


Figure I.7 : Mode d'envasement d'une retenue (Baker et al.2016)

Les différents mécanismes de l'envasement dépendent du type de retenues (morphologie) et les conditions de sédimentation existant à l'amont de la retenue (érosion et transport solide). La morphologie de chaque retenue est déterminée par son état antérieur. Par ailleurs, la forme de la retenue, la circulation de l'eau, et les apports solides ont une grande influence sur la nature et la vitesse de l'alluvionnement de la retenue. La nature des matériaux déposés tel que la taille, la forme, la concentration, la vitesse de chutes et densité des particules jouent un rôle important. La présence ou l'absence de stratification, et la cohésion du dépôt solide dépendent surtout des mécanismes de sédimentation et des formes de l'écoulement qui conduira à la décantation.

Le diagramme de Hjulstrom résume les conditions de transport, de dépôt et de mise en suspension des particules en fonction de leur taille et la vitesse du courant pour qu'une particule sédimente, la vitesse du courant doit descendre sous un seuil critique et plus la particule est petite, plus la vitesse doit être basse (Figure I.8).

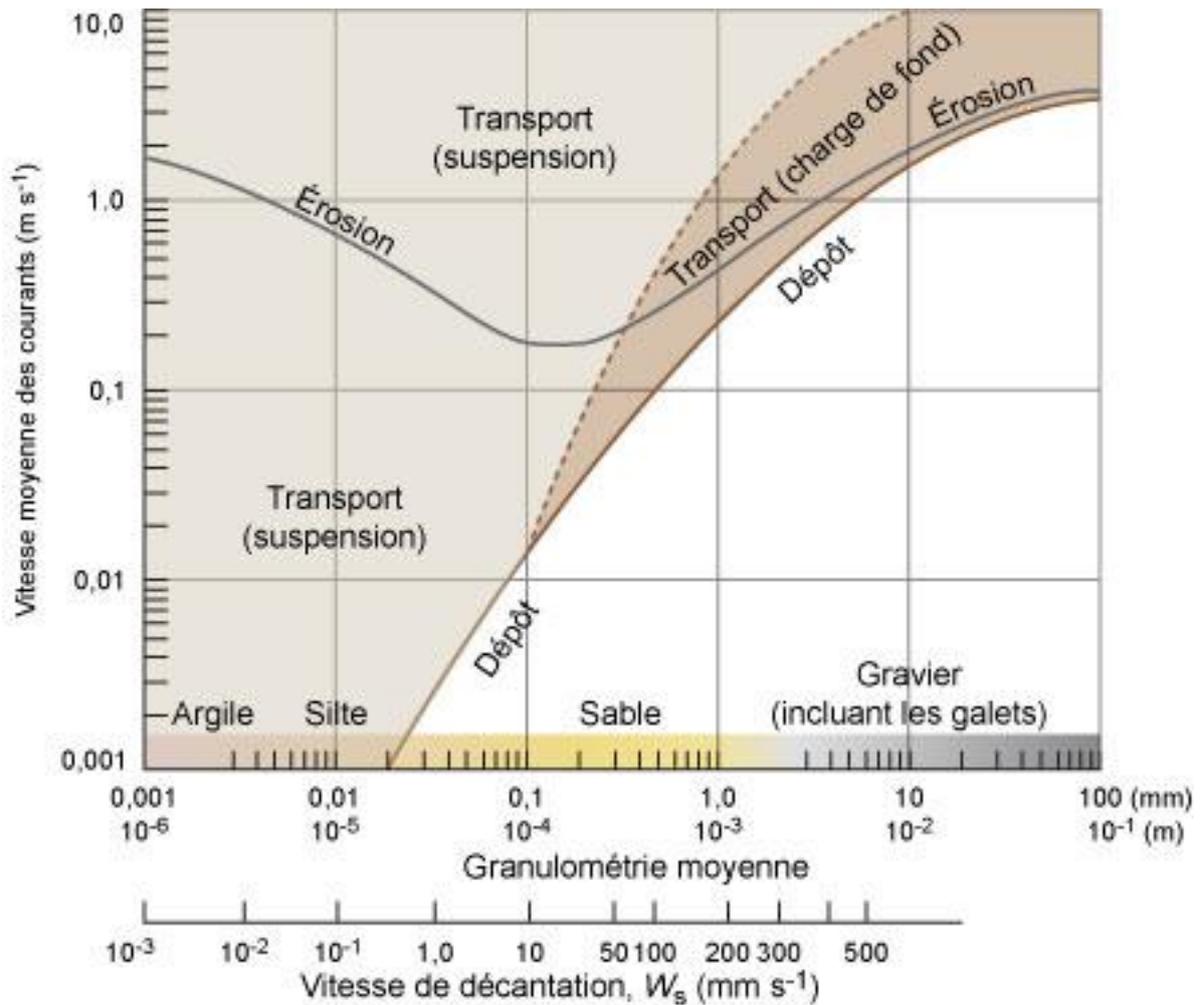


Figure I.8 : Diagramme érosion-transport-sédimentation d'après Hjulstrom (1935)

I.8 Les modèles d'estimation de l'envasement

L'accumulation des sédiments véhiculés par les eaux pluviales et venants à se déposer dans la cuvette des barrages, constitue une préoccupation essentielle pour les méthodes d'évaluation du volume de ces sédiments. On distingue pour cela, deux méthodes de mesure :

I.8.1 Bathymétrie par nivellement

Cette méthode présente l'avantage de tenir compte de toute la hauteur de sédiments et est intéressante à mettre en œuvre dans les projets où le toit du substrat n'est pas connu. Il y a plusieurs méthodes utilisées pour le levé bathymétrie par nivellement dont on cite quelques exemples (Proulhac et Lann, 2006) :

a. La première méthode de bathymétrie par nivellement est réalisée à l'aide d'un instrument de mesure gradué, à partir du bord et préférentiellement à partir d'une embarcation si les conditions le permettent. Elle permet soit de mesurer simplement la hauteur totale de

vases par enfoncement, soit de mesurer la hauteur d'eau avant et après les travaux, une résistance plus soutenue permet d'apprécier le haut du substrat. Les mesures sont composées de profils en travers qui pour être représentatifs, doivent être judicieusement localisés et dénombrés. La définition du volume extrait ou à retirer est établie par extrapolation entre deux profils à partir du produit entre la section envasée et la distance (Figure I.9).

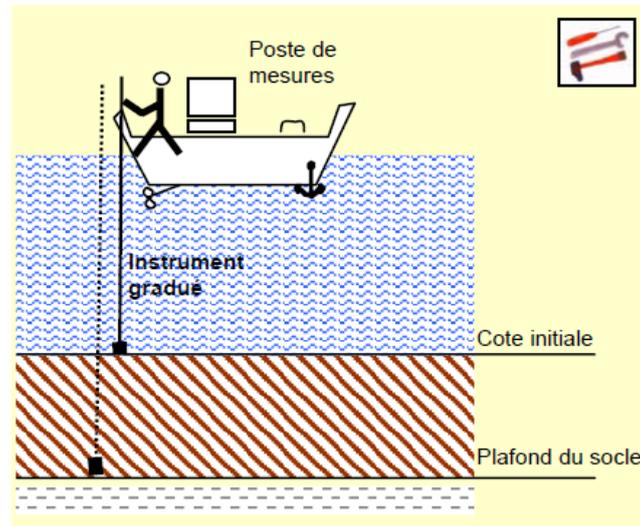


Figure I.9 : Schématisation de la bathymétrie par nivellement (Proulhac et Lann, 2006)

b. La seconde méthode de nivellement est à l'aide d'une mire sur une embarcation et d'une lunette de visée ou d'un tachéomètre (lunette de visée laser), la hauteur d'eau, le niveau supérieur de la couche de vase et le fond dur sont obtenus (Photo I.1). Le relèvement s'effectue point par point selon un profil transversal au cours d'eau. Le nombre de points sera forcément fonction de la largeur du cours d'eau.

La carte globale se fait alors par extrapolation des profils transversaux où il est nécessaire de prendre en compte la côte de l'eau afin d'avoir un positionnement précis des profils pour tenir compte des particularités du terrain. Le nivellement n'est généralement pas précis et admet une erreur de 20 %. Le volume de sédiment se fait ensuite par extrapolation entre deux profils :

$$V = S \times L$$

V : volume de sédiments en mètres cubes.

S : section envasée en mètres carrés.

L : distance entre deux points de mesure en mètre.



**Photo I.1 : Estimation de l'envasement par la méthode de nivellement (Tachéomètre)
(Benahmed, 2015)**

1.8.2. Bathymétrie par sondeur «Echosondeur bathymétrique»

Le dernier appareil à mesurer la profondeur par échosondeur, une véritable révolution dans la mesure de l'eau profonde. Cette sonde de l'écho dont le type moderne a été inventée pour la première fois dans les années de la première guerre mondiale sur les sites français. Les mesures bathymétriques permettent de suivre l'évolution du volume des sédiments accumulés (Figure I.10).

À l'aide des nouvelles technologies de sondeurs, cette technique peut être utilisable dans une hauteur d'eau restreinte où elle s'applique à partir de sondeurs mono ou multi-faisceau.

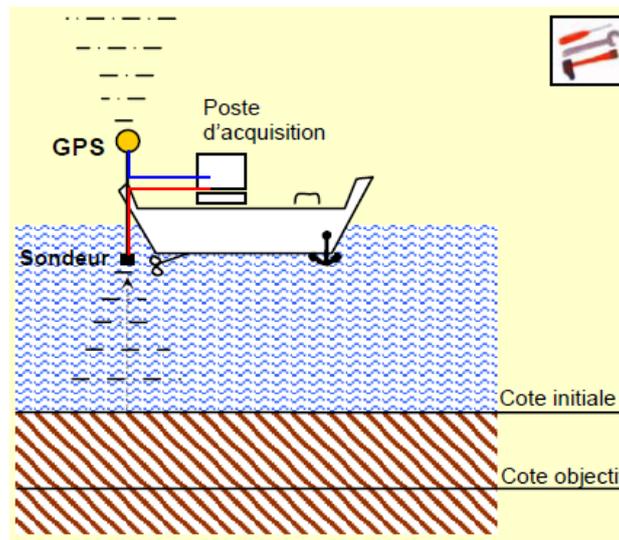


Figure I.10 : Schématisation de la bathymétrie par échosondeur (Proulhac et Lann, 2006)

Les moyens utilisés pour les levés Bathymétriques par échosondeurs sont :

- Une embarcation pneumatique semi-rigide.
- Une station de référence.
- Un sonar avec une fréquence de 200khz.

- Un GPS portable avec un récepteur GPS RTK 6502.
- Un PC portable avec le logiciel DTM 2000.
- Une barre d'étalonnage.

L'hydrographe étalonne l'échosondeur par la barre d'étalonnage à différentes profondeurs. Il valide ainsi la profondeur du transducteur et la vitesse de propagation des signaux ultrasonores dans l'eau du barrage. La distance entre profils est choisie en fonction du terrain par le logiciel de guidage DTM 2000. Le long d'un profil, les données sont émises en continu mais l'enregistrement se fait toutes les deux (2) secondes. La direction des profils, généralement perpendiculaire aux rives, est choisie par l'hydrographe qui calcule le cap et navigue à cap constant. Durant le levé, il arrive de constater des formes de fond particulières sur les profils (des hauts fonds ou des fosses). Dans ce cas on procède à un balayage plus serré. Après le traitement des données numériquement, l'hydrographe peut établir les plans bathymétriques.

I.9 Les moyens de lutte contre l'envasement

La lutte contre l'envasement des barrages en Algérie doit revêtir une dimension nationale tant les enjeux sont énormes. Tous les spécialistes s'accordent à dire que les pays du Maghreb, d'ici 2025, connaîtront des problèmes aigus d'eau. Autant, dès maintenant, penser à une stratégie globale de préservation de nos barrages contre ce grave problème d'envasement. Beaucoup d'efforts ont été déployés par les services de l'hydraulique dans la lutte contre l'envasement dont plusieurs solutions sont proposées :

I.9.1 La conservation des sols

Comme moyen de minimiser la pénétration de matériaux solides dans une retenue, deux méthodes de conservation des sols sont utilisées pour freiner l'érosion :

a. L'implantation de structures anti-érosion.

b. L'aménagement des bassins versants et des cours d'eau.

Il s'agit de l'aménagement des bassins versants par la réalisation de la correction torrentielle des thalwegs, et l'aménagement de cours d'eau : en créant des ouvrages de correction dans la gorge du torrent ; ouvrages qui arrêteront les matériaux et diminueront la pente, réduisant ainsi l'érosion à sa source.

I.10 Conclusion

La gestion des sédiments de dragage constitue aujourd'hui un enjeu majeur et une véritable problématique environnementale ; en raison des quantités remarquables produites et des effets nuisibles qui leur sont reprochés.

Ces sédiments sont généralement des matériaux fins riches en minéraux, où leur exploitation pourrait être une alternative à son utilisation dans divers domaines en Génie-Civil.

En général, les filières d'exploitation des sédiments dépendent de plusieurs critères indissociables, à savoir des critères économiques, techniques, environnementales et réglementaires qui conduisent à faire passer ce sédiment d'un simple déchet à éliminer en une ressource naturelle exploitable.

Chapitre II :
Problématique d'envasement des barrages

II.1 Introduction

Le phénomène d'envasement est présent dans tous les barrages du monde, mais à des vitesses différentes et diffère d'une région à l'autre. Ce phénomène est abondant dans les Etats Unis, en Russie, à Taiwan, en Chine, en Iran, au Soudan et au Maghreb. Dans cette région, l'infrastructure hydraulique est amputée annuellement de 2% à 5% de la capacité globale (Demmak, 1982).

Ainsi, ce phénomène d'envasement est considéré comme une grande problématique dans les pays du Maghreb, comme l'Algérie, le Maroc et la Tunisie où sur les 250 barrages du Maghreb d'une capacité totale de 23 milliards de m³, reçoivent annuellement une quantité de sédiments évaluée à 130 millions de m³ (Remini, 2003).

On abordera dans ce chapitre, une recherche bibliographique sur cette problématique d'envasement des barrages à l'échelle maghrébine et nationale.

II.2 Envasement des barrages dans le monde

Remini et al. 1997 ont donné une conception sur les pertes de capacité de quelques barrages dans le monde dues au phénomène d'envasement (Tableau II.1):

Tableau II.1 : Pertes de capacité dues à l'envasement dans certains pays du monde (Remini et Hallouche, 2004).

| Pays | Barrages | Capacité initiale 10 ⁶ m ³ | % Annuel de perte de capacité |
|------------|---|--|--|
| Algérie | K'sob – Cheurfas -Foum el Guerza - Ghrib | 1.6 ; 14.4 ; 47 ; 280 | 2.5 ; 2 ; 1.7 ; 1.1 |
| Autriche | Bachental, burg | 0.7 ; 0.24 | 3, 2.5 |
| Chine | Hesenglin, Sanmenxia | 8.6 ; 9.64 | 6.5 ; 5.5 |
| Espagne | Dona AL Donza, Pedro marin, Las torcas | 23 ; 19 ; 8.9 | 6.5 ; 5.9 ; 1.9 |
| France | Beauvoir, Escale (durancier) | 11 ; 15.7 | 3 ; 4.2 |
| Grèce | Lauros, Tungabhadra | 1 ; 3750 | 4.3 ; 1.4 |
| Inde | Nizamascar, Panchet Hill, Nickor | 1050 ; 1580 ; 43 | 1.4 ; 0.7 ; 6.3 |
| Maroc | Lalla takerkouste, Mohamed V, Ibn Battouta | 77 ; 725 ; 43.6 | 2 ; 2 ; 1 |
| Etats Unis | Laguanda(Colorado Arizona), Imperial (Colorado Arizona), Austin (Colorado Texas), Boysen (Big Horn river), Mc milan (n.Mexique), Zuni (Zuni river), Alhogordo (n.Mexique), Worth (West forth trinty) | 25 ; 104 ; 39.4 ; 22 ; 35 ; 19.5 ; 191 ; 58.2 | 100 ; 11.2 ; 7.35 ; 6.25 ; 6.1 ; 3.5 ; 2.3 ; 2.3 |

II.3 Envasement des barrages dans le MAGHREB

II.3.1 Envasement en TUNISIE

En Tunisie, l'eau revêt un caractère stratégique de développement économique et social en raison de sa rareté. Les retenues des barrages tunisiens perdent annuellement 0,5 % à 1 % de leur capacité par alluvionnement. Les moyennes annuelles des pertes de capacité de stockage des retenues des barrages tunisiens pourraient atteindre 530 Mm³, soit 37 % de la capacité initiale de toutes les retenues en exploitation. D'après (GE.O.R.E, 2001), en 2030, la perte de capacité de stockage des barrages en exploitation pourrait atteindre 43 % de leur capacité initiale. Les aménagements amont et les travaux de conservation des eaux et des sols permettent de réduire le taux d'envasement et de prolonger la durée de vie des grands réservoirs. D'après les résultats des différentes campagnes de mesures d'alluvionnement. Le Tableau II.2 donne un aperçu sur les caractéristiques d'envasement des barrages de Tunisie (Ben Mammou et Louati, 2007).

Tableau II.2 : Caractéristiques d'envasement des barrages en Tunisie (Ben Mammou et Louati, 2007).

| Barrages de Tunisie | Superficie du B.V (km ²) | Année de mise en service | Capacité initiale (Mm ³) | Année des campagnes de mesure de l'alluvionnement. | Evolution d'alluvionnement. (Mm ³) | Alluvionnement moyen. (Mm ³ /an) |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|--|--|
| El Kebi | 250 | 1925 | 22 | 1931, 1945, 1950, 1954, 1967, 1968, 1979, 1981, 1995 | 1,5 -2,8 -4,8 -6,5 -10,3 11,7 12,8 13,8 17,65 | 0,25 0,14 0,192 0,224 0,245 0,272 0,237 0,246 0,252 |
| Ben Metir | 103 | 1954 | 61,6 | 1986 | 4 | 0,12 |
| Mellegue | 10 300 | 1954 | 270 | 1975, 1980, 1991, 2000 | 54,5 90 142 179 | 2,59 3,46 3,8 3,89 |
| Bezirk | 75 | 1959 | 6,4 | 1975, 1993 | 1,7 2,3 | 0,017 0,06 |
| Chiba | 64 | 1963 | 8 | 1975, 1991, 1995 | 2,7 3,5 3,75 | 0,2 0,27 0,29 |
| Nebhana | 855 | 1965 | 86 | 1975, 1992, 2002 | 12,9 20 24,4 | 1,29 1 0,68 |
| Lakhmess | 127 | 1966 | 8.2 | 1975, 1991, 2000 | 22.3 3.2 | 0.22 0.048 0.094 |
| Kasseb | 101 | 1968 | 82 | 1986 | 2.8 | 0.15 |

| | | | | | | |
|----------------|------|------|--------|------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Masri | 40 | 1968 | 6.9 | 1975,1991 | 1.3 0.88 | 0.16 0.11 |
| B.M'cher ga | 1263 | 1971 | 53 | 1987,1994,,2002 | 6.2 7.1 11.4 | 0.29 0.37 0.35 |
| B.Heurtu ma | 390 | 1976 | 117.5 | 1993 | 2 | 0.13 |
| Sidi Saad | 8950 | 1981 | 209 | 1988,1993,2000 | 6.9 28.9 55.2 | 0.98 2.41 2.9 |
| Sidi Salam | 7950 | 1981 | 814 | 1987,1989,1991,19 98,2002 | 30.6 47 52 87.5 139 | 5.1 5.87 5.2 5.15 6.6 |
| Joumine | 418 | 1983 | 130 | 2000 | 10.8 | 0.675 |
| Ghezala | 48 | 1984 | 11.7 | 1993 | 0.2 | 0.022 |
| Lebna | 189 | 1986 | 30.1 | 1994,2002 | 0.54 6.22 | 0.068 0.37 |
| Siliana | 1040 | 1987 | 70 | 1994,2002 | 4.1 16.9 | 0.63 1.05 |
| El Houareb | 1120 | 1989 | 4395.3 | 1994,1998 | 8.18 13.3 | 1.48 1.33 |
| Sejnane | 367 | 1994 | 137.5 | 2002 | 2.7 | 0.5 |

II.3.2 Envasement au MAROC

Les infrastructures hydrauliques marocaines enregistrent une perte en volume avoisinant de 0.5% de la capacité totale de stockage qui est de 10 milliards de m³. L'envasement des barrages est estimé à 75 millions de m³/an et la perte en capacité des grands barrages dépasse maintenant les 820 millions de m³. À titre d'exemple, le barrage Mohamed V au Maroc, d'une capacité de 567 hm³ reçoit annuellement un volume de sédiments de 14,5 hm³, soit une perte annuelle de 2,5 % de sa capacité totale (Remini et al., 2009). Tous les barrages construits depuis plus de 20 ans sont envasés à plus de 10% de leur capacité initiale (Tableau II.3).

Tableau II.3 : La dégradation annuelle des bassins versants et l'envasement des barrages Marocains (Lahlou, 1988)

| Barrages du Maroc | Superficie du B.V (km ²) | Année de mise en service | Capacité Initiale (Mm ³) | Envasement Année (Mm ³ /an) 1987 | Dégradation Annuelle (t/km ² /an) 1987 |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---|---|
| M.B Abdelkrim Alkhatabi | 780 | 1981 | 43 | 2.70 | 5900 |
| Ibn Batouta | 178 | 1977 | 43.6 | 0.65 | 3933 |
| Nakhla | 107 | 1951 | 13 | 0.07 | 2500 |
| El Makhazine | 1820 | 1979 | 789 | 1.02 | 2700 |
| Moulay youssef | 1441 | 1970 | 198 | 0.59 | 1850 |
| Lalla Takerkoust | 1707 | 1935 | 34.4 | 0.50 | 350 |
| Idress Ier | 3680 | 1973 | 1217 | 2.15 | 3200 |

| | | | | | |
|-----------------------|-------|------|-------|------|-----|
| Ben elouidane | 6400 | 1953 | 1484 | 3.60 | 870 |
| Hassan addakhil | 4400 | 1971 | 369 | 1.0 | 260 |
| Mansour eddahbbi | 15000 | 1972 | 567 | 2.2 | 210 |
| AL massira | 2800 | 1979 | 2724 | 7.5 | 375 |
| ELkansra | 4540 | 1935 | 330 | 1.25 | 330 |
| Mohamed V | 49920 | 1967 | 725 | 10 | 210 |
| Youssef ben tachfine | 3784 | 1973 | 310 | 0.50 | 170 |
| Sidi Med ben abdellah | 9800 | 1971 | 493 | 0.51 | 200 |
| Abdelmoumen | 1300 | 1981 | 216.3 | 0.8 | 200 |

II.3.3 Envasement en ALGERIE

Le phénomène d'envasement des barrages en Algérie s'est accéléré à partir des années 2000. Les retombées sont directes et graves sur l'économie nationale et sur le développement de la société toute entière. Ce phénomène d'envasement touche l'ensemble des barrages algériens (Remini et Bensafia, 2016).

Le premier barrage construit en Algérie, en 1846, est le barrage de Sig. Il a été abandonné faute de son envasement rapide. En 1957, les barrages d'Algérie d'une capacité de 900 Mm³ avaient accumulé près de 200 mm³ (Remini et al., 2009).

En 1890, il existait en Algérie neuf barrages, d'une capacité de 61 mm³ et un volume de sédiments de 2,7 mm³. Cette capacité a atteint 1 milliard de m³ en 1962. À partir de cette date Le nombre de barrages a augmenté considérablement où les années 80 ont connu des taux d'envasement avoisinant les 20 millions de tonnes annuels alors que durant les années 90, ils ont atteint déjà les 35 millions de tonnes annuels. Les années 2000 ont augmenté et atteignent la valeur de 45 millions de tonnes annuels (Tableau II.4). Tous les spécialistes s'accordent à dire que les années à venir seront très dures pour les zones arides et semi-arides. Le taux d'érosion spécifique a été évalué à 180 millions de tonnes de sédiments arraches annuellement au niveau des bassins versants du Nord algérien (Figure II.1). En effet, la région enregistre les valeurs les plus élevées de la planète. Plusieurs exemples témoignent de la gravité du problème tel que celui du bassin versant de l'oued L'Agrioum (Est de l'Algérie) où le taux d'érosion spécifique a atteint la valeur de **5000** t/km²/an (Demmak, 1982).

Tableau II.4 : Quantification de l'envasement des barrages Algériens [A.N.B.T].

| Barrages | Superficie Du B.V (km ²) | Année de mise en service | Capacité Initiale (Mm ³) | Période de calcul | Envasement Moyen (mm ³ /an) | Capacité En 1986 (Mm ³) | Perte en Capacité % |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------|--|-------------------------------------|---------------------|
| Boughzoul | 19740 | 1934 | 55 | 1934/1986 | 0.570 | 20.38 | 62.94 |
| Ghrib | 23300 | 1939 | 280 | 1939/1986 | 2.49 | 138.57 | 50.51 |
| Oued Fodda | 790 | 1932 | 228 | 1932/1986 | 2.246 | 132.3 | 41.97 |
| Bakhadda | 1275 | 1936 | 56 | 1963/1986/2005 | 0.273 | 45.44 | 28.67 |
| SMBA | 6100 | 1978 | 235 | 1978/1985 | 1.17 | 227.4 | 3.23 |
| Hamiz | 137 | 1879 | 21 | 1935/1986 | 0.155 | 8.49 | 59.57 |
| Eghil Emda | 650 | 1953 | 154 | 1954/1974 | 1.832 | 120 | 22.07 |
| Zardaras | 346 | 1936 | 31 | 1977/1986 | 0.450 | 14.78 | 52.32 |
| Lacheffia | 575 | 1965 | 171 | 1965/1986 | 0.124 | 168.4 | 1.52 |
| K'sob | 1470 | 1977 | 31 | 1977/1986 | 0.395 | 12.42 | 59.90 |
| Foum El Gheraz | 1300 | 1950 | 47 | 1950/1986 | 0.590 | 25.76 | 45.19 |
| Foum El Gheiss | 153 | 1939 | 3 | 1939/1986 | 0.030 | 1.6 | 46.66 |
| Cheurfas | 4015 | | 14 | 1882/1967 | 0.061 | 9 | 35.71 |
| Bouhnifia | 7850 | 1948 | 73 | 1944/1967 | 0.913 | 52 | 28.76 |
| B.Amrane | 3710 | 1988 | 16 | 1988 | 0.89 | 7.1 (1998) | 5.5 |
| FergougIII | 8274 | 1970 | 18 | 1970/1986 | 0.881 | 3.9 | 78.33 |
| | 22000 | 1934 | 360 | 1967/1986 | 2.290 | 316.40 | 12.11 |
| Beni Bahdel | 990 | 1940 | 63 | 1944/1986 | 0.107 | 56.4 | 10.47 |
| Maffrouche | 85 | 1936 | 15 | 1940/1986 | 0.017 | 14.60 | 2.66 |

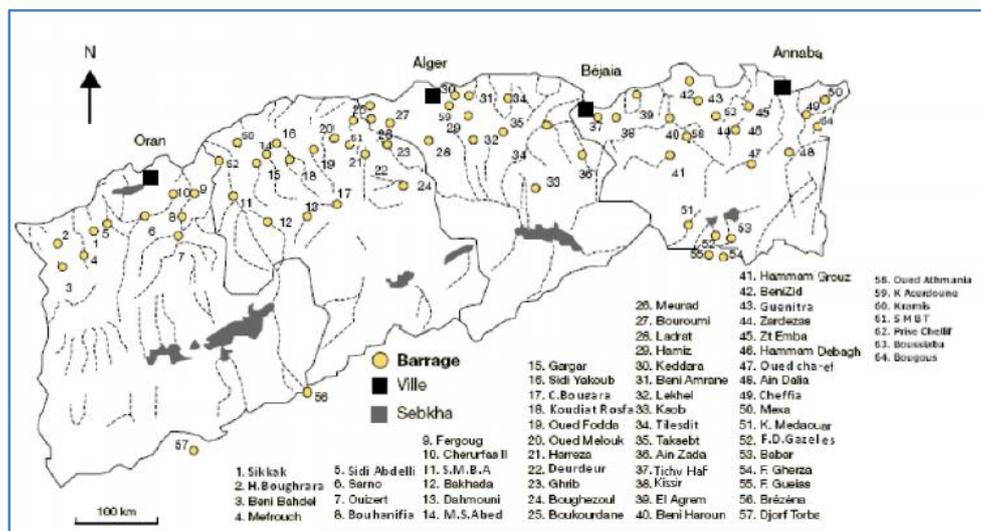


Figure II.1 : Carte d'envasement des barrages en Algérie (Remini et al., 2009)

II.4 Conséquences du phénomène d'envasement

La réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement des barrages: chaque année, le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue. La quantité de sédiments déposés dans les barrages Algériens (Tableau II.5) était évaluée à 560.10^6 m^3 en 1995 soit un taux de comblement de 12,5 %; elle sera de 650.10^6 m^3 en l'an 2000, soit un taux de comblement de 14,5 %. À titre d'exemple, la capacité initiale du barrage de Ghrib (Médéa) était de 280.10^6 m^3 en 1939 et n'était plus que de 109.10^6 m^3 en 1977. Une projection a été faite pour l'an 2010, d'où il ressort que certains barrages comme par exemple ceux du Fergoug et de Zardézas finiront par périr si ces dispositions radicales ne sont pas prises.

Tableau II.5 : Taux d'envasement des barrages en Algérie (Remini et Bensafia, 2016)

| Région | Nombre de Barrages | Capacité initiale (Hm ³) | Date du dernier levé Bathymétrique | Capacité du dernier levé (Hm ³) | Envasement Moyen annuel (Hm ³) | Envasement du dernier levé (Hm ³) | Taux d'envasement (%) |
|--------|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|--|---|-----------------------|
| Ouest | 13 | 1204.88 | 2004 | 1015.4 | 9.14 | 189.72 | 15.75 |
| Centre | 12 | 1576.50 | 2005 | 1549.03 | 3.57 | 27.49 | 1.74 |
| Est | 23 | 2754.00 | 2004 | 2586.40 | 11.38 | 167.60 | 5.31 |
| Total | 48 | 5537.38 | | 5150.83 | 24.27 | 384.81 | 22.80 |

II.5 Moyens de lutte contre l'envasement en Algérie

La majorité des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année. Il est rare cependant, que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abondance d'un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'adduction en eau potable ou l'irrigation dont les intérêts socio-économiques 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 présent en Algérie. Parmi les moyens de lutte contre ce phénomène, on cite :

- Le reboisement, la restauration des sols, la formation des banquettes et la plantation de végétation à longues tiges dans les Oueds ;
- La réalisation de barrage de décantation ;

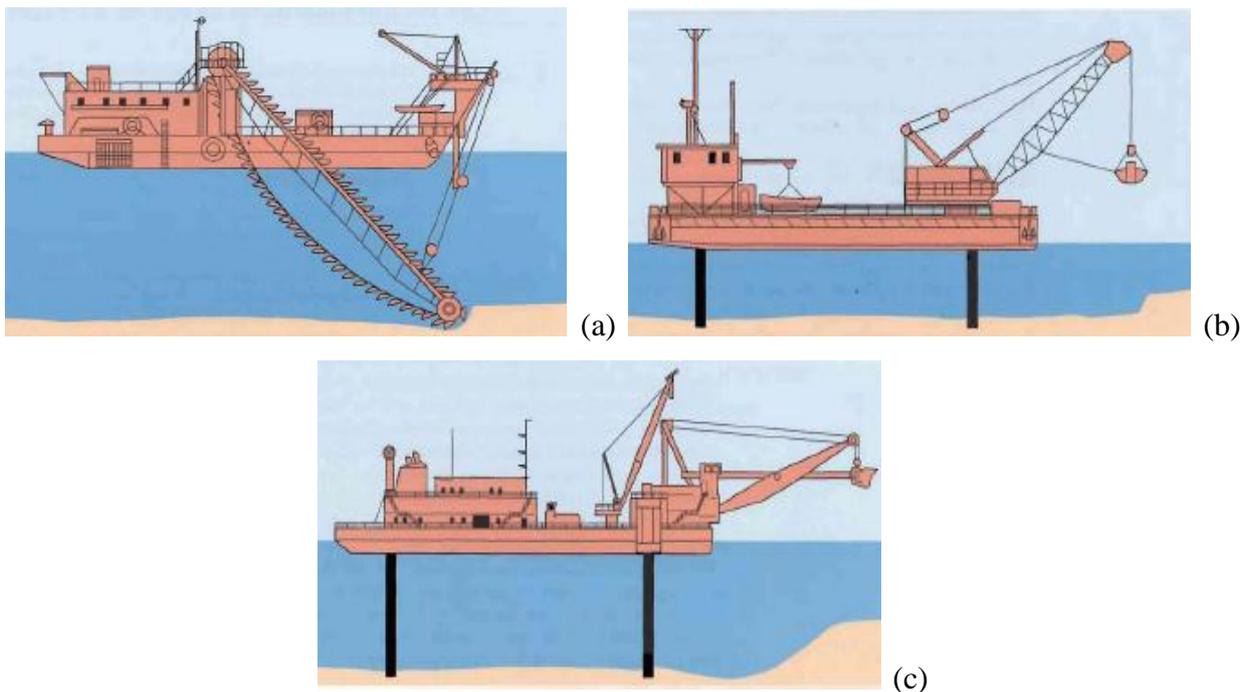
- La surélévation des barrages ;
- Les chasses dites à l'Espagnole ;
- Le soutirage des courants de densité ;
- La reprise du barrage ;
- Le dragage des barrages.

II.6 Les techniques de dragage disponibles

Différentes techniques de dragage ont été développées où il est courant de classer les équipements de dragage selon leur principe général de fonctionnement. Trois catégories peuvent être recensées :

II.6.1 Les dragages mécaniques

Ils s'effectuent grâce à des engins à godet qui opèrent soit depuis les berges (pelle mécanique), soit depuis la surface (pelle sur ponton, drague à godets, etc.). L'extraction de sédiments pollués se fait actuellement majoritairement par cette méthode (Figure II.2).



II.6.2 Les dragages hydrauliques

Cette technique est réalisée par des dragues d'exagératrices et aspiratrices (Figure II.3). Les matériaux sont désagrégés par jets d'eau sous pression ou par rotation d'un outil et mis en

suspension pour être aspirés et évacués par des pompes vers les points de stockage. La technique aspiratrice utilise des pompes centrifuges, aspirant à travers un tube d'élinde, muni d'un embout, appelé bec d'élinde, un mélange eau sédiments.

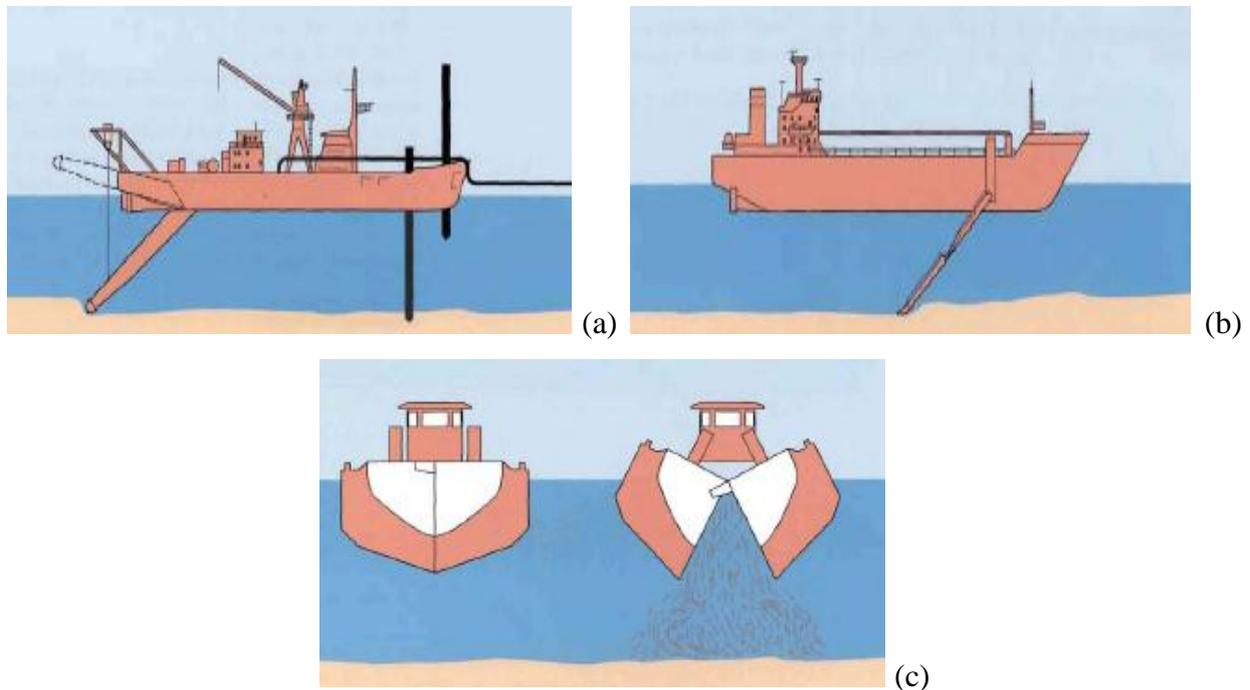


Figure II.3 : Dragages hydrauliques : a) aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement; b) aspiratrice en marche; c) dragues fendables (D'après Kenneth et Hardy, 1980) (ALZIEU, 1999).

Ces dragages hydrauliques aspirent et refoulent donc les sédiments sous forme de boues liquides dont la teneur en eau varie autour de 85 %. Vis-à-vis des volumes extraits, l'une des principales différences entre les dragages mécaniques et hydrauliques est constituée par les volumes extraits et les dilutions des sédiments en place. Dans les faits, alors que les engins mécaniques ne remanient que faiblement le sédiment (foisonnement 10 %), les dragages par aspiration impliquent une dilution par 3 à 10 volumes d'eau pour un volume de sédiment en place. Schématiquement, les proportions draguées se présentent sous la forme suivante (Figure II.4).

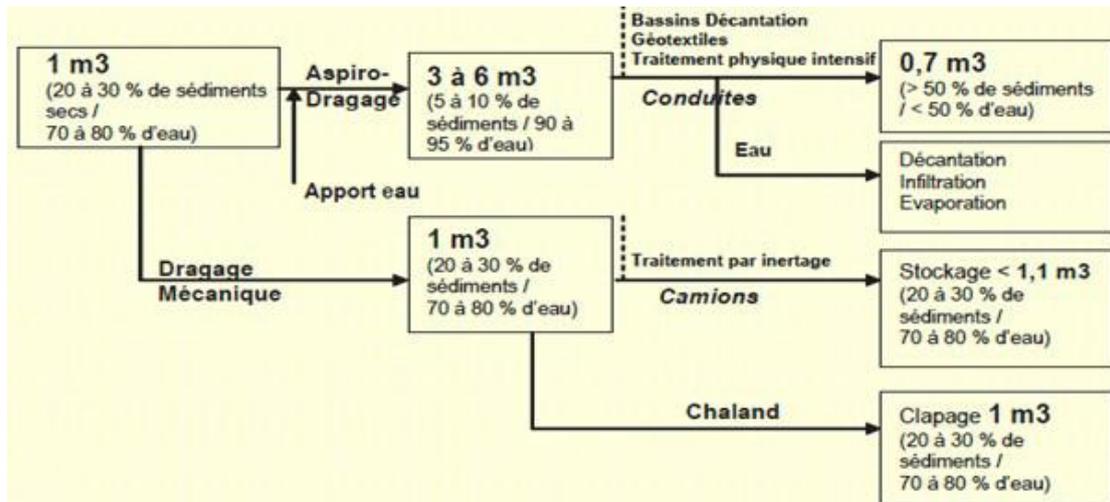


Figure II.4 : Proportions draguées par les dragues hydrauliques (Boutin, 2000)

II.6.3 Les dragages par agitation (dit « à l'américaine »)

C'est une technique particulière qui consiste à provoquer la remise en suspension des sédiments au moyen d'une hélice ou d'air comprimé dans les cours d'eau ou chenaux à fort courant (Figure II.5). Les sédiments sont repris dans le flux et se redéposent le plus souvent en aval. Dans certains cas, une conduite de refoulement peut assurer le transfert des sédiments à plusieurs kilomètres du lieu de dragage. Le dragage à l'américaine consiste à rejeter en continu dans la veine d'eau les matériaux dragués afin d'utiliser le courant naturel pour évacuer les produits. Elle se pratique pour des fleuves et rivières à fort débit.



Photo II.5 : Dragage à l'américaine

II.7 Conclusion

Le phénomène d'envasement touche tous les pays du monde notamment les pays du Maghreb ; mais plus particulièrement l'Algérie et qui s'est accéléré à partir des années 2000.

L'envasement des barrages marocains pourrait dépasser les 150 millions de m³ pour l'année 2030. Quant aux barrages tunisiens, ils peuvent perdre 43% de leurs capacités de stockage en 2030.

Cette sédimentation des barrages dans les pays de l'Afrique du nord est donc très élevée et même spectaculaire, qui est attribué aux forts taux d'érosion des bassins versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eau et qui s'accumuleront et produiront à l'entrée des retenues des courants de densité. Les conséquences de ce phénomène sont extrêmement gênantes.

Ainsi, l'étude de ce phénomène d'envasement et sa prédiction pour prendre les précautions nécessaires pour le réduire ont des effets importants sur la stabilité de l'ouvrage.

Chapitre III :
Caractérisation Géotechnique des
sédiments de Beni Bahdel

III.1 Introduction

Dans toute démarche de valorisation d'un matériau, l'étape de caractérisation physico-chimique est indispensable. Elle permet d'une part, une bonne connaissance des propriétés physico-chimiques des sédiments d'étude et d'autre part, évaluer l'intérêt du traitement adopté sur ce sédiment ainsi que le type de traitement à adopter.

On abordera dans ce chapitre une première étape qui consiste en une présentation globale du site du barrage de Beni Bahdel se rapportant à notre étude où une description géologique et géomorphologique est ainsi présentée. Cette étape est suivie par une description et analyse des différents essais physico-chimique et mécanique permettant de caractériser le sédiment prélevé. Cette caractérisation qui nous permettra de classer après notre sédiment d'étude.

III.2 Présentation du site d'étude

Le barrage de Beni Bahdel est un barrage à voûtes cylindriques multiples et contreforts (Photo III.1), construit en 1934 sur l'Oued Tafna pour un volume de retenue de 63 millions de m³ fut mis en eau en 1944. Le barrage avait été conçu, à l'origine, pour assurer l'extension des irrigations de la plaine de Maghnia, située à 25 km au NW de l'ouvrage, sur la rive gauche de la Tafna, mais comme il était impossible de résoudre le problème de l'alimentation en eau de la région Oranaise avec la seule source de Raz-el-Aïn et de la nappe de Brédéah-Misserghin, il a été alors décidé d'assurer cette alimentation à partir de ce barrage, lequel serait porté de 47 à 54 m de hauteur.



Photo III.1 : Barrage de Beni Bahdel (wilaya de Tlemcen)

D'une longueur de 350 m, à une hauteur de 54 m, ce barrage se compose de trois tronçons :

- Rive droite : se raccordant à la montagne, un barrage à poids de 50 m.
- Au milieu: un barrage de 220 m, constitué de onze voûtes à convexité vers l'amont et inclinées à 45° en avancée vers l'aval. Leur faible épaisseur en section droite est de: 0,70 m au sommet et 1,20 m à la base.
- Rive gauche: se raccordant à la butte, un second barrage à poids de 80 m de longueur.

Les voûtes du barrage central sont renforcées par des contreforts, des entretoises, des butoirs, des butées et autres vérins. Il est à remarquer toutefois des câbles d'ancrage, ou tirants en acier, scellés au parement amont et qui, mis sous tension, tirent sur les têtes des contreforts avec une force de 1000 t vers l'amont, réalisant ainsi la précontrainte du béton

III.2.1 Localisation du barrage

Le barrage de Beni Bahdel est situé sur le bassin versant de l'Oued Tafna (Photo III.2) où l'emplacement choisi confluent de l'Oued Tafna et de l'Oued Khemis, a permis de former une cuvette de dimensions acceptables moyennant la construction de deux digues latérales complétant le barrage de la vallée de la Tafna à 28 Km au sud-ouest de Tlemcen.

Il est destiné à :

- L'alimentation en eau potable d'Oran, AinTemouchent et Tlemcen,
- L'irrigation de la plaine de Maghnia.

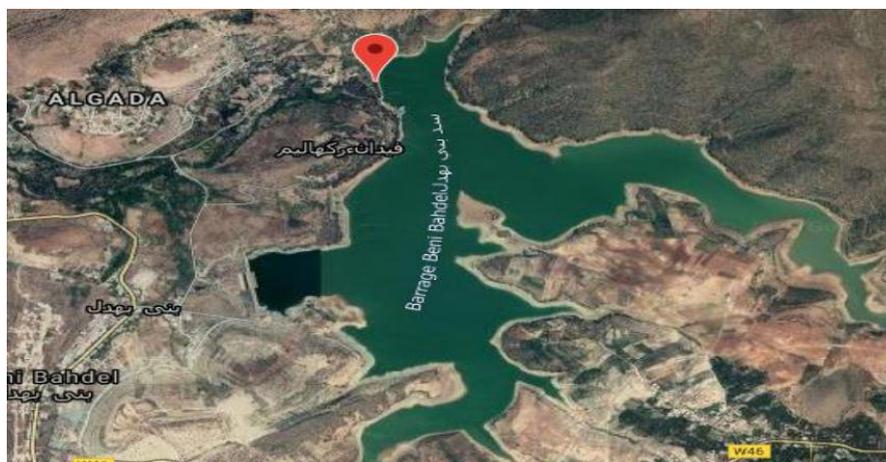


Photo III.2 : Localisation du bassin versant de l'Oued Tafna

III.2.2 Historique du Barrage

Le Barrage de Beni Bahdel a été construit sur le territoire de la commune de Beni Snous, entre 1935 et 1940 par l'entreprise Campenon Bernard durant la colonisation française en Algérie [2] :

- Le premier Garde Barragiste sous la gouvernance Française : M. PRADOS (1945-1963)
- Le premier Chef d'exploitation sous la Responsabilité Algérien indépendance : Bouchenafa Mohammed Ould Moh al Arbi (dit Si Mohamed chef du Barrage). Ce barrage, situé à 30 km au sud-ouest de Tlemcen, est choisi en raison du débit régulier et assez abondant de la Tafna qui l'alimente et qui reçoit à cet endroit son affluent l'Oued Khémis.

Commencé en 1934, le barrage semblait fini en 1938-1939, avec une hauteur de 47 m; le projet initial réservait l'eau à l'irrigation des 5000 ha de cultures de la plaine de Maghnia exclusivement. Sa nouvelle destination impliquait sa surélévation de 7 m, pour atteindre 54 m, et cela en conservant ses anciennes voûtes et surtout ses anciens contreforts (Photo III.3). On n'y parvient que par une élégante innovation technique: la précontrainte du béton qui se définit en gros par une forte traction sur l'armature avant la prise du ciment.



Photo III.3 : Travaux de surélévation du barrage de Beni Bahdel [3]

Le tracé du barrage a été défini suite à des études topographiques guidées par les considérations suivantes (Photo III.4): Utilisation des cols les moins élevés de la chaîne du Tessalah à franchir par souterrains ; points hauts pour l'installation des brise-charge ; éviter les points trop bas (valeurs excessives de la pression statique) ; traversée de terrains de bonne tenue ; réduction du nombre des ouvrages d'art; réduction de la longueur totale de la conduite.

À partir du brise-charge n°8 d'Aïn-Beïda, la conduite se subdivise en trois conduites secondaires de 0,70 m de diamètre pour alimenter les réservoirs de la ville à partir desquels sont faits les raccordements avec les anciennes canalisations de Brédéah.



Photo III.4. Vue du tracé topographique du site du barrage de Beni Bahdel

Ainsi, en marge du barrage lui-même, les ouvrages essentiels consistent en :

- Un souterrain de 11,400 km à écoulement libre.
- Un bassin de compensation à écoulement de 80000 m³.
- Une station de filtration pour traiter 110000 m³/jour.
- Une conduite en charge de 170 km et de 1,10 m de diamètre.
- Des ouvrages d'art (brise-charges, passerelles de franchissement de thalwegs, souterrains) pour vaincre les difficultés topographiques.
- Des usines électriques le long du tracé, destinées à turbiner aux meilleurs emplacements les débits transportés. En 1940, le débit à dériver est fixé à 82 000 m³ par jour.
- Des ouvrages communs aux irrigations de Maghnia et à l'alimentation d'Oran.

III.3 Prélèvement d'échantillons du site

Des prélèvements d'échantillons de sédiments ont été effectués des deux sites du barrage à l'aide de la pelle manuelle (Photo III.5). Ces prélèvements ont été effectués le 10 février 2020 sur les côtés aval et l'amont de la retenue du barrage de Beni Bahdel où les échantillons de sédiments prélevés ont été conditionnés en sachets plastique.



Côté Aval



Côté Amont

Photo III.5 : Prélèvement des échantillons de sédiments sur les côtés amont et aval de la retenue.

III.4 Caractérisation physico-chimique des sédiments

La caractérisation physico-chimique des sédiments prélevés constitue la première partie de l'étude expérimentale qui permet d'évaluer les propriétés physico-chimique et mécanique afin de bien analyser le comportement mécanique de ces sédiments.

C'est ainsi, qu'une campagne d'essais physico-chimique a été effectuée en vue de bien caractériser et classifier notre sédiment d'étude. Les normes techniques et réglementaires utilisées pour réaliser ces essais sont les suivantes :

- ✓ Norme NFP 94-050 : Détermination de la teneur en eau pondérale
- ✓ Norme XPP 94-047 : Détermination de la teneur en matières organiques (MO)
- ✓ Norme XPP 94-041 : Analyse granulométrique par tamisage
- ✓ Norme NFP 94-057 : Analyse granulométrique par sédimentométrie
- ✓ Norme NFP 94-051 : Détermination des limites d'Atterberg
- ✓ Norme NFP 94-068 : Détermination de la valeur au bleu de méthylène (VBS)
- ✓ Norme NFP 94-093 : Détermination des paramètres de compactage (Essai Proctor Normal)

III.4.1 Teneur en eau naturelle (wn)

La teneur en eau définit l'état hydrique d'un sol. Elle est le rapport du poids de l'eau au poids de la matière sèche.

Selon la norme NFP 94-050, l'échantillon de sol est pesé, puis placé dans une étuve ; une fois la dessiccation terminée, l'échantillon est à nouveau pesé.

Le tableau III.1 représente les résultats de la teneur en eau naturelle obtenue pour les sédiments (amont et aval) du barrage de Beni Bahdel.

Tableau III.1: Teneur en eau naturelle des sédiments de Beni Bahdel

| Sédiment de Beni Bahdel | Côté Amont | Côté Aval |
|-------------------------|------------|-----------|
| Teneur en eau (w(%)) | 21 | 33.33 |

III.4.2 Teneur en matières organiques (MO)

La présence des matières organiques influe énormément sur les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer cette proportion en matières organiques dans le sol. La mesure de cette teneur en MO peut s'effectuer selon le procédé de calcination suivant :

Il consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement séché, après calcination dans un four à une température comprise entre 450°C et 500 °C (Photo III.6). La teneur en MO selon la norme XPP 94-047 est par définition le rapport de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon détruit par calcination sur la masse sèche des particules solides avant la calcination de la fraction du matériau passant au tamis de 2mm.



Photo III.6: Détermination de la teneur en matières organiques (MO) du sédiment de Beni Bahdel par la méthode de calcination

La teneur en matières organiques obtenue pour le sédiment étudié est de 7,4% du côté aval et de 3,3% pour le côté amont. Ce qui indique que le sédiment étudié présente un taux élevé de matières organiques (MO) du côté aval que celui de l'amont.

Selon la classification du guide technique routier GTR et la norme NFP 11-300, on pourra assigner que le sédiment de Beni Bahdel est un matériau organique de classe **F11** (Figure III.1).

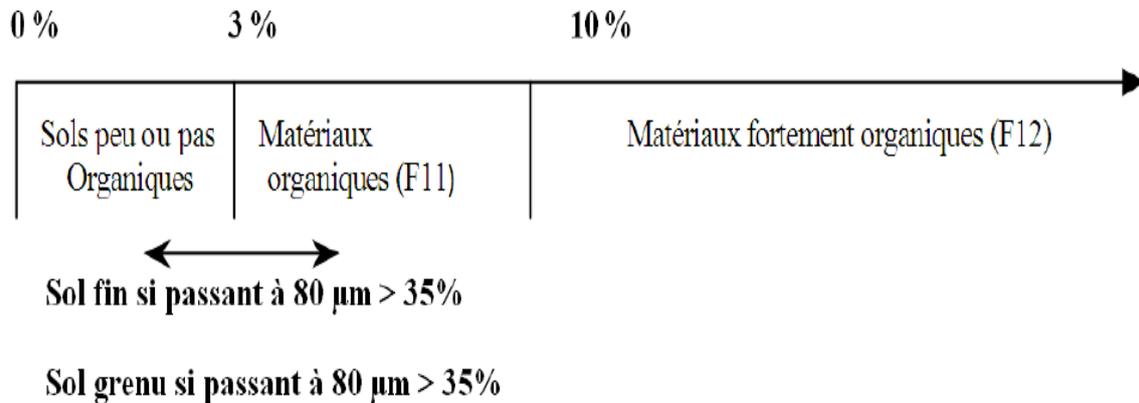


Figure III.1 : Classification GTR d'un sol selon sa teneur en matières organiques (MO)

III.4.3 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains dans un sol qui servira par la suite à sa classification. Les analyses granulométriques effectuées dans cette étude ont été réalisées par tamisage à voie humide et par sédimentométrie.

- Granulométrie par tamisage à voie humide

L'analyse granulométrique par voie humide (Photo III.7a) est effectuée selon la norme XPP 94-041. L'opération consiste à laisser détremper l'échantillon de sédiment pendant un certain temps (24h) dans un bac d'eau pour désagréger les mottes et les agglomérats de terre, ensuite effectuer un tamisage par voie humide en faisant passer l'échantillon à travers une série de tamis standards classés par ordre décroissant. Le poids du sol séché retenu dans chaque tamis est déterminé ainsi que le pourcentage cumulé des passants.

- Granulométrie par sédimentométrie

La sédimentométrie permet de déterminer les proportions relatives en poids des diverses fractions d'un sol dont les dimensions sont inférieures à 0.08 mm (80 µm).

Elle consiste à disperser une suspension formée par les particules du sol et analyser par la suite leurs décantations en fonction du temps. Un défloculent est ajouté en cours d'essai afin d'éviter la floculation des particules. L'opération consiste à mesurer la densité de la

suspension à l'aide d'un appareil gradué nommé densimètre, en fonction du temps (Photo III.7b).

Par utilisation du principe de la loi de Stokes qui relie la gravité d'une particule sphérique à la vitesse de chute de celle-ci dans un liquide ; on pourra déterminer la vitesse de décantation de la particule dans le liquide visqueux en fonction du diamètre de cette particule.

Il faut noter que la sédimentométrie ne donne que des diamètres équivalents puisque la loi de Stokes n'est valable que pour des particules de forme sphérique. Ainsi, avec des lectures au densimètre prises à des intervalles de temps variés, le pourcentage des particules fines peut être calculé ainsi que leurs distributions granulométriques correspondantes.



a. Essai de tamisage par voie humide



b. Essai de sédimentométrie

Photo III.7 : Analyse granulométrique des sédiments de Beni Bahdel

La courbe granulométrique obtenue de cette analyse nous renseigne aussi sur l'état de granularité et de continuité de celle-ci. Ceci s'obtient par la détermination des deux coefficients suivants :

1. Le coefficient d'uniformité (C_u) :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

- Si $C_u < 2$: Le sol présente une granulométrie uniforme (serrée)
- Si $C_u > 2$: Le sol présente une granulométrie étalée (variée)

2. Le coefficient de courbure (C_c) :

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} d_{60}}$$

- Si C_c est compris entre 1 et 3, la granulométrie du sol est bien graduée

Ainsi l'analyse granulométrique obtenue pour les sédiments prélevés des côtés amont et aval de la retenue de Beni Bahdel sont représentés sur la figure III.2 et le tableau III.2.

Le calcul des coefficients d'uniformité et de courbure permet d'apprécier qualitativement la forme de la courbe granulométrique qui nous indique que notre sédiment présente une granulométrie variée et mal graduée.

III.4.4 Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les teneurs en eau de référence correspondantes à des états particuliers du sol.

Lorsque la teneur en eau augmente, le sol passe graduellement d'un état solide à un état plastique, puis à un état liquide, ce qui influence son comportement mécanique (Figure III.3).

L'agronome suédois Atterberg a proposé cinq stades de ces limites, à savoir la limite de cohésion, de collage, de retrait, de plasticité et de liquidité. Dans cet essai nous allons ressortir les limites de liquidité et de plasticité ; déterminées selon la norme NFP 94-051. Ces deux paramètres nous aideront dans la classification du sol.

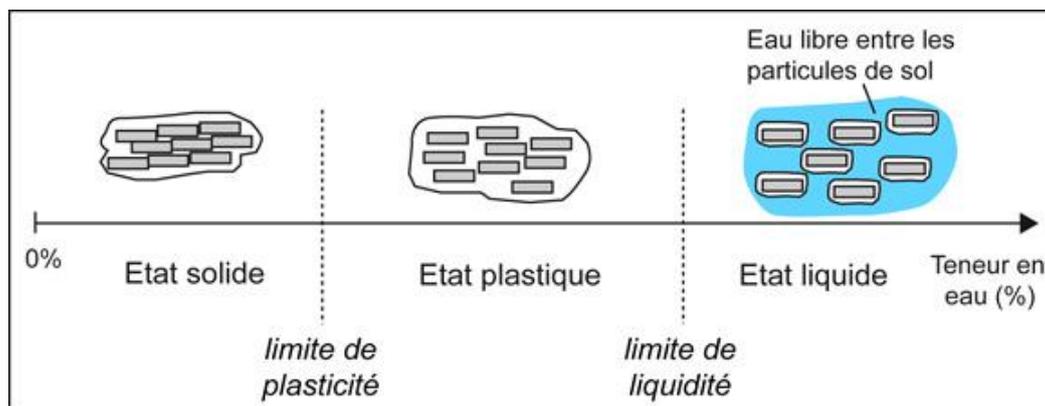


Figure III.3 : Variation d'états de consistance d'un sol fin.

- **La limite de liquidité (w_L)** : c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et liquide.
- **La limite de plasticité (w_P)** : c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état solide et plastique.
- L'intervalle de teneur en eau à laquelle le sol est dit en état plastique est défini comme étant l'indice de plasticité (**I_p**) : $I_p = w_L - w_P$

Cet indice est d'une grande utilité pour la classification des sédiments selon l'abaque de plasticité de Casagrande.

1. Détermination de la limite de liquidité (w_L) :

La limite de liquidité est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande selon la norme Française (NF P 94-051). Elle se détermine sur la frange de sol passant à travers le tamis de 0,4 mm.

L'essai consiste à déterminer la relation entre la teneur en eau et le nombre de chocs imposés à une coupelle contenant le matériau, induisant la fermeture, sur 1cm, d'une rainure formée dans ce matériau. Par définition la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture des lèvres de la rainure sur un centimètre au bout de 25 chocs (Photo III.8).



Photo III.8 : Appareil de Casagrande pour déterminer la limite de liquidité

2. Détermination de la limite de plasticité (w_p) :

La limite de plasticité est mesurée par la méthode au rouleau selon la norme française NF P 94-051. Elle se détermine en confectionnant des rouleaux de la pâte du sol tamisé initialement au tamis de 0,4 mm.

Cette limite de plasticité est définie comme étant la teneur en eau du rouleau qui se fissure et se casse en morceaux au moment où il atteint 3mm de diamètre et 100 mm de longueur (Photo III.9).



Photo III.9 : Les étapes d'exécution de l'essai de la limite de plasticité.

Les résultats obtenus des essais aux limites d'Atterberg sur le sédiment du barrage de Beni Bahdel sont représentés sur la figure III.4 ainsi que le tableau III.3.

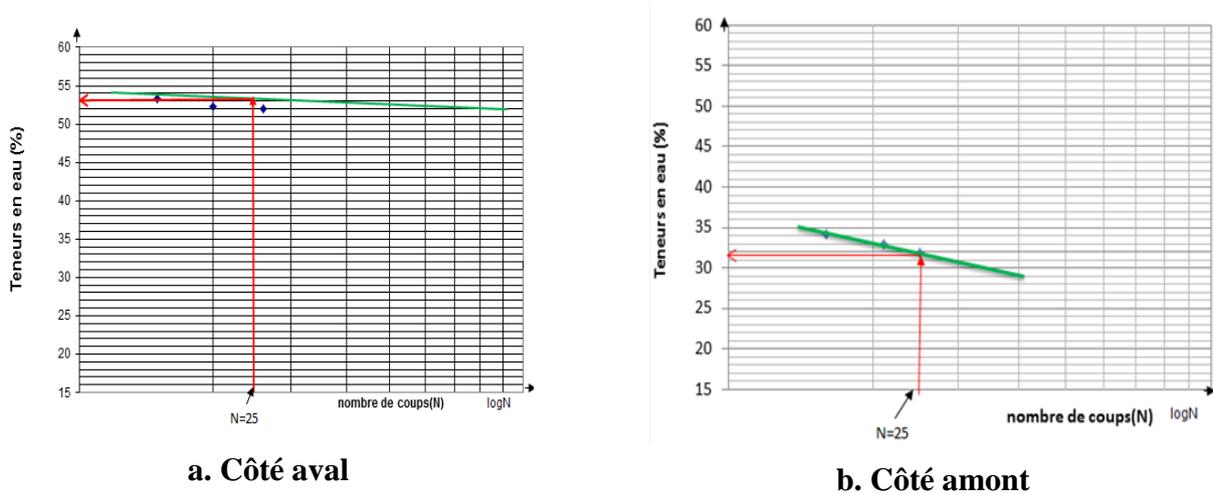


Figure III.4 : Détermination de la limite de liquidité (w_L) pour le sédiment du barrage de Beni bahdel

Tableau III.3 : Récapitulatif des résultats des limites d'Atterberg pour le sédiment de Beni Bahdel

| Sédiment de Beni bahdel | Limite de liquidité (w_L) (%) | Limite de plasticité (w_P) (%) | Indice de plasticité (I_p) (%) |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Côté aval | 52 | 28 | 24 |
| Côté amont | 32 | 18 | 14 |

L'analyse des résultats obtenus de ces essais aux limites d'Atterberg sur le sédiment du barrage de Beni Bahdel indique que ce sédiment présente un taux de plasticité élevé du côté aval que celui de l'amont. Ceci est en accord avec la teneur en matières organiques (MO) qui est relativement élevée en côté aval que celui du côté amont.

En effet, les sédiments ont par la présence de complexes argilo-humiques ou limono-humiques, un potentiel de rétention en eau important. Les matières organiques jouent un grand rôle dans le comportement des sédiments à la fois physique et mécanique (Bourabah, 2012). Elles donnent au matériau une plus grande plasticité qu'un matériau inorganique de même constitution granulaire, et apparaissent plus influentes (Dubois, 2006).

C'est pour cela, qu'il est nécessaire dans l'étude des sédiments de pouvoir évaluer la proportion en matières organiques, afin de pouvoir analyser plus convenablement le comportement mécanique ainsi que les caractéristiques physico-chimiques du matériau.

Par utilisation du diagramme de plasticité de Casagrande (Figure III.5), on pourra classifier le sédiment de Beni Bahdel dans la catégorie des sols argileux très plastique (**At**) pour le côté aval et en catégorie des sols argileux peu plastiques (**Ap**) pour le côté amont.

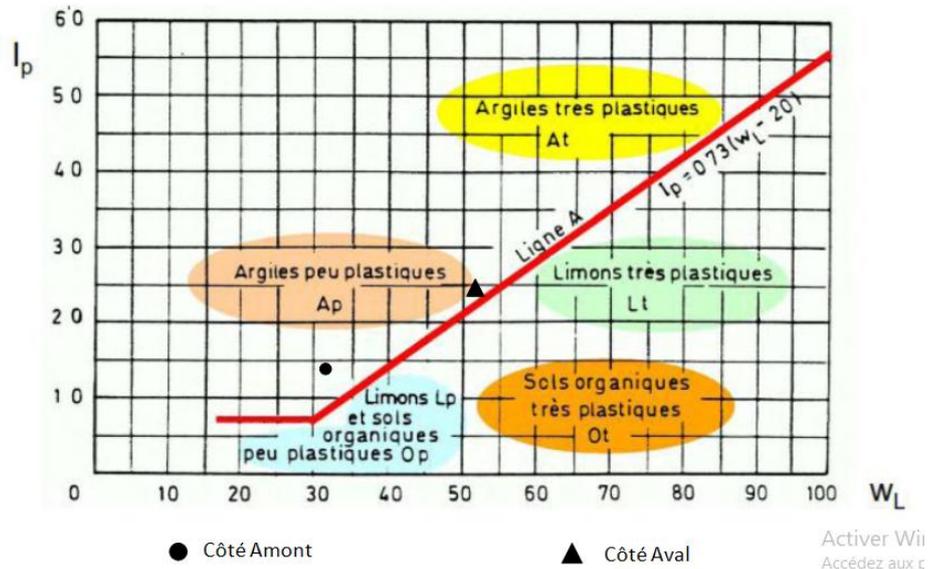


Figure III.5 : Classification du sédiment de Beni Bahdel par utilisation du diagramme de plasticité de Casagrande

D'autre part, par utilisation du tableau III.4, donnant une classification primaire sur le potentiel de gonflement d'un sol, on peut confirmer avec la classification du diagramme de plasticité de Casagrande que le sédiment de Beni Bahdel présente un potentiel de gonflement moyen à élevé du côté aval et faible du côté amont.

Tableau III.4 : Potentiel de gonflement d'après Snethen (1980)

| Indice de plasticité (Ip) | Potentiel de gonflement |
|---------------------------|-------------------------|
| > 35 | Très élevé |
| 22 - 48 | Elevé |
| 22 - 32 | Moyen |
| < 18 | Faible |

III.4.5 Essai au bleu de méthylène (VBS)

L'essai au bleu de méthylène dit aussi essai de la tâche est effectué selon la norme NFP 94-068. Cet essai permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des particules argileuses.

Pour ce faire, on fixe sur les particules d'argile des molécules de bleu de méthylène et par test simple, on évalue la quantité de bleu fixe. On en déduit la valeur au bleu du sol, ou VBS, qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols. La photo III.10 montre les différentes étapes de l'essai au bleu de méthylène.



Photo III.10 : Essai au bleu de méthylène sur le sédiment de Beni Bahdel

On prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé de bleu, et on la dépose sur du papier filtre (Photo III.11) :

- Si la goutte centrale est entourée d'une zone humide incolore : **le test est négatif.**
- Si la goutte est entourée d'une zone humide colorée en bleu : **le test est positif.**



Photo III.11: Vérifications effectuées lors de l'essai au bleu de méthylène

La valeur au bleu de méthylène (VBS) et la surface spécifique totale (SST) déterminées pour le sédiment de Beni Bahdel sont représentées sur le tableau III.5.

Tableau III.5 : Valeurs des paramètres VBS et SST pour le sédiment de Beni Bahdel

| Sédiment de Beni Bahdel | VBS | SST = 21 VBS |
|-------------------------|------|--------------|
| Côté Aval | 2,44 | 51,24 |
| Côté Amont | 2,67 | 56,07 |

Selon la classification de Philipponat (Tableau III.6), la valeur du VBS obtenue pour le sédiment de Beni Bahdel du côté aval est de 2,44, qui correspondent à celle d'un sol limoneux ; et pour le côté amont on a une valeur du VBS de 2,67, qui correspondent à celle d'un sol limoneux argileux. Cette classification est en conformité avec celle obtenue de l'analyse granulométrique.

Tableau III.6 : Classification des sols d'après la valeur au bleu (VBS)

| La valeur au bleu (VBS) | Type de sol |
|-------------------------|------------------------|
| $VBS < 0,2$ | Sols sableux |
| $0,2 < VBS < 2,5$ | Sols limoneux |
| $2,5 < VBS < 6$ | Sols limoneux argileux |
| $6 < VBS < 8$ | Sols argileux |
| $VBS > 8$ | Sols très argileux |

III.4.6 Essai de compactage (Proctor Normal)

L'aptitude au compactage des sédiments est étudiée à partir de l'essai Proctor Normal selon la norme NFP 94-093. L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame et selon un processus bien défini, une série d'échantillons identiques et représentatifs des sédiments, mélangés à des teneurs en eau croissantes (Photo III.12).

L'essai fournit alors une série de couples de points (w, γ_d) que l'on porte sur un graphique orthogonal $\gamma_d = f(w)$. Les paramètres du compactage sont déterminés à partir du maximum de la courbe de compactage ($\gamma_d = f(w)$). Ce maximum ($w_{OPN} ; \gamma_{dOPN}$) est appelé par **l'Optimum Proctor Normal**.

Dans cette étude, 10 essais Proctor Normal ont été effectués pour le sédiment de Beni Bahdel. Cet essai Proctor Normal est réalisé en trois couches dans un appareil de compactage automatique. Les valeurs fixées pour ce type d'essai sont les suivantes :

- Masse de la dame : 2490 g ;
- Hauteur de chute : 305 mm ;
- Diamètre de la dame : 51 mm ;
- Nombre de coups par couche : 25 coups ;
- Masse approximative d'une couche : 650g.



Photo III.12 : Étapes de réalisation de l'essai Proctor Normal sur le sédiment de Beni Bahdel.

La figure III.6 et le tableau III.7 montrent les résultats obtenus des courbes de compactage pour le sédiment de Beni Bahdel (côtés amont et aval).

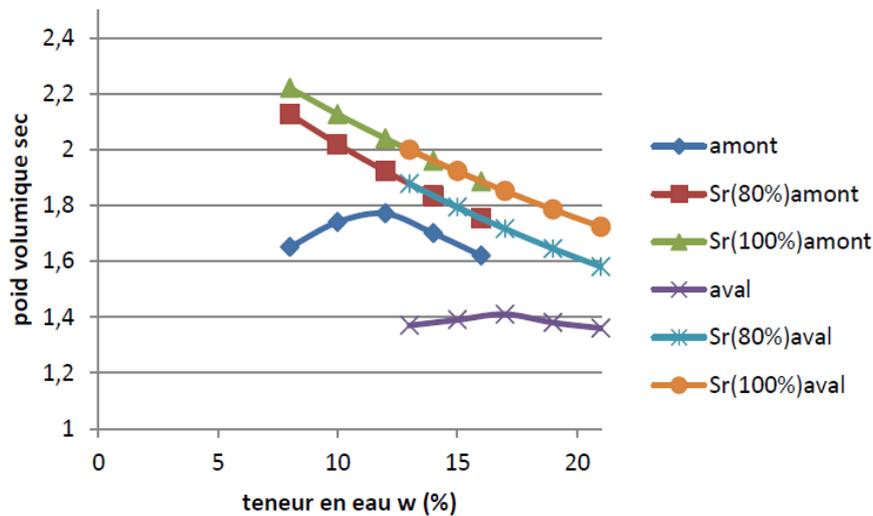


Figure III.6 : Courbes de compactage du sédiment de barrage Beni Bahdel

Tableau III.7 : Récapitulatif des résultats des essais de compactage à l'OPN pour le sédiment de Beni Bahdel

| | Sédiment de Beni Bahdel | |
|---|-------------------------|------------|
| | Côté Aval | Côté Amont |
| Teneur en eau optimale (w_{OPN} (%)) | 17 | 12 |
| Masse volumique sèche maximale ($\gamma_{d_{OPN}}$ (g/cm ³)) | 1,4 | 1,78 |

L'analyse des résultats obtenus indique que le Sédiment de Beni Bahdel présente sur le côté aval une masse volumique sèche maximale de 1,4 g/cm³ pour une teneur en eau optimale de 17% ; tandis que sur le côté amont, la masse volumique sèche maximale est de 1,78 g/cm³ pour une teneur en eau optimale de 12%.

L'allure des courbes de compactage obtenues pour les deux types de sédiments permet de constater que la variation de la teneur en eau n'apporte pas une grande influence sur la variation de la densification du sédiment. Ceci peut être attribué à la proportion relativement présente du sable dans le squelette granulaire de ces matériaux.

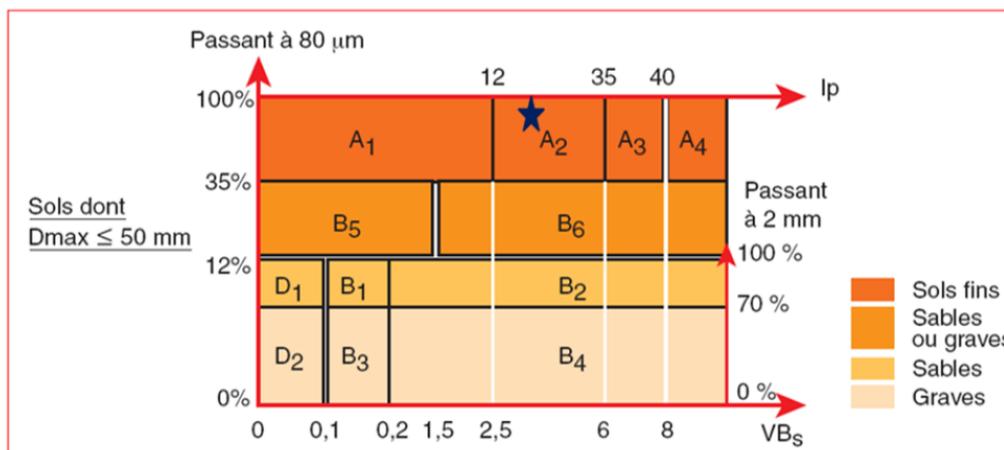
III.5. Classification du sédiments de Beni Bahdel

En se basant sur l'analyse des principaux essais d'identifications effectués sur les sédiments du barrage de Beni Bahdel pour les deux côtés (aval et amont). On pourra attribuer une classification pour ces deux matériaux d'étude :

1. Selon la classification du guide technique routier (GTR, 2000) qui nécessite les paramètres présents dans le tableau III.8, le sédiment du barrage de Beni Bahdel est classifié dans la classe **A2** (classe des sols fins) à l'aval et à l'amont du barrage (Figure III.7).

Tableau III.8 : Récapitulatif des paramètres d'identification du sédiment du barrage Beni Bahdel pour la classification du GTR (2000).

| Paramètres d'identification | Sédiment Beni Bahdel | |
|-----------------------------|----------------------|-------|
| | AVAL | AMONT |
| Passant à 2mm (%) | 83 | 82 |
| Passant à 80µm (%) | 66 | 60 |
| Ip (%) | 24 | 14 |
| VBS | 2,44 | 2,67 |



★ Sédiment de Beni Bahdel

Figure III.7 : Classification du sédiment du barrage de Beni Bahdel selon le guide GTR (2000)

2. Selon la classification LCPC (Figure III.5), le sédiment de Beni Bahdel est classifié comme un sol fin de type argile très plastique (**At**) pour le côté aval et en sol argileux peu plastique (**Ap**) du côté amont.

III.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons effectué différents essais d'identification et de caractérisation géotechnique sur le sédiment du barrage de Beni Bahdel pour ces deux côtés (amont et aval). Plusieurs conclusions peuvent être tirées, qui sont :

1. Le sédiment de Beni Bahdel présente une granulométrie majoritairement sableux-limoneuse avec une fraction argileuse représentative de la fraction fine du matériau qui est moyennement ponctuelle ;
2. La présence de matières organiques (MO) pour le sédiment du côté aval est assez marquée que celle du côté amont. Ce qui se répercute sur le potentiel de gonflement du sédiment qui est moyennement élevé du côté aval et faible du côté amont ;
3. Selon la classification LCPC, le sédiment de Beni Bahdel est classifié comme un sol fin de type argile très plastique (**At**) pour le côté aval et en sol argileux peu plastique (**Ap**) du côté amont ;
4. Selon la classification du guide technique routier (GTR), le sédiment du barrage de Beni Bahdel est classifié dans la classe **A2** (classe des sols fins) pour les deux côtés (aval et amont) du barrage ;
5. La densification obtenue pour les deux types de sédiments à partir des essais de compactage à l'OPN a montré que la teneur en eau à l'OPN (w_{OPN}) pour le sédiment du côté aval est plus grande que celle de l'amont. Ceci est en accord avec l'état de plasticité du sédiment qui est plus élevé du côté aval que celui de l'amont. La présence modérée de fines particules argileuses et plastiques du côté aval conduit à une croissance de l'hydratation du sédiment ; qui sera suivie ensuite par une faible densification.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

L'envasement des barrages est un phénomène naturel très complexe qu'il faut l'étudier de l'amont à l'aval du barrage. Il est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydraulique, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile du barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même.

Le dragage constitue la phase ultime qui traduit clairement les insuffisances des autres moyens de lutte contre la sédimentation en amont. Ce dragage en Algérie étant un dragage d'entretien des retenues de barrages, il doit s'inspirer des moyens et méthodes utilisées dans le monde malgré la particularité des sites et du climat.

L'adoption des techniques de dragage doit passer par la caractérisation et l'identification des sédiments pour le choix des moyens de vidange.

Des quantités importantes sont évacuées périodiquement par les vannes de fond des barrages et posent de graves problèmes à l'aval de l'ouvrage. Au lieu de rejeter ces sédiments issues du dragage dans le milieu naturel comme un déchet, on leur donne une valeur par leur réutilisation dans le domaine du Génie Civil.

À cet effet, nous avons mené une série d'analyses physico-chimiques sur des échantillons de sédiments prélevés de la retenue du barrage de Beni Bahdel au niveau des laboratoires de mécanique des sols d'LTPO –Tlemcen. Les principales conclusions tirées de cette campagne d'étude expérimentale sont :

1. Le sédiment de Beni Bahdel présente une granulométrie majoritairement sableux-limoneuse avec une fraction argileuse représentative de la fraction fine du matériau qui est moyennement ponctuelle ;
2. La présence de matières organiques (MO) pour le sédiment du côté aval est assez marquée que celle du côté amont. Ce qui se répercute sur le potentiel de gonflement du sédiment qui est moyennement élevé du côté aval et faible du côté amont ;
3. Selon la classification LCPC, le sédiment de Beni Bahdel est classifié comme un sol fin de type argile très plastique (**At**) pour le côté aval et en sol argileux peu plastique (**Ap**) du côté amont ;
4. Selon la classification du guide technique routier (GTR), le sédiment du barrage de Beni Bahdel est classifié dans la classe **A2** (classe des sols fins) pour les deux côtés (aval et amont) du barrage ;
5. La densification obtenue pour les deux types de sédiments à partir des essais de compactage à l'OPN a montré que la teneur en eau à l'OPN (w_{OPN}) pour le sédiment

du côté aval est plus grande que celle de l'amont. Ceci est en accord avec l'état de plasticité du sédiment qui est plus élevé du côté aval que celui de l'amont. La présence modérée de fines particules argileuses et plastiques du côté aval conduit à une croissance de l'hydratation du sédiment ; qui sera suivie ensuite par une faible densification.

Enfin, pour éviter la pollution de l'environnement, il faudra proposer des solutions pour traiter ces sédiments dragués en vue de les utiliser en tant que composant structurel dans le domaine du Génie Civil.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALZIEU C. (1999).** Dragages et environnement marin, état de connaissances. Édition Ifremer, 223 p.
- BAKER B., PINSON A., KIMBREL S., WHITE K., WALLER WALSH A., FORBIS J. (2016).** National drought resilience: Improved reservoir sediment surveys. CWTS report 2016-07.
- BENAHMED H. (2015).** Valorisation des sédiments d'envasement du barrage de Kramis dans le domaine de génie civil. Magister en Hydraulique. Université Mohamed Boudiaf_Oran, Algérie.
- BENAISSA A. (2017).** Valorisation de la vase pour l'utilisation dans la technique routière. Thèse de doctorat. Université Djillali Liabès_Sidi Bel Abbès, Algérie.
- BEN MAMMOU A., LOUATI M.H. (2007).** Evolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie, Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 20, n° 2, pp. 201-210.
- BOURABAH M.A. (2012).** Comportement mécanique des sols fins. Application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière. Thèse de Doctorat en Génie-Civil, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- BOUTIN R. (2000).** Dragage et rejets en mer. Les produits de type vase. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p.307.
- DEMMAK A. (1982).** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Pierre et Marie Curie, Paris-XI, France.
- DUBOIS V. (2006).** Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins - Valorisation en technique routière. Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France.
- GE.O.R.E (2001).** Gestion optimale des ressources en Eau. Projet GE.O.R.E, Coopération Allemande au Développement, Coopération Technique Tunis-Allemande.
- GTR (2000).** Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Editions du SETRA-LCPC, Fascicule 1-Principes Généraux.
- JOYE P. (2005).** Cours de géologie appliquée au génie civil. Chapitre 02 : Notions de pétrographie.
- LAHLOU A. (1988).** The silting of Moroccan dams. Sediment Budgets, Proceedings of the Porto Alegre Symposium, IAHS Publ. N°.174.

PROULHAC N., LANN K. (2006). Rapport final. Schéma directeur du traitement des vases portuaires. Département de La Gironde, Bassin d'Arcachon.

REMINI W., REMINI B. (2003). La Sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, N°02, pp.45-54.

REMINI B., HALLOUCHE W. (2004). La sédimentation dans les barrages Algériens. La Houille Blanche, N°01.

REMINI B., HALLOUCHE W., ACHOUR B. (2009). L'Algérie : Plus d'un siècle de desenvasement des barrages. Ouvrage intitulé : Etat des ressources en eau au Maghreb en 2009, édité par UNESCO Office à Rabat, pp. 123-142.

REMINI B., BENSALIA D. (2016). Envasement des barrages dans les régions arides. Exemples Algériens. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, N°27, pp.63-90.

SEMCHA A. (2006). Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, Cas du barrage de FERGOUG. Thèse de doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, France.

Webographie :

[1] <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optsee/hym/17/transedi.htm>

[2] <https://www.kamo.be/fr/la-classification-des-roches>

[3] <http://www.cerclealgerianiste.fr/index.php/archives/encyclopedie-algerianiste/histoire/histoire-economique/hydro-exploitation/330-le-barrage-des-beni-bahdel>