

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université ABOU-BEKR BELKAID_Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de Génie-Civil



Mémoire de Fin d'Etudes pour l'Obtention du Diplôme

De Master en Génie-Civil

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Thème

**La technique de stabilisation-solidification des sédiments
dragués dans les matériaux routiers : Etat de l'art**

Présenté par :

Mr. GHITRI Merwan

Mr. DELHEM Abdelber Riyad

Encadré par : Dr. BOURABAH Maghnia Asmahane

Soutenu le 29 / 09 / 2021 devant le jury composé de :

Mr. GHENNANI Boubekour

Président

Mr. BEDJAOUI Mohamed Chakib

Examineur

Année Universitaire : **2020 / 2021**

Remerciements

Nous Remercions, En Premier Lieu, Notre Bon Dieu Qui Nous a Fait
Que Nous Soyons Des Musulmans Et Qui Nous a Illuminé Notre
Chemin De La Lueur Du Savoir Et De La Science.

*Nous exprimons toute notre reconnaissance et nos remerciements particuliers à
notre encadrante Dr. BOURABAH Maghnia Asmahane, qui nous a
permis de réaliser ce travail, pour son suivi permanent, ses conseils, ses lectures
attentives. Elle nous a largement fait profiter de son expérience. Les échanges que
nous avons pu avoir avec elle ont été très enrichissants. Elle a assurée
l'encadrement au quotidien de notre mémoire.*

*Nous remercions vivement Monsieur GHENNANI Boubekour pour avoir accepté
de présider le jury.*

*Nous remercions le membre du jury, Monsieur BEDJAOUI Mohamed Chakib
pour le grand honneur qu'il nous a fait en acceptant d'examiner ce mémoire.*

*Enfin, nous remercions tous nos collègues de Génie-Civil promotion 2021 et tous
nos amis (es).*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère,

qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

Mon père,

qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

A Mes frères et mes sœurs et toute ma famille

*A ma nièce **iline** et mon neveu **rawaf***

*A mon encadrante Dr. **BOURABAH Maghnia Asmahane.***

A tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

A tous mes amis (es) A tous les camarades et amis de L'Université

(famille VOA).

GHITRI Merwan

Dédicaces

A ma Mère,

"Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir.

Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte. En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée."

A mon Père,

"L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect.

Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que Dieu te Préserve et te procure santé et longue vie.

A mon frère,

Qui m'a soutenu avec ses attitudes calmes.

A mon encadrante Dr. BOURABAH Maghnia Asmahane.

A tous mes camarades et mes amis de promotion de 2^{ème} année master VOA.

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur et A tous les membres de ma famille.

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

DELHEM Abdelber Riyad

RÉSUMÉ

Les quantités de sédiments dragués chaque année des milieux portuaires et fluviaux constituent un enjeu environnemental décisif. La mise en dépôt de plus en plus coûteuse de ces matériaux dans de vastes aires aménagées, mais qui arrivent à sa saturation, devient cruciale et rend la question relative à leur devenir plus que jamais d'actualité. La réglementation internationale prévoit ainsi le traitement de ces sédiments avant leurs réutilisations.

Parmi les nombreuses techniques utilisées actuellement pour traiter ces sédiments de dragage, la technique de solidification/stabilisation (S/S) trouve son utilisation autant dans le domaine des sols que dans celui des sédiments contaminés ou non. Outre la stabilisation et l'immobilisation des contaminants, cette technique ouvre des perspectives de valorisation du matériau traité.

L'objectif de ce travail s'intéresse à étudier l'effet d'introduction de cette technique sur les déchets de sédiments dragués pour une application en construction routière.

Mots clés: Sédiments de dragage, solidification/stabilisation, valorisation, comportement mécanique, guide routier.

ABSTRACT

The quantities of sediment dredged each year from port and river environments constitute a decisive environmental issue. The increasingly expensive disposal of these materials in large developed areas, but which are reaching saturation point, is becoming crucial and makes the question of their future more topical than ever. International regulations thus provide for the treatment of these sediments before their reuse.

Among the many techniques currently used to treat these dredged sediments, the solidification/stabilization (S/S) technique finds its use as much in the field of soils as in that of contaminated or not sediments. In addition to the stabilization and immobilization of contaminants, this technique opens up prospects for upgrading the treated material.

The objective of this work is to study the effect of introducing this technique on dredged sediment waste for application in road construction.

Keywords: Dredged sediments, solidification-stabilization, recovery, mechanical behavior, road guide

ملخص

تشكل كميات الرواسب التي يتم تجريفها كل عام من أوساط الموانئ والأنهار مسألة بيئية مهمة، حيث أصبح التخلص المكلف بشكل متزايد من هذه المواد في مناطق كبيرة مهياة، والتي وصلت إلى نقطة التشبع أمرًا بالغ الأهمية ويجعل مسألة مستقبلهم أكثر أهمية من أي وقت مضى. تنص اللوائح الدولية على معالجة هذه الرواسب قبل إعادة استخدامها.

من بين العديد من التقنيات المستخدمة حاليًا لمعالجة هذه الرواسب المجروفة، تجد تقنية التصلب/التثبيت (S/S) استخدامها بنفس القدر في مجال التربة كما هو الحال في الرواسب الملوثة أم لا. بالإضافة إلى تثبيت الملوثات، تفتح هذه التقنية آفاقًا لتحسين واستخدام المواد المعالجة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير إدخال هذه التقنية على نفايات الرواسب المجروفة لتطبيقها في ميدان الطرق.

الكلمات المفتاحية : الرواسب المجروفة، التصلب - التثبيت، الاستعادة، السلوك الميكانيكي، دليل الطرق.

Table des Matières

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1 : Généralités sur les sédiments de dragage

1.1	Introduction	4
1.2	Définition des sédiments de dragage	4
1.2.1	Les sédiments	4
1.2.2	Le dragage des sédiments	5
1.3	Composition des sédiments de dragage	6
1.3.1	Eléments de nature minérale	6
1.3.2	Eau dans les sédiments	7
1.3.3	Matières organiques dans les sédiments	8
1.3.4	Polluants dans les sédiments	9
1.4	Techniques de dragage des sédiments	13
1.4.1	Les dragages hydrauliques	13
1.4.2	Les dragages mécaniques	14
1.4.3	Les opérations de déroctages	15
1.4.4	Les dragages par agitation dits « à l'américaine »	15
1.5	Caractéristiques des sédiments de dragage	16
1.5.1	Caractéristiques physiques	16
1.5.2	Caractéristiques minéralogiques	18
1.5.3	Caractéristiques mécaniques	18
1.6.	Conclusion	19

Chapitre 2 : Connaissances sur l'envasement des retenues de barrages

2.1	Introduction	21
2.2.	Processus d'envasement des barrages dans le Monde	21
2.2.1	Envasement d'un barrage	21
2.3.	Processus d'envasement des barrages dans le Maghreb	25
2.3.1.	Envasement en Tunisie	25
2.3.2.	Envasement au Maroc.	26
2.4.	Processus d'envasement en Algérie	28
2.5	Conclusion	31

Chapitre 3 : Exploitation des sédiments en domaine routier

3.1	Introduction	33
3.2	Description d'une structure de chaussée	33
3.2.1	Différentes couches d'une chaussée	34
3.2.2	Types de structure de chaussée	35
3.2.3	Types de structure de chaussée	39
3.3	Critères de classification des sédiments dans les travaux routiers	39
3.3.1	Critère de granulométrie	40
3.3.2	Critère de portance	40
3.3.3	Critère de durabilité au jeune âge.	41
3.3.4	Critère de résistance.	41
3.3.5	Critère d'aptitude des liants au traitement.	42
3.4	Caractérisation et classification des sédiments selon le guide des terrassements routier (GTR)	43
3.4.1	Définition du guide des terrassements routier (GTR)	43
3.4.2	Classification selon le guide des terrassements routier (GTR)	44
3.5	Conclusion	48

Chapitre 4 : Traitement des sédiments dragués par la technique de solidification/stabilisation (S/S)

4.1	Introduction	50
4.2	La technique de solidification /stabilisation (S/S).	50
4.2.1	Description de la technique.	50
4.2.2	Applicabilité de la technique de solidification/stabilisation (SS).	51
4.2.3	Avantages et inconvénients de la technique de stabilisation/solidification (S/S).	52
4.2.4	Processus de solidification.	52
4.2.5	Processus de stabilisation.	53
4.2.6	Les procédés de mélanges dans la technique S/S.	54
4.3	Comportements mécaniques des sédiments traités par le procédé S/S.	56
4.3.1	Travaux de Bourabah (2012)	56
4.3.2	Travaux de Boutouil et Saussaye (2011)	57
4.3.3	Travaux de Rekik (2008)	59
4.3.4	Travaux de Abriak et al.2013	61
4.3.5	Travaux de Wang et al.2012	62
4.3.6	Travaux de Mezazigh et Behmanesh (2009)	65
4.4	Conclusion	68
	CONCLUSION GENERALE	71
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	73

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Généralités sur les sédiments de dragage

Figure 1.1	Les sédiments de dragage (Miranda et al. 2021)	4
Figure 1.2	Degré de décontamination en fonction de la granulométrie du matériau (Alzieu et al. 2003)	6
Figure 1.3	Vue schématique sur les formes de l'eau dans les sédiments (Hutin, 2020)	8
Figure 1.4	Origine de formation des matières organiques dans les sédiments (Perrodon et Mathieu, 2015)	9

Chapitre 2 : Connaissances sur l'envasement des retenues de barrages

Figure 2.1	Processus d'envasement d'un barrage (Djenaoui et Chatta, 2016)	21
Figure 2.2	Modes de transport des sédiments dans un cours d'eau (Bouزيد, 2005)	22
Figure 2.3	Carte des barrages algériens les plus envasés (Remini, 2017)	23
Figure 2.4	Erosion d'un bassin versant.	23
Figure 2.5	Taux de comblement des barrages en 2014 suivant les bassins hydrographiques (Remini, 2017)	30

Chapitre 3 : Exploitation des sédiments en domaine routier

Figure 3.1	Répartition des charges dans une structure de chaussée [6]	33
Figure 3.2	Fonctionnement d'une structure de chaussée sous une charge roulante [7]	34
Figure 3.3	Les différentes couches constitutives d'une chaussée routière [8]	35
Figure 3.4	Structure d'une chaussée souple.	36
Figure 3.5	Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse.	36
Figure 3.6	Structure d'une chaussée semi-rigide.	37
Figure 3.7	Structure d'une chaussée rigide.	37
Figure 3.8	Structure d'une chaussée à structure mixte.	38
Figure 3.9	Structure d'une chaussée à structure inverse.	38
Figure 3.10	Paramètres de portance immédiate (IPI) souhaitées pour les différentes couches d'une structure routière.	40
Figure 3.11.	Diagramme de classification d'une couche d'assise de chaussée selon sa classe mécanique.	41
Figure 3.12	Représentation synoptique de la classification des matériaux selon le guide des terrassements routier GTR (2000).	45

Chapitre 4 : Traitement des sédiments dragués par la technique de solidification/stabilisation (S/S)

Figure 4.1	Procédé de solidification/stabilisation (S/S) d'un sol contaminé (Gitipour et al., 2014)	51
Figure 4.2	Schéma de principe de la technique de solidification/ stabilisations (S/S) in situ ou ex situ [11]	54
Figure 4.3	Le procédé de solidification/stabilisation (S/S) in situ.	55
Figure 4.4	Influence du traitement sur les courbes de portance du sédiment naturel (SN) de Cheurfas (Bourabah, 2012).	57
Figure 4.5	Résistances à la compression simple à 28 jours du sédiment traité avec 10% de ciment, sans et avec 35, 40 et 45% de sable correcteur (Boutouil et Saussaye, 2011)	57
Figure 4.6.	Analyse granulométrique à 28 jours du sédiment naturel et traité avec 10% de ciment, sans et avec 45% de sable correcteur (Boutouil et Saussaye, 2011).	58
Figure 4.7	Courbes de compressibilité des sédiments marins contenant 2 et 7% de MO traité avec du ciment (Rekik, 2008) : (a) 2% de ciment, (b) 5% de ciment, (c) 10% de ciment.	59
Figure 4.8.	Evolution de la pression de préconsolidation avec le dosage en ciment et la teneur en matières organiques (MO) (Rekik, 2008)	60
Figure 4.9.	Evolution des courbes de résistances à la compression et à la traction à long terme des sédiments stabilisés aux liants (Abriak et al.2013).....	62
Figure 4.10	Effets de la chaux et du ciment sur les limites d'Atterberg des sédiments marins de Dunkerque (Wang et al. 2012)	63
Figure 4.11	Echange cationique sédiment-liant.	63
Figure 4.12	Variation de la compacité et la portance des sédiments solidifiés aux liants (Wang et al. 2012)	64
Figure 4.13	Développement du couple C-S-H (calcium silicate hydrate) dans le composé cimentaire (Heinz et al. 2017)	65
Figure 4.14	Effets d'ajout des liants sur la compacité des sédiments du Havre (Mezazigh et Behmanesh, 2009)	66
Figure 4.15	Attractivité de l'eau par les liants dans les sédiments (Halsted et al.2008)	66
Figure 4.16	Variation de la résistance en compression simple des sédiments du Havre traités (Mezazigh et Behmanesh, 2009)	67
Figure 4.17	Réaction pouzzolanique (Halsted et al. 2008)	67

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Généralités sur les sédiments de dragage

Tableau 1.1	Classification granulométrique (Alzieu et al. 2003)	6
Tableau 1.2	Source de pollutions par les métaux lourds (Alzieu et al. 2003)	10
Tableau 1.3	Origine des micropolluants dans les sédiments (Tran, 2009)	12
Tableau 1.4	Paramètres physiques importants dans la classification des sédiments.	17

Chapitre 2 : Connaissances sur l'envasement des retenues de barrages

Tableau 2.1	Pertes de capacité dues à l'envasement dans certains pays du monde (Remini et Hallouche, 2004).	24
Tableau 2.2	Caractéristiques d'envasement des barrages en Tunisie (Ben Mammou et Louati, 2007).	25
Tableau 2.3	La dégradation annuelle des bassins versants et l'envasement des barrages Marocains (Lahlou, 1988)	27
Tableau 2.4	Quantification de l'envasement des barrages Algériens (A.N.B.T).	29

Chapitre 3 : Exploitation des sédiments en domaine routier

Tableau 3.1	Critère d'aptitude au traitement pour la classification des matériaux traités aux liants hydrauliques [Norme NF P94-100].	42
Tableau 3.2	Récapitulatif des différents essais et critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de structure routière.	43

Chapitre 4 : Traitement des sédiments dragués par la technique de solidification/stabilisation (S/S)

Tableau 4.1	Variation de l'indice de compression (C_c) des sédiments marins traités (Rekik, 2008).	60
Tableau 4.2	Résistances et déformations à rupture des sédiments marins stabilisés à la chaux ou au ciment à 360 jours (Abriak et al. 2013).	62
Tableau 4.3	Perméabilités des sédiments du Havre traités mesurées par cellule triaxiale (Mezazigh et Behmanesh, 2009).	68

LISTE DES PHOTOS

Chapitre 1 : Généralités sur les sédiments de dragage

Photo 1.1	Opération de dragage (Hübner, 2009).	5
Photo 1.2	La technique de dragage hydraulique [1]	14
Photo 1.3	La technique de dragage mécanique [1]	15
Photo 1.4	Opération de déroctage et dragage de sédiments [2]	15
Photo 1.5	La technique de dragage à l'américaine [3]	16
Photo 1.6	Quelques exemples de sédiments dragués [4,5]	17

Chapitre 2: Connaissances sur l'envasement des retenues de barrages

Photo 2.1	Cas d'exemples de barrages algériens envasés.	28
-----------	---	----

Chapitre 4 : Traitement des sédiments dragués par la technique de solidification/stabilisation (S/S)

Photo 4.1	Le procédé de solidification/stabilisation (S/S) ex situ [12,13]	56
-----------	--	----

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

Hg : Mercure

Pb : Plomb

As Arsenic

Cd : Cadmium

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

PCB : Poly-chloro-biphényles

TBT : Tributyl-étain.

w : Teneur en eau

n : Porosité

e : Indice des vides

Sr : Degré de saturation

ph : Masse volumique totale humide

pd : Masse volumique sèche

IP : Indice de plasticité

GNT : Grave non traitée

BTP : Bâtiment et travaux publics

IPI : Indice portant immédiat

ICBR : Indice CBR (Indice californian bearing ratio)

NF : Norme française

Rt : Résistance à la traction

Et : Module d'élasticité à la traction

Gv : Gonflement volumique

GTR : Guide des terrassements routiers

VBS : Valeur au bleu méthylène du sol

LA : Los Angeles

MDE : Micro Deval en présence d'eau

FS : Friabilité des sables

MO : Matière organique

Cc : Indice de compression

Rc : Résistance à la compression

SD : Sédiments de dragage

X : pourcentage

Ch : Chaux

C : Ciment

ε : Déformation.

FS : Fumée de silice.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. En effet, l'Algérie comme beaucoup de pays des régions semi-arides, fait face à la diminution cruciale des volumes d'eau dans les retenues de barrages causées par leur envasement. Ce phénomène a atteint 1,7 milliards de m³ dans les 74 barrages en exploitation pour une capacité de 8,5 milliards de m³ d'eau. Soit une perte de capacité de 20% (Remini, 2017). Le changement climatique dans ces régions a aggravé ce phénomène, étant donné l'irrégularité spatiale et temporelle très importante des pluies, constituant ainsi une menace permanente pour le remplissage des barrages réservoirs. L'entretien des fonds de ces retenues par le dragage demeure une solution pour lutter contre ce phénomène d'envasement.

Les opérations de dragage pourront donc enlever les sédiments se déposant sur le fond et assurer une bonne maîtrise des courants de densités produits par ce mécanisme de sédimentation.

Cependant, les volumes considérables de sédiments dragués annuellement et mise à terre peuvent contribuer à long terme à la pollution du milieu rural. Il est donc important de proposer des solutions pour l'utilisation judicieuse de ces sédiments comme un constituant en matériau de construction.

En effet, avec la demande accentuée d'apport de matériaux granulaires dans des applications géotechniques routières, l'utilisation des sédiments de dragage constitue donc une nouvelle voie pour améliorer d'une part la gestion des ressources naturelles de granulats et d'autre part constituer une nouvelle source d'approvisionnement de matériaux.

Toutefois, la réglementation internationale prévoit le traitement de ces sédiments avant leurs réutilisations. Parmi les nombreuses techniques utilisées actuellement pour traiter ces sédiments dragués, la technique de solidification/stabilisation (S/S) qui a trouvé son utilisation autant dans le domaine des sols que dans celui des sédiments contaminés ou non. Outre la stabilisation et l'immobilisation des contaminants, cette technique ouvre des perspectives de valorisation du matériau traité.

L'objectif de ce travail s'intéresse à étudier l'effet d'introduction de cette technique sur les déchets de sédiments dragués. Il s'inscrit donc dans la recherche d'une méthodologie de traitement des sédiments dragués des retenues par utilisation de cette technique de

Introduction Générale

solidification/stabilisation (S/S) en vue de les exploiter comme matériau constitutif dans les couches de structure routière.

Pour cela, une synthèse bibliographique est présentée dans ce mémoire donnant un état de l'art sur le traitement des sédiments de natures diverses par utilisation de cette technique S/S. Ce mémoire est donc constitué en plus de l'introduction et la conclusion générale, de quatre (04) chapitres suivants :

- Le premier chapitre présente les connaissances générales sur les sédiments de dragage à savoir les différents constituants formant ces matériaux, leurs compositions physico-chimiques ainsi que les processus de dragage de ces sédiments.
- Le deuxième chapitre met le point sur la complexité et la problématique d'envasement des retenues de barrages maghrébins en général et algériens en particulier.
- Le troisième chapitre consiste en la gestion des sédiments de dragage en domaine routier où nous présentons une description des différents éléments constitutifs d'une structure de chaussée routière ainsi que les principaux paramètres adoptés pour la caractérisation et classification de ces sédiments selon le guide des terrassements routier.
- Le quatrième chapitre présente un état des connaissances sur le comportement mécanique des sédiments traités par la technique de solidification/stabilisation (S/S).

**Chapitre 1 : Généralités sur les sédiments
de dragage**

1.1.Introduction

Dans ce premier chapitre, on présente les connaissances générales sur les sédiments de dragage à savoir les différents constituants formant ces matériaux, leurs compositions physico-chimiques ainsi que les processus de dragage de ces sédiments.

1.2. Définition des sédiments de dragage

1.2.1. Les sédiments :

Les sédiments sont définis comme un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses de matières précipitées ayant séparément subi un certain transport (Figure 1.1). Les particules de sédimentation peuvent provenir de l'érosion des roches, des sols ou résulter d'une précipitation chimique (précipitation des sels comme les chlorures, les sulfates) et biochimique (accumulation de squelettes d'organismes vivants, des coquilles). Les sédiments transportés dans l'eau jouent un rôle important dans le transport et le devenir des polluants. En effet, les substances toxiques peuvent se fixer aux particules de sédiments ou être absorbées par celles-ci, puis transportées et déposées dans un autre milieu. L'accumulation de sédiments dans des cours d'eau ou des lacs peut faire diminuer la profondeur de l'eau, ce qui rend la navigation difficile voire même impossible. L'opération de draguer une partie de ces sédiments pour assurer l'accès à un cours d'eau ou un port, peut libérer des contaminants dans l'environnement. C'est pourquoi, le prélèvement des sédiments pose un problème majeur pour les responsables des ports et des voies navigables (Pouhet, 2015).

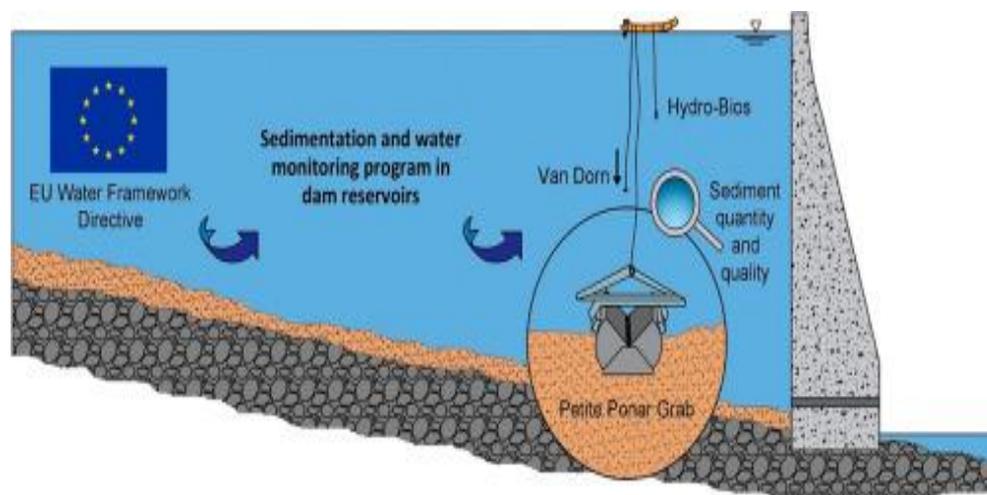


Figure 1.1. Les sédiments de dragage (Miranda et al. 2021).

1.2.2. Le dragage des sédiments :

On appelle dragage l'opération qui consiste à extraire les matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau (Photo 1.1). L'objectif peut être de réaliser des travaux de génie portuaire (creusement de bassins ou de chenaux), d'entretenir les chenaux fluviaux ou maritimes empruntés par les navires lorsqu'ils ont été comblés par les sédiments, d'effectuer des opérations de remblaiement pour reconstituer les plages ou gagner des terres sur la mer ou d'extraire des granulats marins pour répondre aux besoins du secteur de la construction (Pouhet, 2015).

L'appellation ainsi de « sédiments de dragage » correspond aux boues formées par sédimentation dans les cours d'eau, les plans d'eau, les canaux, les barrages et les ports fluviaux ou maritimes. Cette opération de dragage qui consiste à retirer une partie de ces sédiments, est souvent nécessaire afin de rétablir un tirant d'eau pour la navigation ou pour prévenir les risques d'inondation. Les sédiments de dragage sont un mélange de sables, de limons et d'argiles (hors déchets anthropiques, tels que des pneus, bouteilles, carcasses de voitures/vélos et par opposition aux graves et cailloux extraits des lits de rivières comme matériaux, dans le cadre du code minier). On distingue les sédiments marins, extraits des ports et des estuaires, les sédiments continentaux, extraits des cours d'eau, canaux, plans d'eau, retenues d'eau et zones portuaires fluviales (Dubois, 2006).



Photo 1.1. Opération de dragage (Hübner, 2009).

1.3. Composition des sédiments de dragage

La composition des sédiments de dragage est variée étant donné qu'ils sont formés. De la constitution des éléments de nature minérale, de l'eau et des matières organiques ainsi que leurs influences sur les propriétés géotechniques du sédiment (Alzieu et al. 2003).

1.3.1. Eléments de nature minérale

Les éléments de nature minérale influencent essentiellement sur les caractéristiques physiques et mécaniques des sédiments. Ils sont classés en fonction de leur taille, on distingue ainsi : les argiles, les limons, les sables, les graviers et les cailloux (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Classification granulométrique (Alzieu et al. 2003)

Dénomination	Argile	Limon	Sable	Gravier	Cailloux
Diamètre (mm)	$d < 0,002$	$0,002 < d < 0,063$	$0,063 < d < 2$	$2 < d < 20$	$d > 20$

Les résultats de l'analyse granulométrique contaminants en fonction de la distribution granulométrique sont des indicateurs pour la décontamination. Par exemple, les travaux de recherche menant à la caractérisation des sédiments du port de Hambourg ont démontré que la fraction grossière de ces sédiments comportait une contamination pratiquement nulle alors que la fraction fine (argile et limon) contenait presque la totalité de la contamination. De même, les analyses réalisées sur des sédiments d'une zone portuaire de Montréal ont démontré qu'environ 70% des contaminants inorganiques présents étaient situés dans la portion fine ($< 45\mu\text{m}$). La figure 1.2 ci-dessous montre que dans le cas de contaminants inorganiques, la décontamination dépend étroitement de la granulométrie du matériau.

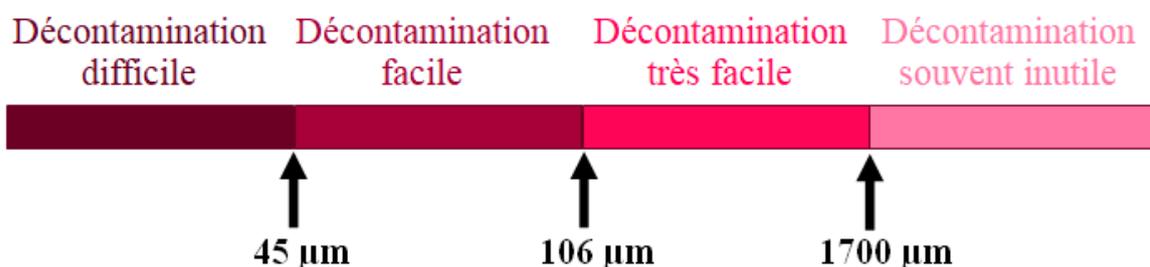


Figure 1.2. Degré de décontamination en fonction de la granulométrie du matériau (Alzieu et al. 2003).

L'origine de la composition minérale est diverse, on peut citer ci-dessous selon leur provenance (Alzieu et al. 2003) :

- Les cailloux et les graviers sont des sédiments terrigènes, c'est-à-dire, issus de l'érosion des sols. Leur composition pétrographique dépend de la nature des terrains érodés.
- Les sables renferment essentiellement du quartz avec présence ou non de micas, voire de feldspaths. Ils comportent souvent des minéraux lourds dont la nature dépend des formations érodées. On trouve également des sables calcaires.
- Les particules les plus fines, limons, boues et vases, sont composées de minéraux argileux d'origine terrigène, et aussi des squelettes d'organismes d'origine endogène.

1.3.2. Eau dans les sédiments :

La teneur en eau dans les sédiments est très variable (de l'ordre de 100% à 300%), où elle dépend de la méthode de dragage et de la position du dépôt. Généralement, on peut distinguer l'eau libre, capillaire, colloïdale, adsorbée et de constitution (Figure 1.3) (Essaidi, 2013) :

- L'eau libre n'est pas liée à la matrice solide et peut donc circuler librement entre les particules. Elle s'élimine facilement par une simple décantation.
- L'eau capillaire est liée à la matrice solide par des forces de capillarité qui créent entre les grains des forces d'attraction. Elle s'élimine par des procédés mécaniques de séparation solide-liquide (filtration).
- L'eau colloïdale permet l'hydratation des colloïdes. De même que l'eau capillaire, elle peut être éliminée par des procédés mécaniques de séparation solide-liquide.
- L'eau absorbée et pelliculaire est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles. Cette dernière n'est séparable de la matrice solide que par des moyens thermiques.
- L'eau de constitution entre dans les formules chimiques des substances pour former les substances hydratées. Comme l'eau pelliculaire, elle peut être éliminée uniquement par des moyens thermiques.

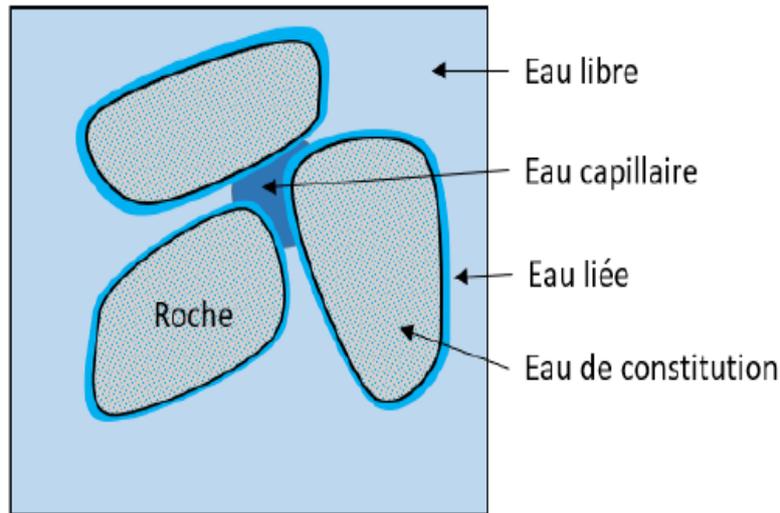


Figure 1.3. Vue schématique sur les formes de l'eau dans les sédiments (Hutin, 2020)

1.3.3. Matières organiques dans les sédiments :

L'origine des matières organiques est très diverse, il s'agit soit de débris végétaux, soit des micro-organismes, ou encore des colloïdes humiques (Figure 1.4). La composition de ces matières est généralement identique à un sédiment de cours d'eau et elle est constituée d'environ 60% de composés humiques. On peut considérer que la fraction organique comprend deux catégories (Zerzouri, 2015) :

- Les substances non humiques : ce sont des composés relativement simples et de structure connue appartenant à la chimie classique: agents pathogènes, acides organiques, acides aminés, protéines, glucides.
- Les substances humiques: constituent une famille de macromolécules organiques d'origine naturelle. Elles proviennent de l'évolution des matières organiques fraîches sous des processus chimiques et enzymatiques. Elles peuvent constituer entre 85 et 90% de la fraction organique totale du sol.

Selon la solubilité qui est en fonction du pH, on peut différencier trois fractions dans les substances humiques : Les acides humiques insolubles dans l'acide mais solubles en milieu alcalin et les acides fulviques solubles dans les acides et les bases. Ils peuvent constituer jusqu'à 85 % du carbone organique total. L'humine est insoluble dans les acides et les bases.

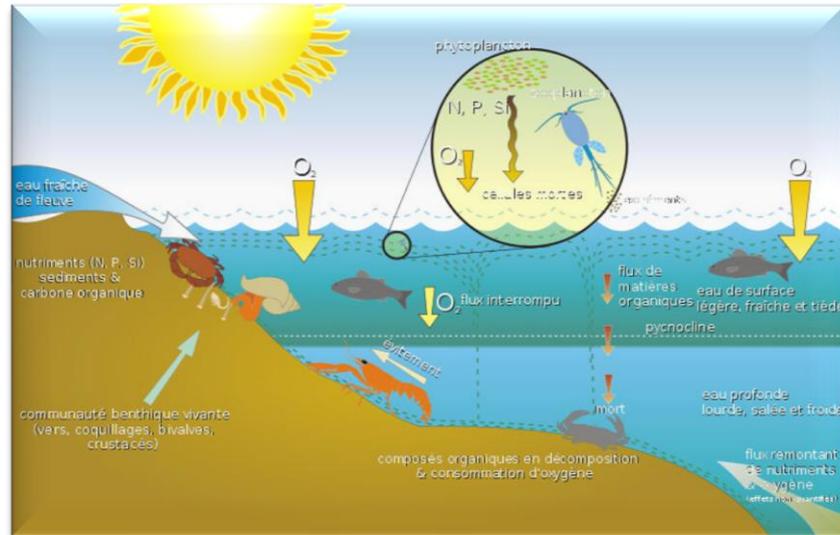


Figure 1.4. Origine de formation des matières organiques dans les sédiments (Perrodon et Mathieu, 2015)

Au niveau de la structure, il n'existe pas de séparation nette entre ces trois fractions, mais plutôt une transformation continue évoluant dans le sens suivant:

Acides fulviques → acides humiques → humines

Dans le corps des sédiments, les substances humiques se regroupent avec les particules minérales pour former des associations organon-minérales selon deux façons :

- Soit par simple physisorption de la substance humique (liaisons hydrogènes), ce qui favorise l'agglomération des particules entre elles.
- Soit par complexations mixte d'un même ion métallique entre le composé organique et la particule minérale (argile). Ce complexe est suffisamment stable pour dissocier l'ion métallique de la particule minérale. Cela entraîne une dissolution de la particule si l'ion métallique fait partie d'une structure assurant la cohésion de la particule minérale (Zerzouri, 2015).

1.3.4. Polluants dans les sédiments :

Les activités anthropiques autour d'une rivière, comme les activités industrielles, les surfaces agricoles, les zones de baignade et de pêche engendrent des nuisances et des pollutions par des composés de nature organique (HAP, PCB, TBT,...) et inorganique (métaux) qui vont s'accumuler dans les sédiments.

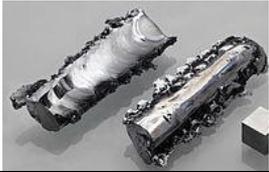
1.3.4.1. Métaux lourds

Les métaux peuvent provenir en partie de l'altération de la roche mère du sous-sol. Cependant la plupart du temps leur origine est liée à l'activité humaine : stockage de déchets industriels et urbains, pratiques agricoles, pollution due aux retombées atmosphériques par l'utilisation de combustibles fossiles, d'essences au plomb, de poussières des industries métallurgiques, d'incinération des ordures ménagères.

Les sources détaillées de la pollution par des métaux lourds sont synthétisées dans le tableau 1.2 suivant :

Tableau 1.2. Source de pollutions par les métaux lourds (Alzieu et al. 2003)

Métaux	Sources de polluants
<p data-bbox="347 790 475 819">Cadmium</p> 	<p data-bbox="683 815 1390 958">Engrais phosphatés; industries de traitement de surface des métaux; industrie de stabilisation des matières plastiques; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles; fabrication de colorants.</p>
<p data-bbox="368 992 454 1021">Cuivre</p> 	<p data-bbox="699 1066 1374 1171">Fils électriques; radiateurs automobiles; appareils de chauffage; traitements de surface.</p>
<p data-bbox="379 1254 443 1283">Zinc</p> 	<p data-bbox="695 1308 1377 1413">Produits pharmaceutiques ou domestiques; conduites d'eau; peintures;piles; galvanisation; traitements de surface.</p>
<p data-bbox="368 1478 454 1507">Nickel</p> 	<p data-bbox="671 1543 1401 1686">Fabrication d'aciers et d'alliages spéciaux; recouvrement de surface par électrolyse; hydrogénation des huiles et substances organiques ;fabrication de peintures; de laque et de produits cosmétiques.</p>
<p data-bbox="357 1758 466 1787">Mercur</p> 	<p data-bbox="683 1794 1390 1973">Fabrication et l'usage de catalyseurs; de fongicides; de pigments et composés mercuriels; les piles au mercure; la fabrication de chlore par électrolyse sur cathode de mercure; le traitement des minerais non ferreux; l'incinération de déchets et la combustion du charbon.</p>

<p style="text-align: center;">Chrome</p> 	<p>Extraction de la chromite, minéral de fer et de chrome; la métallurgie ; la technologie des matériaux réfractaires et l'industrie de traitement de surface.</p>
<p style="text-align: center;">Plomb</p> 	<p>Fabrication de batteries; peintures; additifs pour l'essence; industries pharmaceutiques et sidérurgiques; ateliers photographiques; télévisions.</p>
<p style="text-align: center;">Sélénium</p> 	<p>Fabrication de peintures et colorants; verre; semi-conducteurs; insecticides; alliages.</p>
<p style="text-align: center;">Arsenic</p> 	<p>Extraction, transport et traitement métallurgique; rejets urbains; combustion du charbon; production de trioxyde d'arsenic pour les pesticides en agriculture et les traitements des bois.</p>

La plupart des métaux sont indispensables au métabolisme. Une fois, un seuil de tolérance dépassé, les métaux sont considérés comme toxiques. Ils sont alors incompatibles avec les phénomènes vitaux et certains d'entre eux ont des propriétés cancérogènes et mutagènes. Parmi eux, le mercure (Hg), le plomb (Pb), l'arsenic (As) et le cadmium (Cd) sont les plus toxiques sur la santé humaine. Par exemple : le mercure a un effet négatif sur les reins, le système nerveux et il est un agent tératogène. Le plomb retarde le développement de l'intelligence chez l'enfant par altération probable de la neurotransmission glutaminergique, impliquée dans la mémorisation et l'apprentissage. L'arsenic peut engendrer l'apparition de taches de pigments sur la peau, ainsi que le cancer de la peau, des poumons, de la vessie ou des reins. Le cadmium métallique et ses composés sont classés cancérogènes chez l'homme (Selon le Centre international de recherche sur le cancer) (Tran, 2009).

1.3.4.2. Micropolluants organiques

Ce sont les produits actifs organiques susceptibles d'avoir une action toxique à des concentrations infimes. Ils représentent le troisième grand groupe de contaminants (les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les poly-chloro-biphényles (PCB), les tributyl-étain (TBT)). Les HAP ont une structure chimique comportant plusieurs noyaux. Ils constituent une large classe de contaminants en fonction du nombre de noyaux aromatiques dans leur particule. Ils ont une faible solubilité dans l'eau, mais une forte affinité pour les solvants organiques et une adsorption élevée sur les matières en suspension et sur les colloïdes. En raison de ces propriétés, les HAP présentent une forte affinité pour se concentrer dans les sédiments et les organismes vivants. Les PCB désignent un ensemble de composés organochlorés ayant pour formule chimique $C_{10}H_{(10-n)}Cl_n$. Ils constituent 209 congénères (CB) qui se différencient par le nombre d'atomes de chlore fixé sur la molécule. Il y a presque 20 ans, les PCB ont été retirés du marché. Toutefois, sur les 120 millions de tonnes de PCB produits dans le monde, environ 40 millions de tonnes se trouvent dispersés dans l'environnement. Le milieu aquatique, par son rôle de réceptacle, est un compartiment privilégié d'accumulation des PCB (environ la moitié des PCB présents dans l'environnement). Les TBT font partie de la famille des composés organostanniques ou étainorganique (MBT, DBT, TBT). Ils sont très toxiques pour les mollusques à des concentrations extrêmement faibles. Sur le Tableau 1.3 ci-dessous, certaines sources principales de micropolluants organiques sont citées (Tran, 2009).

Tableau 1.3. Origine des micropolluants dans les sédiments (Tran, 2009).

Micropolluants	Sources
HAP	Biosynthèse par des organismes vivants; Pyrolyse des matières organiques à haute température ; Usines de production d'Aluminium; Raffineries de pétrole; Rejets urbains; Utilisation des carburants fossiles (charbon, pétrole)
PCB	Pertes lors du remplissage et retraitement de systèmes clos (transformateurs, condensateurs); Activités liées à la récupération des matériaux ferreux; Rejets urbains et décharges de matériel usagé (additifs dans les peintures, les encres et les apprêts destinés aux revêtements muraux).
TBT	Matière active des peintures antisalissure de bateau

1.3.4.3. Eléments nutritifs

Il s'agit essentiellement du phosphore et des composés azotés comme l'ammoniaque qui constitue un véritable engrais pour les plantes aquatiques. Un certain nombre de sources naturelles et anthropiques contribuent aux apports de nutriment. Il s'agit notamment des apports d'eau usée, de l'agriculture, ainsi que des émissions dues au brûlage des combustibles et aux véhicules automobiles par exemple (Essaidi, 2013).

1.4. Techniques de dragage des sédiments

Les conditions d'accessibilité du site et sa configuration, la nature des déblais de dragages, leur degré de contamination, et leur destination finale, les enjeux environnementaux et économiques orienteront le choix de la technique (ou des techniques) adéquate(s) de dragage des sédiments pour répondre de la manière la plus satisfaisante à l'ensemble de ces contraintes. Parmi ces techniques de dragage adoptées, on peut citer :

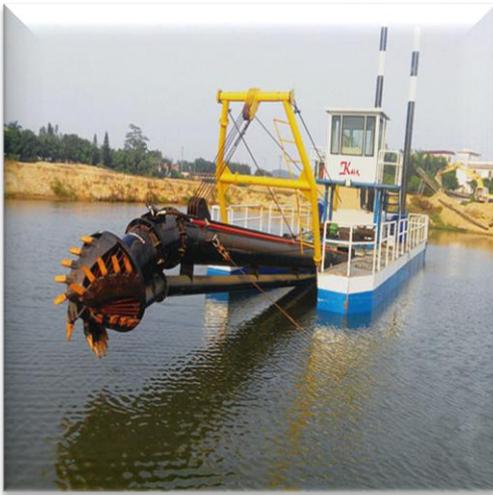
1.4.1. Les dragages hydrauliques :

Le principe des dragages hydrauliques est basé sur l'adjonction d'eau aux déblais à extraire (Photo 1.2). Ce mélange est alors aspiré par des pompes centrifuges et refoulé via des canalisations ou chargé sur barge. Les volumes sont considérablement augmentés par la teneur en eau des déblais de dragages. En fonction de la nature des matériaux à draguer, le matériel peut être équipé des agrégateurs (cutter ou autre). La présence de macro-déchets en quantité importante peut rendre difficile la réalisation des dragages hydrauliques. Les matériels de dragages hydrauliques les plus courants sont :

- ✓ Dragues aspiratrices refoules stationnaires, adaptées aux matériaux meubles. Ces dragues refoulent un mélange de sédiments et d'eau par des canalisations sur des distances qui peuvent dépasser plusieurs kilomètres. Ces dragues peuvent être équipées d'un dés agrégateur : elles peuvent alors aspirer après les avoir fractionnés avec un « cutter » des matériaux cohérents, voire des roches tendres. En cas de refoulement à terre, le retour vers la mer des eaux chargées en sel est une contrainte technique forte.

- ✓ Dragues aspiratrices porteuses à élinde traînante, plus communément nommées « dragues aspiratrices en marche », notamment adaptées pour draguer des chenaux sans trop

perturber la navigation. Ces dragues s'auto-chargent, en vue de clapages en mer, parfois en vue de refoulement.



Drague aspiratrice refoule stationnaire

Drague aspiratrice en marche

Photo 1.2. La technique de dragage hydraulique [1]

1.4.2. Les dragages mécaniques :

La technique consiste à l'extraction des matériaux par un outil de préhension (benne ou godet de pelle) (Photo 1.3). Les volumes extraits sont donc proches des volumes en place, au coefficient de foisonnement près. Les dragages mécaniques peuvent être réalisés par voie maritime avec l'utilisation de ponton flottant, les déblais extraits étant alors transportés par barges ou chalands fendables, ou par voie terrestre, si la configuration du site s'y prête, l'évacuation des matériaux sera effectuée dans ce cas, principalement par camions. La présence de macro-déchets ne constitue pas un obstacle au recours à cette technique de dragages. On trouve principalement le type de matériel suivant :

- ✓ La drague à pelle qui s'apparente à une pelle mécanique montée sur un ponton.
- ✓ La drague à benne preneuse.



Drague à pelle



Drague à benne

Photo 1.3. La technique de dragage mécanique [1]

1.4.3. Les opérations de déroctage :

Ces opérations consistent en la fragmentation de la roche avant extraction des déblais ainsi produits (Photo 1.4). Lorsque le déroctage mécanique (brise-roche, trépannage, ...) n'est pas réalisable compte-tenu de la nature de la roche, il peut être fait recours à l'emploi d'explosifs. Les matériaux extraits sont principalement constitués de tout-venant pierreux en général non contaminés et donc valorisables ou capables sans difficultés majeures.

**Photo 1.4.** Opération de déroctage et dragage de sédiments [2]

1.4.4. Les dragages par agitation dits « à l'américaine » :

Les dragages dits « à l'américaine » consistent à remettre en suspension des sédiments meubles (par injection d'eaux sous pression ou par des moyens mécaniques) en vue d'une évacuation et d'une dispersion « naturelle » par les courants de marée, en général le jusant pour un transport vers l'extérieur du port (Photo 1.5).



Photo 1.5. La technique de dragage à l'américaine [3]

1.5. Caractéristiques des sédiments de dragage

La caractérisation qualitative et quantitative des sédiments (structure, propriétés physico-chimiques) est une opération indispensable pour l'orientation du choix de la méthodologie et des outils à mettre en œuvre pour leur éventuel traitement et par suite la détermination de leur destination finale (réutilisation ou dépôt, etc.).

1.5.1. *Caractéristiques physiques*

Cette caractérisation physique concerne certains paramètres d'état des sédiments à savoir : la teneur en eau, la teneur et en matières organiques, les limites d'Atterberg ainsi que les paramètres d'analyse granulométrique.

La détermination des propriétés physiques des sédiments permet d'aboutir à une classification utile pour les valorisations dédiées aux matériaux routiers ou en construction. Ces paramètres physiques et les propriétés chimiques sont des facteurs déterminants de tout programme de dragage, de transport et la mise en dépôt de matériaux de dragage, leur connaissance préalable est donc indispensable.

Ces sédiments sont constitués en grande partie des fines particules minérales avec quelques petits éléments de roche auxquelles sont mélangés des débris d'origine végétale et animale; Les particules proviennent de l'érosion des roches ou des sols et de leur transport sous des effets hydrodynamiques, ainsi que des rejets locaux dus à l'activité humaine. On retrouve ainsi dans la matrice sédimentaire des matériaux d'origine industrielle, domestique ou agricole dans des quantités variables (Photo 1.6).



Photo 1.6. Quelques exemples de sédiments dragués [4,5]

Les sédiments sont donc constitués de phase minérale, organique et liquide. Les paramètres physiques les plus importants dans toute étude de classification des sédiments sont résumés dans le tableau 1.4 ci-dessous.

Tableau 1.4. Paramètres physiques importants dans la classification des sédiments.

Paramètres physiques	Définitions
Teneur en eau (w)	Masse d'eau / Masse du sol sec
Siccité	Masse des particules solides / Masse totale
Porosité (n)	Volume des vides / Volume total
Indice des vides (e)	Volume des vides / Volume des particules solides
Degré de saturation (Sr)	Volume d'eau / Volume des vides
Masse volumique totale humide (ρ_h)	Masse totale / Volume total
Masse volumique sèche (ρ_d)	Masse sèche / Volume total
Indice de plasticité (Ip)	Différence entre les limites de liquidité et de plasticité

1.5.2. Caractéristiques minéralogiques :

L'analyse des minéraux présents dans les sédiments permet de mieux connaître le matériau, ces différents composés, sa pollution en vue d'identifier les minéraux susceptibles d'engendrer des problèmes pour la valorisation. L'identification minéralogique s'effectue de différentes manières :

- Observation à la loupe binoculaire
- Diffractométrie aux rayons X (DRX)
- Fluorescence aux rayons X (FX)
- Microscope électronique à balayage (MEB)

Les principaux éléments constituant les sédiments sont le quartz (SiO_2), les feldspaths (K, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et les minéraux argileux. Ces composés inorganiques sont le produit de l'érosion des roches et des sols du bassin versant, de particules de roche et d'argile ainsi que de composés minéraux tels (FeOOH , SiO_2 et CaCO_3) introduit dans l'eau ou qui sont formés par précipitation de composés dissous.

Les autres éléments présents en masse tels, l'aluminium et le fer, sont considérés de source géologique et dénués d'apports d'origine humaine (Mac Farlane, 2004).

1.5.3. Caractéristiques mécaniques

Il s'agit de la consolidation, la perméabilité, la rhéologie et la résistance mécanique, pour mesurer ces caractéristiques mécaniques.

Ces propriétés mécaniques dépendent de plusieurs paramètres à savoir : la distribution granulométrique, la teneur en eau et de la composition minéralogique. Elles sont donc indissociables des caractéristiques physiques.

1.5.3.1. Consolidation :

La consolidation permet de connaître l'évolution de la compressibilité au cours du temps des sédiments en site de stockage, aussi pour évaluer les capacités du matériau à recevoir des charges, et pour connaître le tassement en fin de consolidation et l'évolution dans le temps de la hauteur du dépôt.

1.5.3.2. Perméabilité :

Elle permet de connaître les propriétés de filtration et de drainage des matériaux de dragages. La perméabilité des sédiments varie au cours du processus de consolidation selon

les modalités de mise en dépôt à terre ou sous l'eau.

1.5.3.3. Rhéologie :

En sédimentologie, ces études rhéologiques portent principalement sur la définition de la viscosité et de la rigidité initiale, on détermine à l'aide d'un viscosimètre trois paramètres (Mac Farlane, 2004) :

- La rigidité initiale
- La viscosité dynamique relative
- La viscosité dynamique absolue

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques généralités sur la composition et les techniques de dragage des sédiments ainsi que leurs caractéristiques physiques, minéralogiques et mécaniques.

Ces sédiments de dragage, sont des matériaux qui posent effectivement problème, car ils sont souvent pollués, et l'obligation de leur dragage engendre la question de leur devenir. On doit noter que, quelques soient les voies de valorisation, le traitement des sédiments est obligatoire et doit satisfaire aux exigences environnementales, économiques et techniques

**Chapitre 2 : Connaissances sur l'envasement des
retenues de barrages**

2.1. Introduction :

L'envasement et le transport solide constituent, de part leurs importances, un problème majeur dans les pays du monde. L'érosion, le transport solide et la sédimentation sont la cause de la dégradation des sols agricoles, de l'alluvionnement des retenues et de nombreux dégâts dont les coûts sont considérables.

Ces pertes en sols des terres, leur transport et sédimentation dans les infrastructures hydrauliques, hydro-agricoles, portuaires, etc., ont ramené les décideurs à examiner de plus près cette problématique, vu son ampleur et les conséquences qu'elle engendre face aux changements climatiques réponsus ces dernières années.

À travers de ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur cette problématique d'envasement des retenues de barrages maghrébins en général et algériens en particulier.

2.2. Processus d'envasement des barrages dans le Monde

2.2.1. Envasement d'un barrage

Le processus de l'envasement d'un barrage débute dans la première phase par l'arrachage des particules fines de leurs positions initiales par le ruissèlement. Dans la seconde phase, les sédiments seront drainés par les cours d'eau jusqu'au barrage. Enfin dans la troisième partie, les particules seront piégées pour se décanter et se tasser au fond du lac du barrage (Figure 2.1).

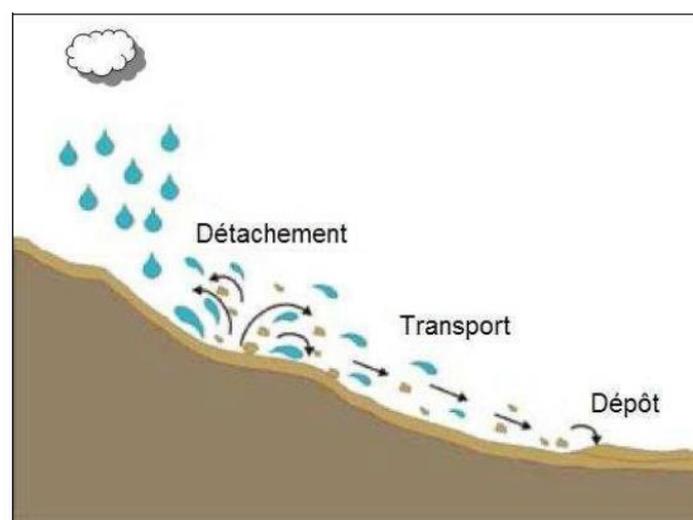


Figure 2.1. Processus d'envasement d'un barrage (Djenaoui et Chatta, 2016)

Même si elle n'est pas la seule (vent, glacier, etc.), l'eau joue un rôle majeur dans le transport des produits issus de l'érosion. Le lit des cours d'eau naturels est ainsi constamment formé et déformé par les sédiments en mouvement (cycle érosion-transport-sédimentation). Ce transport de sédiment, nommé « transport solide » ou « transit sédimentaire » s'effectue principalement par charriage et suspension.

Le transport par charriage concerne essentiellement les éléments grossiers qui se déplacent sur le fond du lit par roulement, glissement ou saltation. La suspension est le transport des sédiments fins dans la masse du flot. Dans un système fluvial naturel, érosion, transport et dépôt de sédiments sont en équilibre dynamique, les cours d'eau ajustant ainsi continuellement leur pente, leur largeur, leur profondeur, leur sinuosité, etc. (Figure 2.2).

La construction d'un obstacle à l'écoulement (barrages, seuils, etc.) va inévitablement rompre cet équilibre avec comme effets directs un engravement du lit à l'amont et un affouillement à l'aval. Ces dysfonctionnements sont non seulement lourds de conséquences sur la morphologie des systèmes fluviaux mais aussi sur la biodiversité des milieux aquatiques.

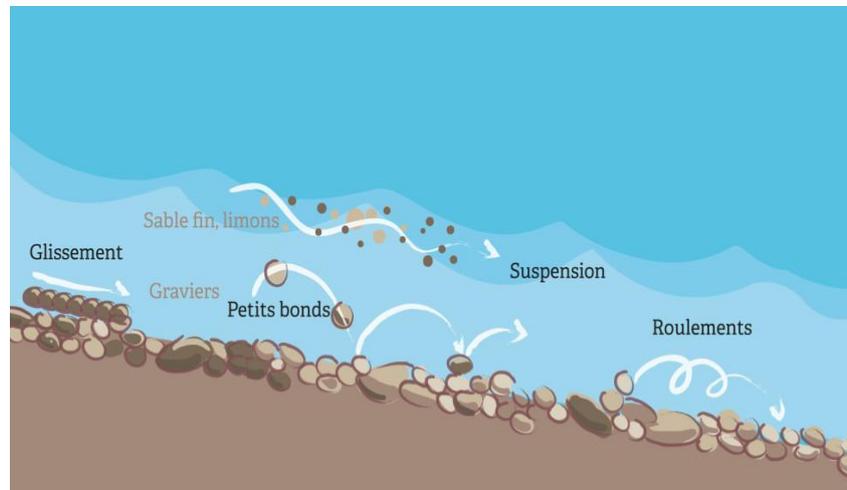


Figure 2.2. Modes de transport des sédiments dans un cours d'eau (Bouزيد, 2005)

Le taux de sédimentation a évolué ces dernières années, du fait de la forte érosion des bassins versants. Au début des années quatre vingt, environ 120 millions de tonnes de sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versants du nord Algérien (Demmak, 1982).

Une partie de cette masse se dépose dans les 74 barrages que détient l'Algérie où 20 barrages sont gravement menacés par le phénomène de l'envasement (Figure 2.3). D'une capacité totale de 2372 millions de m³, plus de 1148 millions de m³ de sédiments drainés par

les crues sont actuellement déposés au fond de ces 20 barrages. Soit un taux de comblement de 48% de la capacité totale (Remini, 2017).

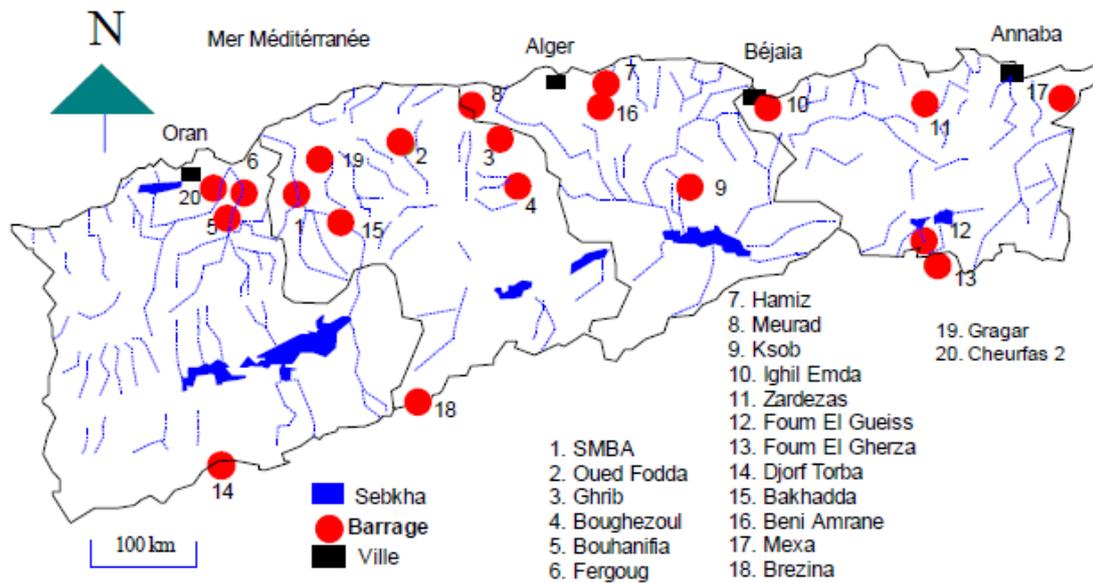


Figure 2.3. Carte des barrages algériens les plus envasés (Remini, 2017)

L'érosion des bassins versants est très répandue dans la région du Maghreb, puisque toutes les conditions sont réunies pour déclencher et développer un tel processus (Figure 2.4) : les irrégularités climatiques, la faible densité du couvert végétal, la nature des sols qui est peu résistante à l'écoulement et la violence des crues (Remini, 2011).

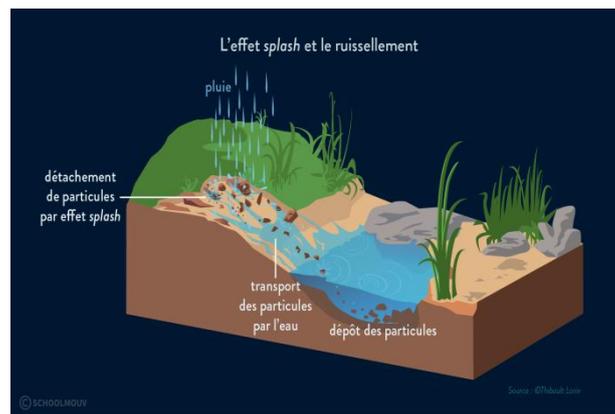


Figure 2.4. Erosion d'un bassin versant

Remini et Hallouche, 2004 ont donnée une conception sur les pertes de capacité de quelques barrages dans le monde en général et les pays du Maghreb en particulier, dues au phénomène d'envasement (Tableau 2.1):

Tableau 2.1. 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	Ksob — Cheurfa -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

2.3. Processus d'envasement des barrages dans le Maghreb

2.3.1. 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.

Le Tableau 2.2 donne un aperçu sur les caractéristiques d'envasement des barrages de Tunisie (Ben Mammou et Louati, 2007).

Tableau 2.2. Caractéristiques d'envasement des barrages en Tunisie (Ben Mammou et Louati, 2007).

Barrages de Tunisie	Superficie du B.V (km ²)	Année mise en service	Capacité initiale (Mm ³)	Année des campagnes de mesure de l'alluvionnement.	Évolution d'alluvionnement. (Mm ³)	Alluvionnement moyen. (Mm ³ /an)
El Kébi	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	2 2,3 3,3	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.Mcherga	1 263	1971	53	1987, 1994, 2002	6,2 7,1 11,4	0,29 0,37 0,35
B. Heurtma	390	1976	117,5	1993	2	0,13
Sidi Saad	8 950	1981	209	1988, 1993, 2000	6,9 28,9 55,2	0,98 2,41 2,9
Sidi Salem	7 950	1981	814	1987, 1989, 1991, 1998, 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	1 040	1987	70	1994, 2002	4,1 16,9	0,63 1,05
El Houareb	1 120	1989	43 95,3	1994, 1998	8,18 13,3	1,48 1,33
Sejnane	367	1994	137,5	2002	2,7	0,5

2.3.2. 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 2.3).

Tableau 2.3. 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 1er	3680	1973	1217	2.15	3200
Ben elouidane	6400	1953	1484	3,60	870
Hassan addakhil	4400	1971	369	1.0	260
Mansour eddahbi	15000	1972	567	2.2	210
Al massira	28500	1979	2724	7,5	375
El kansra	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	9800	1971	493	0.51	200
abdellah Abdelmoumen	1300	1981	216,3	0.8	200

2.4. Processus d'envasement en Algérie

Le phénomène d'envasement des barrages en Algérie s'est accéléré à partir des années 2000 où 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 (Photo 2.1).



Barrage envasé de Merdja Sidi Abed (Relizane). La capacité a diminué de 14% de 1984 à 2000 (Remini, 2003)



Envasement du barrage d'Ighil Emda (Remini et Bensafia, 2016)



Comblement total d'un petit barrage sur l'oued Chellif (Remini et Bensafia, 2016)



Barrage de Fergoug envasé à plus de 90 % de sa capacité en 2008 (Ledjilot et Mazari, 2018)

Photo 2.1. Cas d'exemples de barrages algériens envasés.

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 2.4).

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 arrachés annuellement au niveau des bassins versants du Nord Algérien (Figure 2.5). 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 2.4. 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	19 740	1934	55	1934/1986	0,570	20,38	62,94
Ghrib	23 300	1939	280	1939/1986	2,49	138,57	50,51
Oued Fedda	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
Zardazas	346	1936	31	1977/1986	0,450	14,78	52,32
Lacheffia	575	1965	171	1965/1986	0,124	168,4	1,52

Ksob	1470	1977	31	1977/1986	0,395	12,43	59,90
Foum El Gherza	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	1998	0.89	7.1 (1998)	5.5
Fergoug III	8274	1970	18	1970/1986	0,881	3,9	78,33
Djrof el Torba	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

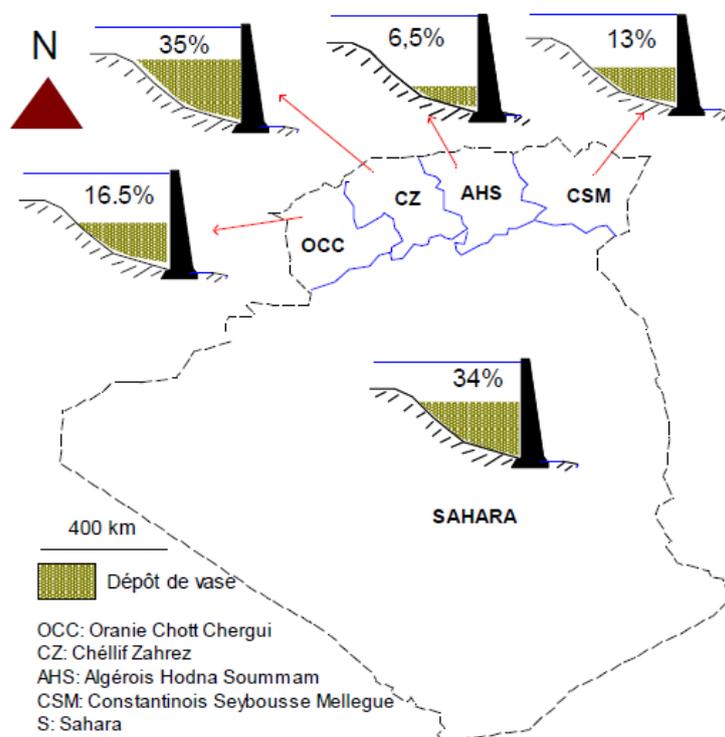


Figure 2.5. Taux de comblement des barrages en 2014 suivant les bassins hydrographiques (Remini, 2017)

2.5. Conclusion

Le phénomène d'envasement a un impact significatif et négatif sur tous les pays du monde, y compris les pays du Maghreb, et s'est accéléré à un rythme énorme au Maghreb depuis 2000. Par conséquent, les scientifiques s'attendaient à dépasser les 150 millions de m³ en 2030 dans les barrages marocains, mais pour les barrages tunisiens, ils pourraient perdre 43% en 2030.

Grâce à ces statistiques et projections, nous avons constaté que les sédiments dans les pays du nord du continent africain sont élevés et augmentent dans de grandes proportions, ce qui entraîne une augmentation des taux d'érosion y compris l'épuisement des particules solides par les courants, qui à leur tour s'accumulent pour produire des réservoirs de courants de densité.

L'absence de sites favorables à la réalisation de grands barrages en Algérie, nécessite l'entretien des barrages existants. Une vingtaine de ces barrages existants sur les 74 grands barrages en exploitation sont menacés de comblement et nécessitent un dévasement urgent.

Cependant, le rejet des sédiments obtenus par dragage de ces retenues envasées pose d'énormes problèmes écologiques et environnementaux. Ceci incite à réfléchir sur la réutilisation et la valorisation de ces sédiments dragués dans les domaines de la construction.

**Chapitre 3 : Exploitation des sédiments en
domaine routier**

3.1. Introduction

Parmi les différents secteurs du génie civil, le domaine routier est un grand consommateur de matériaux, l'absence sur les différents matériaux sévère sur leurs utilisations dans la conception routière. Pour cela, il serait l'introduire des éléments issus de déchets de dragage comme les sédiments dragués des retenues de barrages dans la conception des ouvrages et infrastructure routières (Route, Autoroute...).

Dans ce chapitre, nous présentons une description des différents éléments constitutifs d'une structure de chaussée routière ainsi que les principaux paramètres adoptés pour la caractérisation et classification des sédiments selon le guide des terrassements routier.

3.2. Description d'une structure de chaussée

Le rôle d'une chaussée est de reporter sur le sol support, en les répartissant convenablement, les efforts dus au trafic (Figure 3.1). La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation. Comme la pression dans la couche granulaire décroît régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couches de caractéristiques mécaniques croissantes.

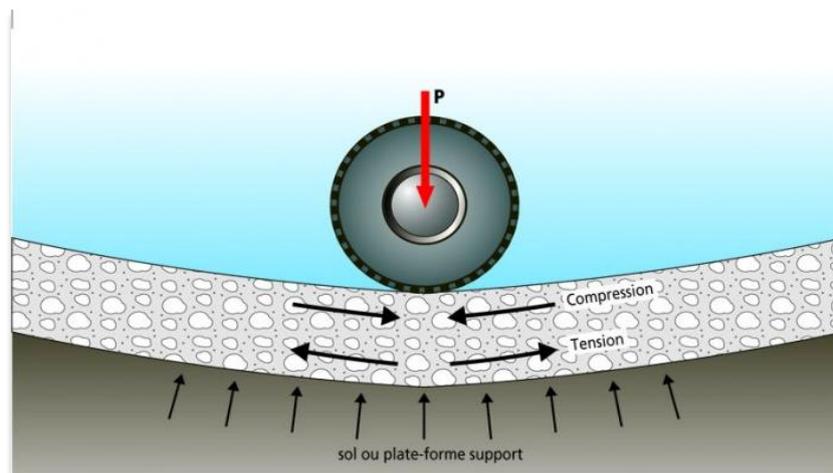


Figure 3.1. Répartition des charges dans une structure de chaussée [6]

C'est ainsi que la structure d'une chaussée routière est composée de plusieurs couches empilées, dont généralement celle sur laquelle circulent les véhicules est visible (Figure 3.2). Mais en fait, jusqu'à quatre couches il y a une couche intermédiaire dite «couche de forme» qui transmettent les efforts induits par le trafic jusqu'au sol support.

- **Au sens géométrique** du terme c'est la surface aménagée de la route, sur laquelle circulent normalement les véhicules.
- **Au sens structural**: Elle est l'ensemble des couches de matériaux disposées sur le terrain préparé et devant supporter la circulation des véhicules. Elle comprend les largeurs des différentes couches.

Le rôle de la chaussée est donc de supporter des charges roulantes, notamment les charges lourdes constituées par les poids lourds. Ces charges agissent par pressions à la surface de la chaussée, et sont transmises par son intermédiaire jusqu'au sol support.

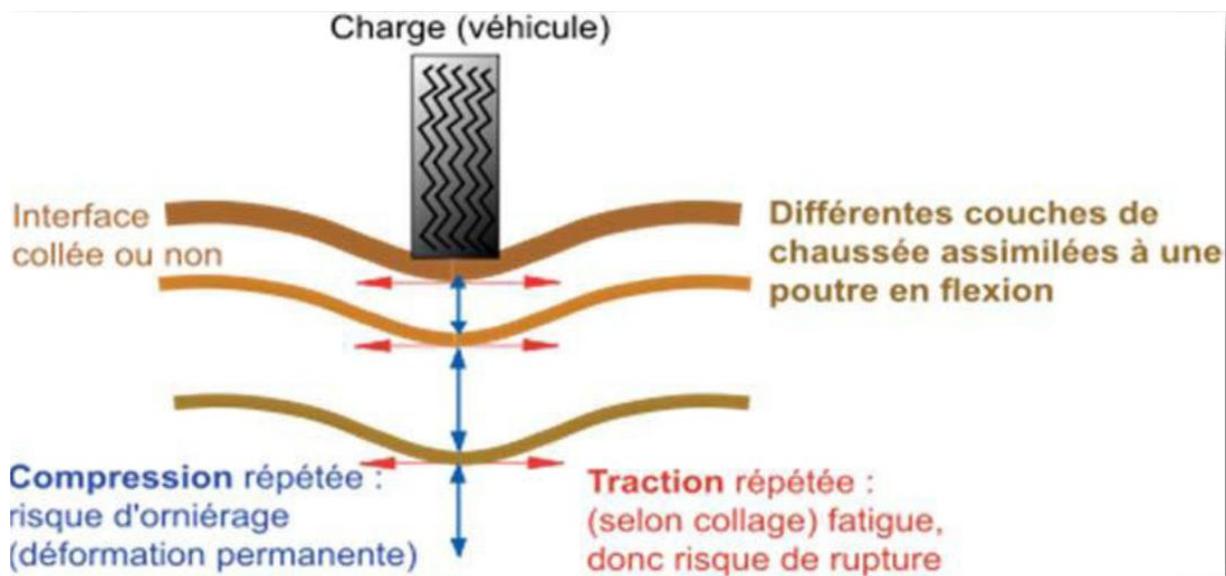


Figure 3.2. Fonctionnement d'une structure de chaussée sous une charge roulante [7]

3.2.1. Différentes couches d'une chaussée

À partir de la plate forme de terrassement, c'est-à-dire le fond de route, la structure routière se compose d'une partie "terrassement" et d'une partie "chaussée".

La partie terrassement comprend la plate forme support, et éventuellement un remblai de complément selon le profil en long recherché, ainsi qu'une couche de forme.

La partie chaussée, comprend trois (03) couches différentes où chaque couche a différentes fonctions (Figure 3.3) :

- **Couche de surface**: Elle est composée de deux couches, la couche de roulement qui est la couche supérieure où s'appliquent les actions du trafic et du climat et la couche de liaison qui lie la couche d'assise et qui assure la protection vis-à-vis des infiltrations des eaux et des sels et les pollutions en surface.

- **Couche d'assise** : Elle comprend deux sous-couches, la couche de fondation et la couche de base. Ces couches de la chaussée sont les plus importantes pour supporter la résistance mécanique et la déformation dans une limite admissible.
- **Couche de forme** : Pendant les travaux, elle contribue au nivellement du sol et garantit le déroulement du chantier. Elle permet d'homogénéiser les caractéristiques du sol support et de contrer le gel.

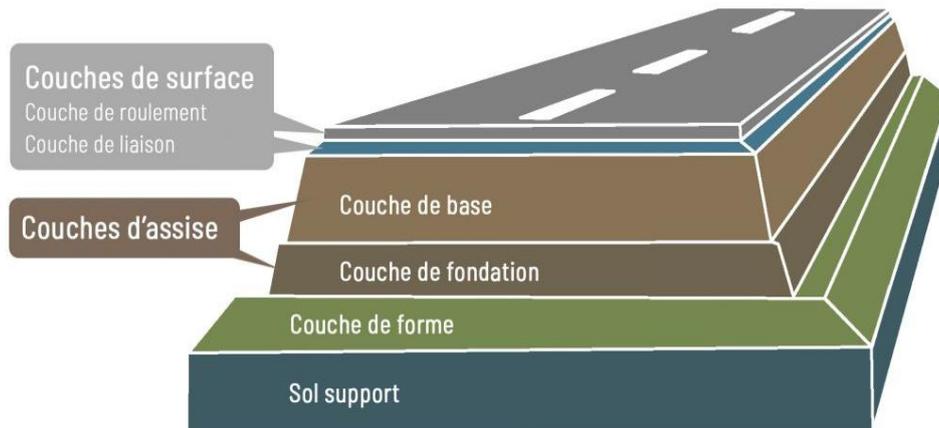


Figure 3.3. Les différentes couches constitutives d'une chaussée routière [8]

3.2.2. Types de structure de chaussée :

Selon le fonctionnement mécanique et la nature des matériaux utilisés dans les couches de chaussées, on distingue six (06) grandes familles de structure de chaussée (ajouter ici la référence bibliographique) :

1. Chaussée souple

C'est une chaussée de très faible rigidité, fortement dépendante de celle du sol et de ses variations. Les efforts verticaux sont transmis au support avec une faible diffusion latérale. Les matériaux utilisés dans la structure sont les graves bitumes et les graves non traitées (GNT). La structure d'une chaussée souple se compose de (Figure 3.4) :

- 1) Une couche de surface en matériaux bitumineux.
- 2) Des matériaux bitumineux d'assise ≤ 15 cm.
- 3) Des matériaux granulaires non traités (20 à 50 cm).
- 4) Une plate-forme support.

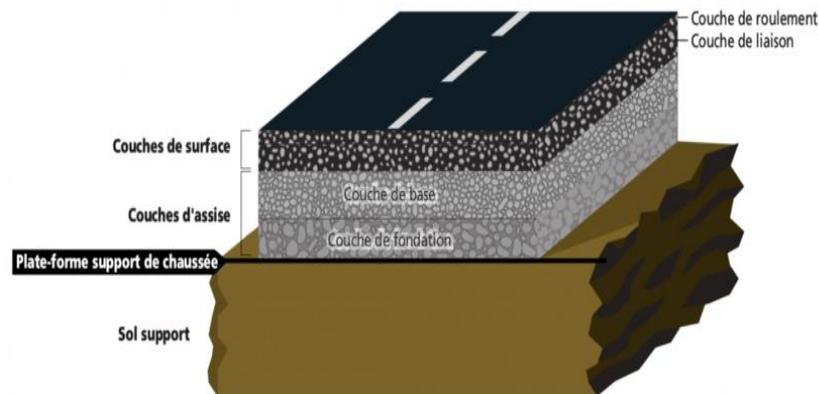


Figure 3.4. Structure d'une chaussée souple

2. Chaussée bitumineuse épaisse

Cette chaussée comporte une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, faite d'une ou de deux couches (base et fondation). La structure d'une chaussée bitumineuse épaisse se compose de (Figure 3.5) :

- 1) Une couche de surface en matériaux bitumineux.
- 2) Des Matériaux bitumineux d'assise (15 à 40cm).
- 3) Une Plate-forme support.

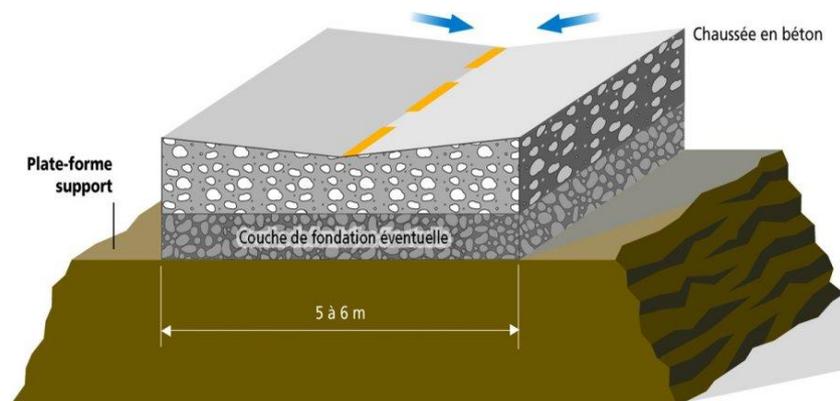


Figure 3.5. Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse.

3. Chaussée semi-rigide

Elle comporte une couche de roulement bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposées en une ou deux couches dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm.). La structure d'une telle chaussée se compose de (Figure 3.6) :

- 1) Une couche de surface en matériaux bitumineux (6 à 14 cm).
- 2) Des matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 50cm).
- 3) Une plate-forme support.

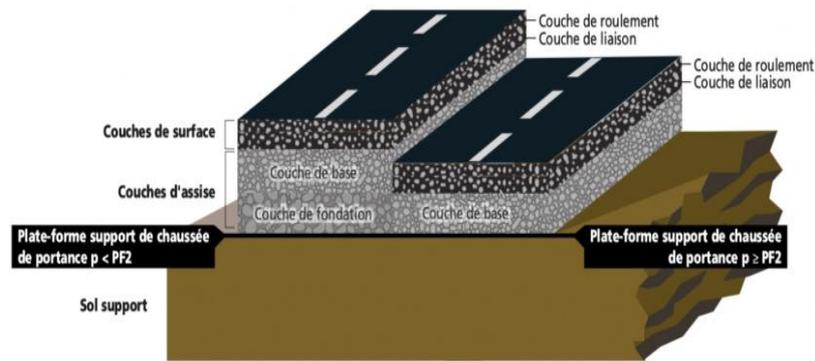


Figure 3.6. Structure d'une chaussée semi-rigide.

4. Chaussée rigide

Cette chaussée comporte une couche en béton de ciment de 15 à 40 cm, recouverte par un béton bitumineux très mince, reposant soit sur une fondation, soit directement sur le support sur béton bitumineux. La structure d' une telle chaussée se compose de (Figure 3.7) :

- 1). Une dalle en béton armé continu.
- 2). Un béton maigre ou béton bitumineux.
- 3). Une plate-forme support.

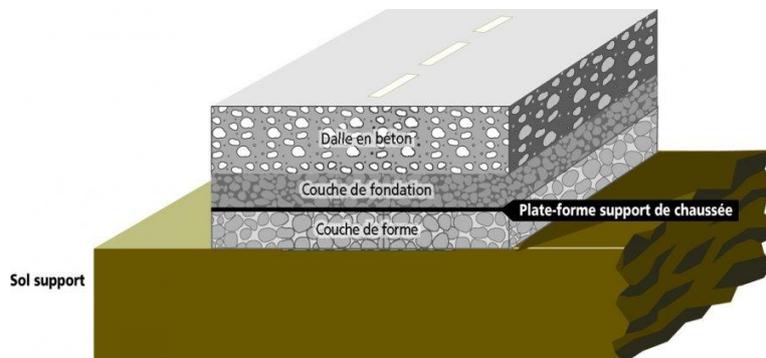


Figure 3.7. Structure d'une chaussée rigide.

5. Chaussée à structure mixte

Cette chaussée comporte une couche de roulement et de base en matériaux bitumineux d'une vingtaine de cm, sur une fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. La structure d'une telle chaussée se compose de (Figure 3.8) :

- 1). Une couche de surface en matériaux bitumineux.
- 2). Des matériaux bitumineux d'assise (10 à 20cm).
- 3). Des matériaux traités aux liants hydrauliques.
- 4). Une plate-forme support.

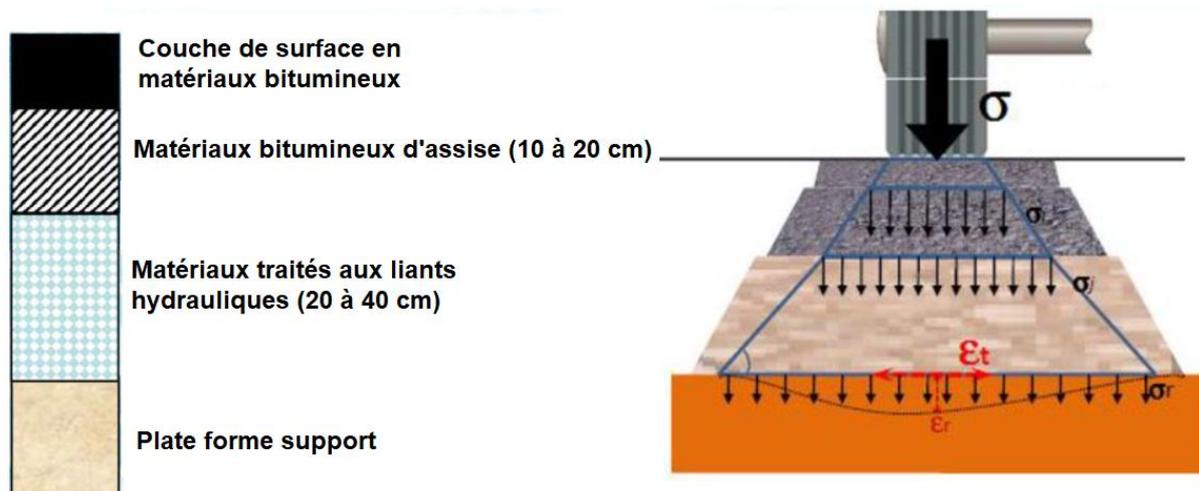


Figure 3.8. Structure d'une chaussée à structure mixte.

6. Chaussée à structure inverse

Cette chaussée associe une structure bitumineuse et semi rigide dont l'interface est constituée de grave non traité destinée à empêcher la remontée des fissures transversales de retrait. Les matériaux utilisés dans la structure inverse sont: Grave non traitée, grave bitume et grave traitée aux liants hydrauliques. La structure d' une telle chaussée se compose de (Figure 3.9) :

- 1). Une couche de surface en matériaux bitumineux.
- 2). Des matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm).
- 3). Des matériaux granulaires non traités (environ 12 cm).
- 4). Des matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 50 cm).
- 5). Une plate-forme support.

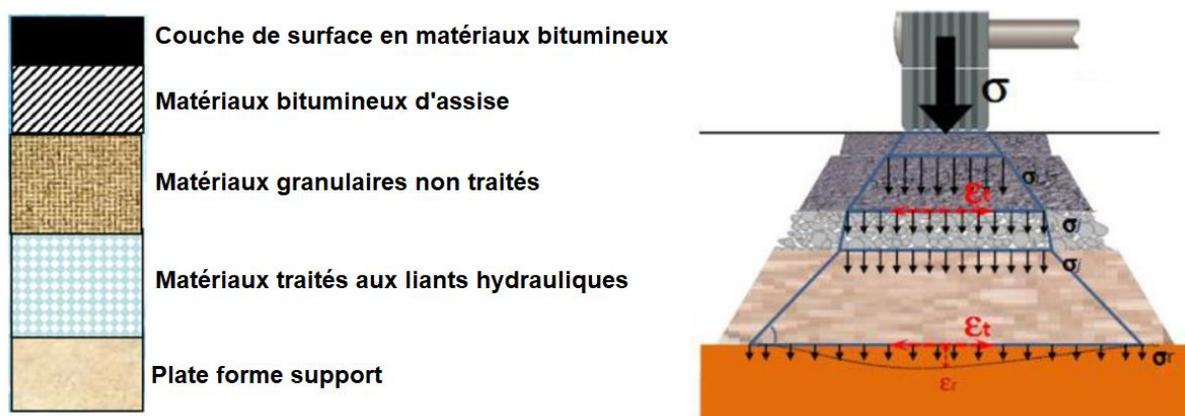


Figure 3.9. Structure d'une chaussée à structure inverse.

3.2.3. Dimensionnement d'une chaussée

Le dimensionnement d'une structure de chaussée routière consiste à déterminer la nature et l'épaisseur des couches qui la constituent afin qu'elle puisse résister aux diverses agressions auxquelles elle sera soumise tout au long de sa vie. La structure d'une chaussée routière doit résister à diverses sollicitations, notamment celles dues au trafic et elle doit assurer la diffusion des efforts induits par ce même trafic dans le sol de fondation.

a. Démarche de dimensionnement d'une chaussée

La démarche de dimensionnement reste sensiblement la même quelle que soit la technique de chaussée. Cette démarche est basée sur les étapes suivantes :

1. Choisir la couche de roulement puis établir un pré-dimensionnement de la structure.
2. Elaborer une modélisation de la structure où il s'agit de la présentation de l'empilement de la chaussée puis le calcul des contraintes et des déformations.
3. Vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support où les contraintes et les déformations calculées doivent être inférieures aux valeurs admissibles.
4. Ajustement des épaisseurs calculées en vue de :
 - Tenir compte des contraintes d'épaisseur minimale et maximale pour atteindre les objectifs de compacité.
 - Minimiser les risques de défauts de collage aux interfaces.
 - Protéger les assises traitées de la remontée des fissures.
5. Vérification de la tenue au gel-dégel.

3.3. Critères de classification des sédiments dans les travaux routiers

Ces dernières années, les besoins en matériaux du BTP (Bâtiment et Travaux Publics) en Algérie se sont élevés, et beaucoup de granulats restent inexploitable. Pour être valorisés en technique routière, les sédiments doivent donc respecter des règlements plus exigeants. Dans cette partie, nous présentons les critères et les raisons qui ont amené à explorer les possibilités de valorisation des sédiments dans les travaux routiers.

Les principaux paramètres jugeant l'adéquation d'un sédiment pour une utilisation en assise de chaussée sont (Bourabah 2012, Abriak et Grégoire, 2003) :

1. Le critère de granulométrie.
2. Le critère de portance et de durabilité.
3. Le critère de la classe de résistance mécanique.
4. Le critère d'aptitude au traitement.

3.3.1. Critère de granulométrie

La granulométrie et la proportion en matières organiques représentent les facteurs clés de l'utilisation des sédiments en technique routière. Il est préférable que la proportion de sédiments ne soit pas voulue majoritaire afin d'opter à une couche de sol ayant un squelette granulaire constitué d'une matrice résistante à granulométrie étalée, et limiter les matières organiques et les éléments fins pour leur sensibilité à l'eau.

3.3.2. Critère de portance

La portance du matériau est caractérisée par son indice portant immédiat (IPI) qui permet d'évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins.

Ce paramètre est déterminé à partir de l'essai Proctor Modifié selon la norme française (**NF P 94-078, 1999**). Selon les valeurs de cet indice de portance (**IPI**), les caractéristiques des différentes couches sont présentées dans la figure 3.10, qui d'après les recommandations de la norme française (**NF P98-115, 1992**). Les valeurs souhaitables de l'**IPI** ne doivent pas être inférieures à **25%** pour la couche de forme, **35%** pour la couche de fondation et **45%** pour la couche de base.

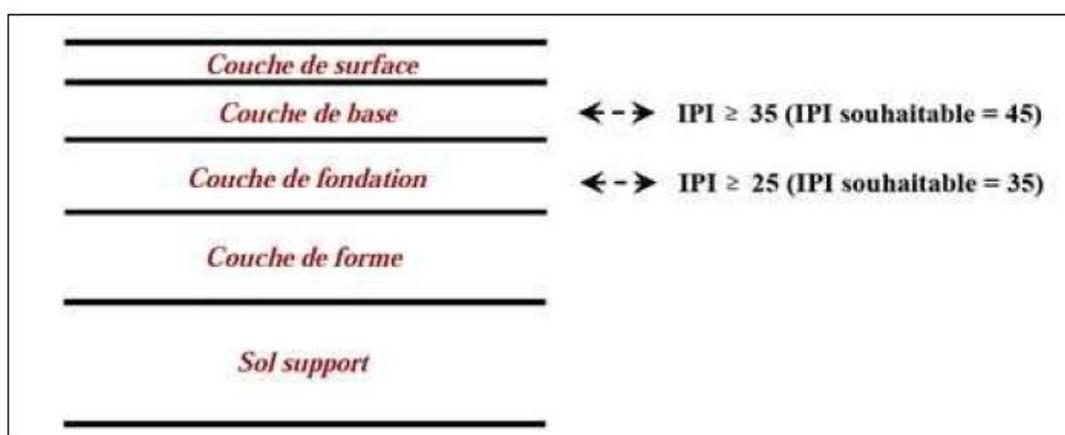


Figure 3.10. Paramètres de portance immédiate (IPI) souhaitées pour les différentes couches d'une structure routière.

3.3.3. Critère de durabilité au jeune âge

Afin de déterminer la durabilité du traitement ainsi que le comportement de la couche en cas d'immersion aux jeunes âges. Le paramètre (ICBR immersion 4jours / IPI) est essentiel à vérifier car lorsqu'un sol fin est saturé en eau, il peut perdre totalement sa cohésion, notamment si le liant n'a pas débuté sa prise. La durabilité est jugée satisfaisante si ce paramètre (ICBR immersion 4jours / IPI) est supérieur à 1.

3.3.4. Critère de résistance

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, le module d'élasticité et la résistance en traction sont mesurés grâce à l'essai de traction. Ces valeurs sont ensuite reportées sur le diagramme de classification afin d'évaluer la stabilité du matériau. La norme française [Norme NF P 98 113] a cité les 6 classes de résistance de S0 à S5 (Figure 3.11), où il est recommandé que les matériaux de classe inférieure à S2 ne soient pas utilisables en couche d'assise de chaussée.

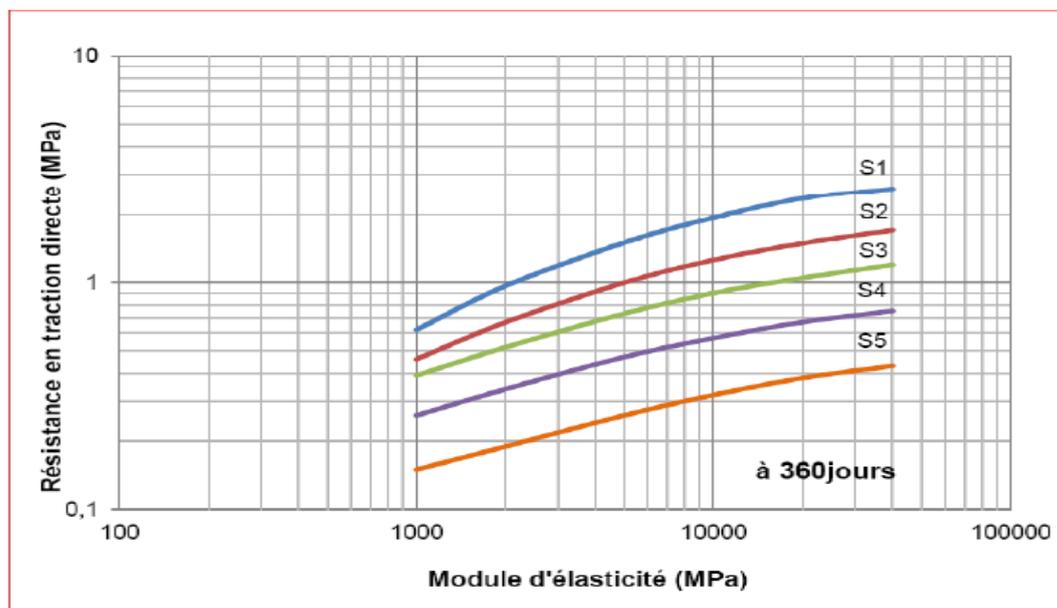


Figure 3.11. Diagramme de classification d'une couche d'assise de chaussée selon sa classe mécanique.

En général, la classification des matériaux est effectuée en raison de la valeur de la résistance en traction à 360 jours. Si la période ne permet pas de mesurer la résistance en traction à 360 jours et le module d'élasticité, on peut obtenir la résistance en traction et le module

d'élasticité à 28 jours ou 90 jours. La résistance en traction et le module d'élasticité à 360 jours sont déterminés à partir des équations empiriques suivantes :

$$\frac{R_{t \text{ 28 jours}}}{R_{t \text{ 360 jours}}} = 0,60$$

$$\frac{E_{t \text{ 28 jours}}}{E_{t \text{ 360 jours}}} = 0,65$$

$$\frac{R_{t \text{ 90 jours}}}{R_{t \text{ 360 jours}}} = 0,70$$

$$\frac{E_{t \text{ 90 jours}}}{E_{t \text{ 360 jours}}} = 0,75$$

3.3.5. Critère d'aptitude des liants au traitement

L'essai d'aptitude au traitement, décrit dans la norme française [NF P94-100], consiste à la détermination du gonflement volumique (Gv) et de la résistance à la traction (Rtb) du sol traité de liants hydrauliques qui doit être mesuré après 7 jours de délais de conservation à une température de 20°C et à plus sur des échantillons immergés dans une eau thermostat.

Le tableau 3.1 indique les valeurs seuils retenues pour le choix des matériaux en structure routière selon ce critère.

Tableau 3.1. Critère d'aptitude au traitement pour la classification des matériaux traités aux liants hydrauliques [Norme NF P94-100].

Type de traitement	Aptitude du matériau au traitement	Paramètre considéré		
		Gonflement volumique GV (%)		Résistance a la traction R tb (MPa)
Traitement au liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	Adapté	$GV \leq 5$	Ou	$R_{tb} \geq 0.2$
	Douteux	$5 \leq GV \leq 10$	Ou	$0.1 \leq R_{tb} \leq 0.2$
	Inadapté	$GV \geq 10$	Ou	$R_{tb} \leq 0.1$
Traitement à la chaux seule	Adapté	$GV \leq 5$	Paramètre non considéré du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique.	
	Douteux	$5 \leq GV \leq 10$		
	Inadapté	$GV \geq 10$		

Le tableau 3.2 suivant résume les différents essais que nous venons de présenter sur les critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de structure routière.

Tableau 3.2. Récapitulatif des différents essais et critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de structure routière.

Propriété considérée	Grandeur caractéristique	Exigence ou critère de Jugement
Aptitude au traitement Gonflement	Gonflement volumique Gv d'éprouvettes immergées pendant 7 jours dans de l'eau à 40°C	Gv ≤ %5 : adapté 5 ≤ Gv % ≤ 10 : douteux Gv ≤ 10 % : inadapté
Aptitude au traitement : Performance mécanique	Résistance en traction brésilienne Rtb d'éprouvettes immergées pendant 7 jours dans de l'eau à 40°C	Rtb ≥ 0,2 MPa : adapté 0,2 MPa ≥ Rtb ≥ 0,1 MPa : douteux Rtb ≤ 0,1 MPa : inadapté
Portance et durabilité	Poinçonnement immédiat (IPI) et après 4j d'immersion (ICBR) sur une éprouvette compactée dans un moule CBR	ICBR / IP ≥ 1
Gonflement de la couche traitée	Mesure du gonflement vertical lors de l'immersion pendant 4 jours de l'essai CBR	Comparatif entre les différents liants
Cinétique de prise	Evolution de la résistance en compression Rc jusqu'à 90 jours de maturation	Comparatif entre les différents liants
Age autorisant la circulation sur la couche traitée	Résistance à la compression Rc	La couche de forme peut être circulée dès que Rc ≥ 1 MPa
Performances mécaniques	Résistance en traction Rt (estimée à partir de la résistance en traction brésilienne Rtb) et module élastique E à 28 et 90 jours	Le couple (Rt, E) conduit au minimum à un matériau de classe mécanique 5

3.4. Caractérisation et classification des sédiments selon le guide des terrassements routier (GTR)

L'utilisation d'un matériau en couche de chaussée nécessite la connaissance de ses propriétés physiques et géotechniques. La classification peut se faire selon différentes approches :

3.4.1. Définition du guide des terrassements routier (GTR)

Ce guide de 1992, réédité en 2000, couramment appelé « guide GTR », définit les conditions d'emploi des matériaux en remblai et en couche de forme. Il se présente en deux fascicules :

Le premier fascicule « principes généraux » contient quatre chapitres :

- 1- Classification des matériaux utilisés (sols, matériaux rocheux, sous produits industriels).
- 2- Conditions d'utilisation en remblai (extraction, actions sur la granularité, actions sur la teneur en eau, réglage, compactage, hauteur des remblais).
- 3- Condition d'utilisation en couche de forme (conception, matériaux, dimensionnement, classes net plate-forme pour le dimensionnement de la structure de la chaussée).
- 4- Compactage des remblais et de couche de forme (prescription, matériaux, compacteur, règle de compactage).

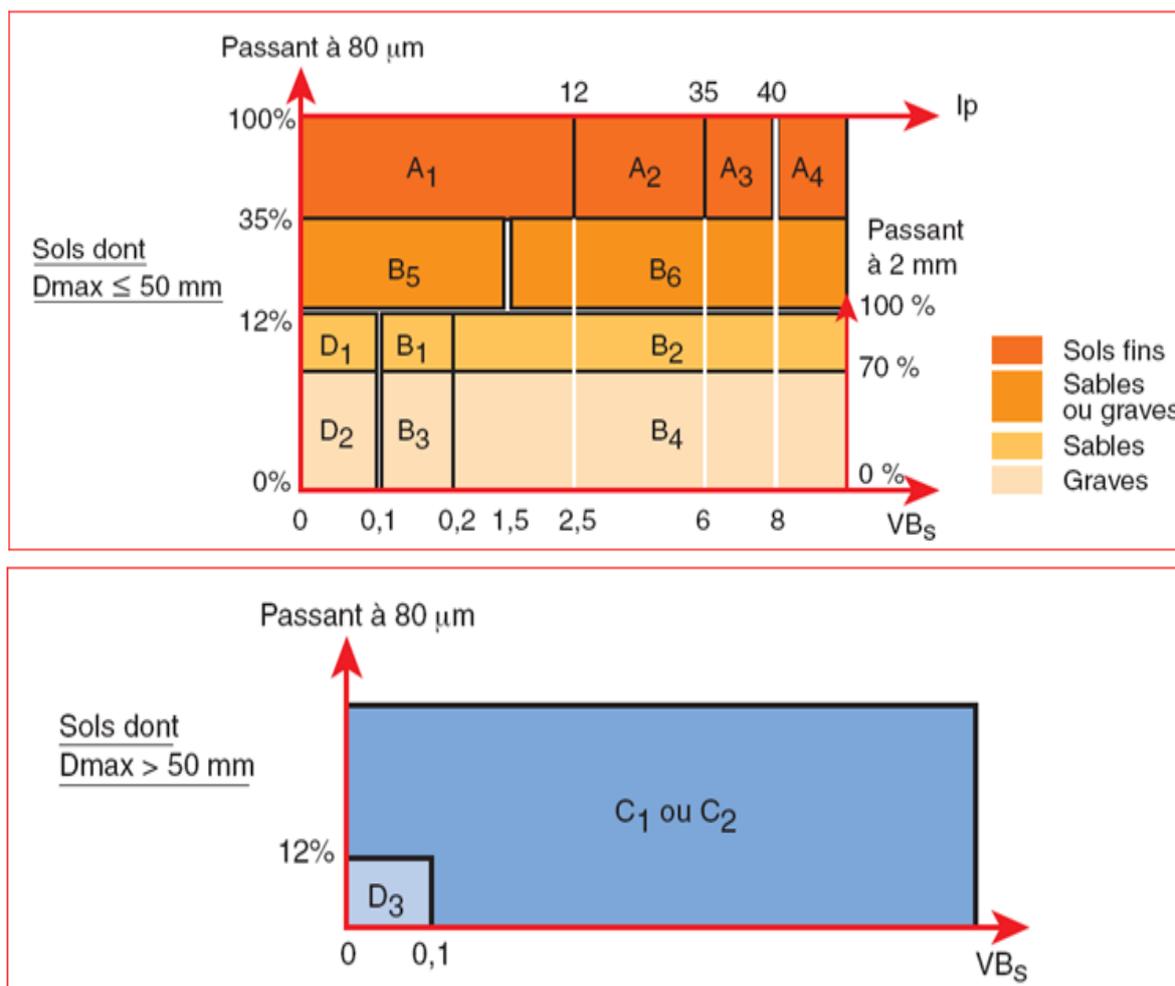
Le deuxième fascicule « annexes techniques » partie véritablement opérationnelle, est constituée de quatre annexes :

- Tableaux des classifications des matériaux utilisés pour la construction.
- Tableaux des conditions d'utilisation du matériau en remblai.
- Tableau des conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme.
- Compactage des remblais et de couche de forme (conditions de compactage, tableau de compactage).

3.4.2. Classification selon le guide des terrassements routier (GTR) :

La représentation synoptique de la figure 3.12 offre une bonne compréhension de la classification en fonction des paramètres géotechniques suivants :

- Indice de plasticité du sol (IP)
- Valeur au bleu de méthylène du sol (VBS)
- Seuil de granulométrie du sol (passants à 80 µm et à 2 mm)



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R_1
			Calcaires	R_2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R_3
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R_4
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R_5
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R_6
Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels			F

Figure 3.12. Représentation synoptique de la classification des matériaux selon le guide des terrassements routier GTR (2000)

Ce guide technique (GTR) utilise trois types de paramètres pour classer un sol :

- Les paramètres de nature.
- Les paramètres de comportement mécanique.
- Les paramètres d'état.

1. Les paramètres de nature

Il s'agit de définir les caractéristiques intrinsèques des sols où deux paramètres caractérisent la nature d'un sol (Figure 3.12) :

a. La granularité

L'étude est basée sur trois grandeurs issues d'une analyse granulométrique :

- **La valeur du Dmax** : dimension des plus gros granulats
 - de 50 mm : sols fins, sableux et graveleux (classes A, B, D1 et D2)
 - + de 50 mm : sols blocailleux (classes C et D3)
- **La valeur du tamisât à 0,08 mm**
 - + de 35 % : sols fins de type A ; ils peuvent être considérés comme régis par celui de la fraction fine ($\leq 80 \mu\text{m}$).
 - de 35 % et + de 12% : sols sableux et graveleux riches en fines (classes B5 et B6).
 - de 12 % : sols sableux et graveleux pauvres en fines (classes B1 à B4, D1 et D2).
- **La valeur du tamisât à 2 mm**
 - de 70 % : sols à tendance graveleuse (B3, B4 et D2).
 - + de 70 % : sols à tendance sableuse (B1, B2 et D1).

b. L'argilosité

L'étude est basée soit sur la valeur de l'indice de plasticité (I_p) du sol, soit sur la valeur au bleu de méthylène see (VBS). Le guide GTR propose dans de nombreux cas de se référer à l'indice de plasticité, mais l'évolution des techniques d'essai conduit généralement à mesurer la valeur au bleu.

- **Indice de plasticité I_p :**

$I_p \leq 12$: sols faiblement argileux,

$12 \leq I_p \leq 25$: sols moyennement argileux,

$25 \leq I_p \leq 40$: sols argileux et très argileux.

- **Valeur au bleu VBS :**

$VBS \leq 0,1$: sol est insensible à l'eau

$0,1 \leq VBS \leq 0,2$: apparition de la sensibilité à l'eau.

$0,2 \leq VBS \leq 1,5$: seuil distinguant les sols sablo-limoneux.

$1,5 \leq VBS \leq 2,5$: sols limoneux de plasticité moyenne.

$2,5 \leq VBS \leq 6$: sols argileux.

$8 \leq VBS$: sols très argileux.

2. Les paramètres de comportement mécanique

Il s'agit de caractériser l'aptitude d'un sol à être utilisé en couche de forme. Trois paramètres de comportement mécanique ont été retenus :

- Le coefficient "Los Angeles" (LA) ;
- Le coefficient "Micro-Deval en présence d'eau" (MDE) ;
- Le coefficient de "friabilité des sables" (FS)
 - a. Le coefficient "Los Angeles" L.A. et le coefficient "Micro-Deval en présence d'eau" M.D.E

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic.

- L.A. et M.D.E. ≤ 45 : sols pouvant être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme.

- L.A. et M.D.E. > 45 : sols risquant de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières.

- b. Le coefficient de "friabilité des sables" F.S

Ce paramètre n'est pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols B1, B2 et D1 en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic.

- F.S. ≤ 60 : sols pouvant être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme.

- F.S. > 60 : sols risquant de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulière.

3.5. Conclusion

En plus d'une consommation importante, le domaine routier permet d'exploiter des matériaux de nature très variée et répondant à des caractéristiques mécaniques variables qui sont fonction de la position du matériau dans la structure routière. Dans ce chapitre, on a présenté les principaux paramètres adoptés pour la classification des matériaux selon le guide des terrassements routiers (GTR), pour leurs utilisations en technique routière.

Dans le massif d'une chaussée routière, la distribution de la charge est de moins en moins importante. Cela permet d'utiliser des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques variées en fonction de leur position dans la structure de la chaussée, d'où est fondée cette technique d'intégration des sédiments de dragage dans ce contexte.

Il est concevable ainsi de remplacer une fraction de sol granulaire utilisée dans les matériaux routiers par des sédiments de dragage, en raison, de leurs abondances à l'aval des retenues de barrage.

L'utilisation de tels sédiments dragués dans les formulations de matériaux routiers présente ainsi une solution économique et intéressante. Néanmoins, pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques du mélange sol-sédiment, des traitements sont donc nécessaires.

**Chapitre 4 : Traitement des sédiments
dragués par la technique de
solidification/stabilisation (S/S)**

4.1. Introduction

Les pratiques de dragage constituent un enjeu pour le développement et le maintien des activités portuaires et fluviales. Elles présentent également un risque de contamination des eaux côtières pouvant affecter durablement les écosystèmes. La réglementation internationale prévoit ainsi le traitement de ces sédiments avant leurs réutilisations.

Parmi les nombreuses techniques utilisées actuellement pour traiter les sédiments de dragage, la technique de solidification/stabilisation (S/S) trouve son utilisation autant dans le domaine des sols que dans celui des sédiments contaminés ou non. Outre la stabilisation et l'immobilisation des contaminants inorganiques, cette technique ouvre des perspectives de valorisation du matériau traité.

On présente dans ce chapitre, un état des connaissances en matière du devenir actuel des sédiments, contaminés ou pas, de leurs traitements ainsi que de leur valorisation notamment par la technique de solidification/stabilisation (S/S).

Cette technique appliquée aux sédiments présente de multiples avantages: d'une part donner lieu à un produit solide (sachant que la teneur en eau des sédiments peut atteindre 200 %), et d'autre part, stabiliser et immobiliser les contaminants inorganiques.

4.2. La technique de solidification /stabilisation (S/S)

4.2.1. Description de la technique

La technique de solidification/stabilisation est bien répandue dans le domaine du traitement des boues industrielles et des boues des stations d'épuration. Son utilisation pour les sols et sédiments contaminés est en voie de développement.

Le processus de solidification se réfère à l'amélioration des caractéristiques physiques du produit final. Tandis que la stabilisation se rapporte au "piégeage" physique et chimique des éléments toxiques, notamment les métaux lourds, et à la réduction de leur mobilité, et ce grâce à la matrice solide formée par solidification.

Par conséquent, les objectifs fondamentaux du traitement par (S/S) sont la réduction de l'impact négatif de la contamination sur l'environnement (Figure 4.1) ainsi que l'obtention d'un produit ayant une intégrité structurelle.

Les technologies de (S/S) en utilisation incluent un large éventail de liants : ciment,

Chapitre 4 de solidification/stabilisation (S/S)

Traitement des sédiments dragués par la technique

chaux, polymère, matériaux pouzzolaniques, etc., avec ajout d'additifs tels que : cendres volantes, laitiers, etc. Néanmoins le ciment reste le liant le plus utilisé dans cette technique de solidification/stabilisation (S/S).

L'ensemble du processus de S/S est obtenu grâce à l'hydratation des constituants du ciment. La pâte, résultant du mélange du ciment anhydre (avec d'éventuels ajouts) et de l'eau de gâchage issue du produit à traiter ou volontairement rajouter, va faire prise et durcir.



Figure 4.1. Procédé de solidification/stabilisation (S/S) d'un sol contaminé (Gitipour et al., 2014)

4.2.2. Applicabilité de la technique de solidification/stabilisation (S/S)

Cette technique de solidification/stabilisation (S/S) trouve son utilisation autant dans le domaine des sols que dans celui des sédiments contaminés ou non. L'objectif global est d'obtenir de meilleures caractéristiques physico-mécaniques, un taux d'immobilisation des contaminants élevé, avec des dosages en liants et additifs faibles tout en s'efforçant de limiter les coûts de traitement.

Par ailleurs, l'ensemble des techniques de solidification/stabilisation (S/S) présente un certain nombre d'étapes communes à respecter (Boutouil et Levacher, 2000):

1. Analyse et évaluation du produit à traiter: caractérisation.
2. Prétraitement éventuel : baisse de la teneur en eau.
3. Addition des liants et des agents solidifiants puis mélange: in-situ ou ex-situ.

4. Compactage éventuel.
5. Contrôle de qualité du matériau final.
6. Dépôt ou utilisation du matériau final.

4.2.3. Avantages et inconvénients de la technique de stabilisation/solidification (S/S)

La technologie de stabilisation/solidification (S/S) présente les avantages suivants [9]:

1. Peut être utilisée sur une grande variété de contaminants.
2. Peut être appliquée à différents types de sols.
3. L'équipement est largement disponible et simple.
4. Taux de rendement élevé.

Cependant, cette technique S/S peut présenter certains inconvénients qui sont :

1. Le volume des déchets traités augmente généralement de manière significative.
2. Des composés organiques volatils et certaines particules peuvent se dégager pendant le processus de traitement.
3. Il est difficile d'introduire les additifs de traitement en profondeur dans les déchets et de les mélanger uniformément.
4. Le site de S/S in situ ne peut pas être réaménagé.
5. L'efficacité à long terme de la S/S est encore incertaine.

Les méthodes de stabilisation/solidification (S/S) ont été classées en plusieurs catégories par différents chercheurs. Selon USEPA. (1996), la plupart des systèmes de stabilisation/solidification sont des procédés exclusifs impliquant l'ajout d'absorbants et d'agents solidifiant à un déchet. Cependant, les procédés S/S peuvent généralement être divisés en cinq catégories en fonction des additifs utilisés : (1) Sorption, (2) Procédé pouzzolane à base de cendres volantes, (3) Systèmes pouzzolane-ciment Portland, (4) Micro encapsulation thermoplastique, et (5) Macro encapsulation.

4.2.4. Processus de solidification

Le processus de solidification se traduit par la formation d'une matrice solide peu perméable par réaction (ou non) avec un ou plusieurs réactifs intervenant dans le procédé. Cette solidification peut être considérée comme une encapsulation (micro ou macro) qui a pour conséquence principale de réduire la solubilité des espèces et de diminuer l'interface entre le déchet et le milieu extérieur. Il s'agit, en outre, d'améliorer les caractéristiques

physiques et mécaniques du produit final qui se présente alors comme un solide massif (Navarro, 1999).

Cette technique de solidification consiste donc à lier physiquement ou à emprisonner les polluants au sein d'une masse stable, dure et inerte. Elle doit être appliquée sur l'ensemble de la matrice polluée afin de réduire le contact eau/polluants en agissant principalement sur la diminution de la porosité (réduction de la perméabilité).

4.2.5. Processus de stabilisation

Il existe deux modes de stabilisation [10] :

- La transformation chimique du polluant lessivable en un composé peu ou non soluble,
- L'augmentation des capacités de sorption du polluant avec les matériaux par mélange avec différents adjuvants afin de les rendre moins mobilisables.

Dans tous les cas, les polluants ne sont pas détruits, mais leur impact potentiel sur l'environnement est fortement diminué. Ces techniques sont essentiellement utilisées sur les polluants non biodégradables (certains polluants organiques mais essentiellement des métaux lourds/métalloïdes). Elles nécessitent souvent un confinement après traitement.

Le procédé nécessite donc l'excavation des sols. La mise en contact entre les sols pollués et les différents réactifs (liants minéraux, additifs, eau, etc.) est réalisée à l'aide d'un malaxage à des conditions opératoires spécifiques (bétonnières, mélange à la pelle, malaxeurs). Une fois le mélange réalisé, les sols en cours de stabilisation/solidification sont conditionnés dans des big-bags, des caissons spécifiques, des containers ou dans des alvéoles de confinement spécifiques.

L'opération nécessite la plupart du temps un prétraitement : criblage, trémie. Dans le cas de composés volatils, il convient de mettre en place un système de captage, de contrôle et de traitement des gaz [11].

4.2.6. Les procédés de mélanges dans la technique S/S

Les procédés S/S peuvent être mis en œuvre soit in situ, soit ex situ (Figure 4.2) :

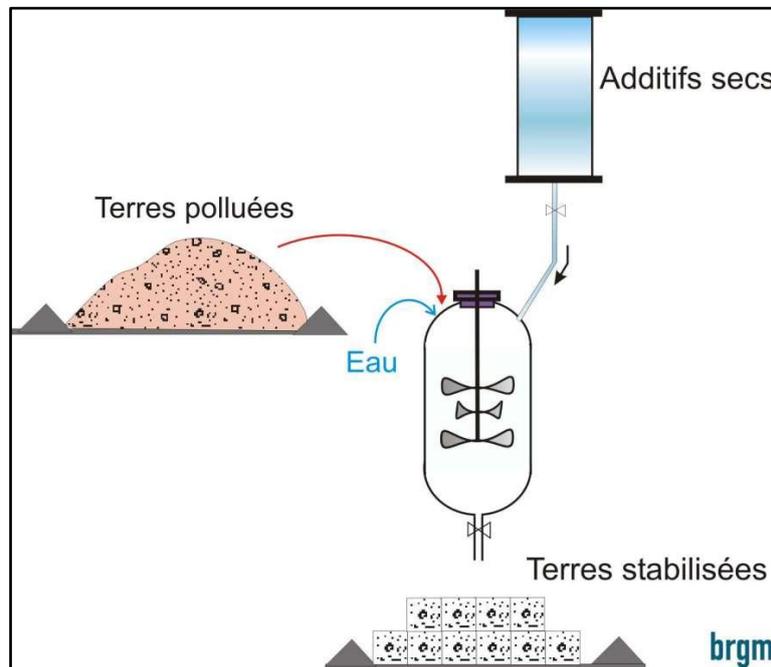


Figure 4.2. Schéma de principe de la technique de solidification/ stabilisation (S/S) in situ ou ex situ [11].

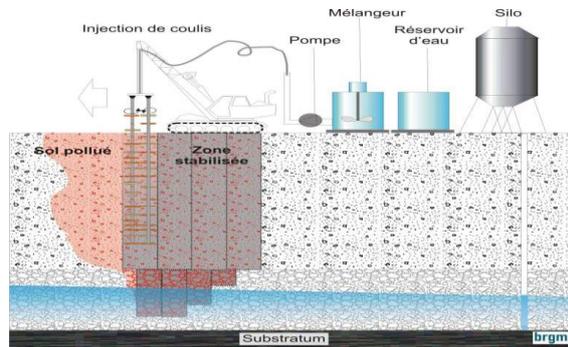
➤ In Situ. La S/S in situ implique généralement l'ajout de liants à une zone de boues ou de sols et l'ajout d'eau si nécessaire, suivi d'un mélange répété sur place avec le godet d'une pelle rétrocaveuse ou d'une excavatrice similaire pour mélanger et stabiliser les boues ou les sols en place (Figure 4.3). L'excavateur peut également être équipé d'une tête de mélange. En outre, le mélange in situ peut être réalisé à l'aide de grandes tarières rotatives à ailettes, d'un diamètre de 1,83 à 2,44 m ou plus, capables d'injecter des produits chimiques pour boues et de l'eau à travers les ailettes de la tarière. La tarière fore et mélange un "bouchon" de grand diamètre du matériau contaminé. Pendant le forage, des liants et de l'eau (si nécessaire) sont injectés dans les sols. Après un mélange complet, la tarière est retirée et la boue de fixation est laissée en place. La tarière est avancée pour chevaucher légèrement le dernier bouchon, et le processus est répété jusqu'à ce que la zone contaminée soit terminée [10]. Les tarières sont généralement utilisées pour le mélange en profondeur et peuvent être utilisées pour traiter des sols de 18,3 à 30,5 m de profondeur.

L'ajout de liants et d'additifs peut augmenter le volume des sols ou des boues traités.

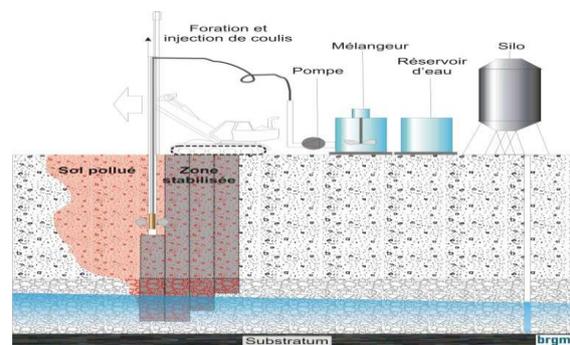
Chapitre 4 de solidification/stabilisation (S/S)

Traitement des sédiments dragués par la technique

L'importance de l'augmentation du volume doit être prise en compte dans le cas d'un mélange à la fois superficiel et profond.



Mélange in situ à faible profondeur



Mélange in situ profond

Figure 4.3. Le procédé de solidification/stabilisation (S/S) in situ.

➤ Ex Situ. Les procédés de S/S ex situ sur le terrain comprennent l'excavation et la mise en place des solides, le criblage pour éliminer les matériaux dont le diamètre est trop grand pour être traités efficacement, le mélange des agents de liaison et de l'eau avec les solides (généralement dans un malaxeur), le cas échéant, et le stockage des solides traités pour les tester avant de les expédier hors site ou de les remettre dans l'excavation (Photo 4.1). Le traitement S/S ex situ peut être effectué dans des fûts, dans une usine fixe ou dans une usine mobile.

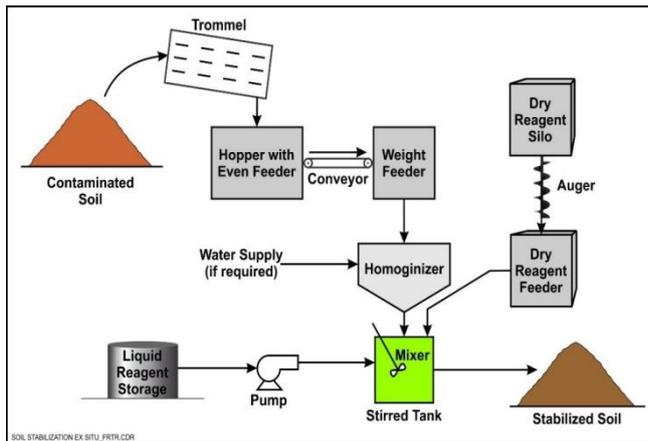


Photo 4.1. Le procédé de solidification/stabilisation (S/S) ex situ [12,13].

4.3. Comportements mécaniques des sédiments traités par le procédé S/S

Pour une utilisation des matériaux en technique routière, il est nécessaire de vérifier plusieurs critères à court et long terme au moyen des principaux paramètres nécessaires pour identifier les performances mécaniques. L'objectif est de rendre les sédiments utilisables en améliorant leurs caractéristiques rhéologiques, chimiques, mécaniques ainsi que leurs durabilités. Un certain nombre de recherches ont été élaborés dans ce procédé de traitement des sédiments dragués par cette technique de solidification/stabilisation (S/S), dont on a synthétisé quelques uns de ces travaux dans ce qui suit :

4.3.1. Travaux de Bourabah (2012)

Bourabah (2012) a étudié le comportement mécanique d'un sédiment de dragage issu du barrage de Cheurfas (Algérie), traité par un sol granulaire (sable de carrière) et des liants hydrauliques (chaux et ciment).

Selon Bourabah (2012), l'ajout d'un matériau granulaire conduit à une amélioration de la densité sèche et une réduction de la teneur en eau optimales. La teneur en matières organiques (MO) n'influe pas sur la compacité du matériau, par contre elle agit défavorablement sur sa portance. D'autre part, l'ajout de liants hydrauliques comme stabilisateur chimique agit en grande partie sur la portance du matériau (Figure 4.4) qui se trouve nettement améliorée pour une utilisation comme couche de fondation et de base.

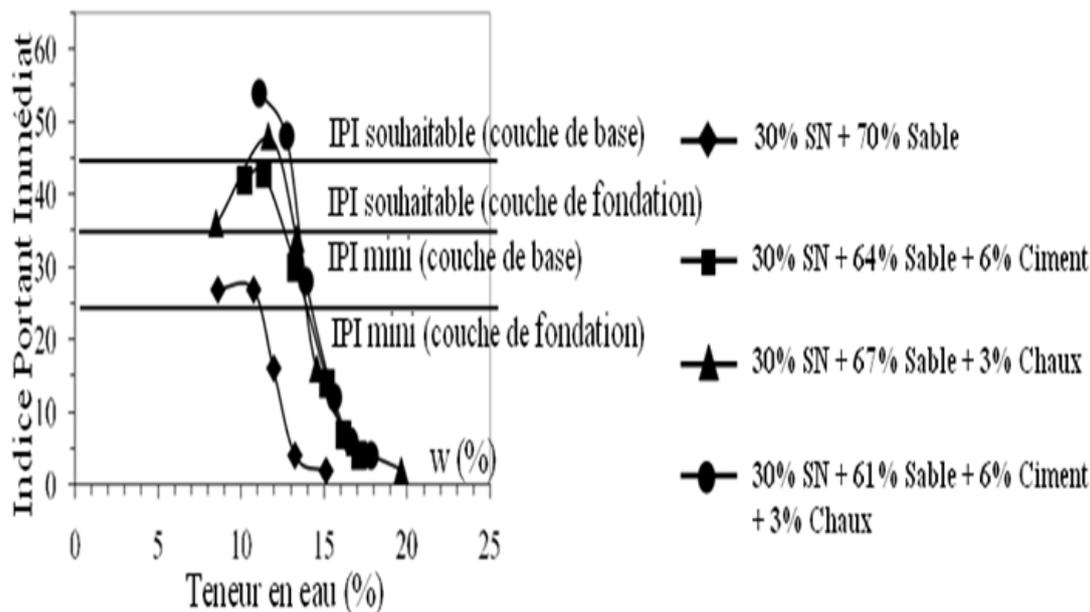


Figure 4.4. Influence du traitement sur les courbes de portance du sédiment naturel (SN) de Cheurfas (Bourabah, 2012).

4.3.2. Travaux de Boutouil et Saussaye (2011)

Boutouil et Saussaye (2011), ont étudié l'exploitation des sédiments de dragage marins du port d'Ouistreham (Calvados, France) dans des applications géotechniques. Ces sédiments ont été traités aux liants hydrauliques et par ajout de correcteurs granulométriques, caractérisés par deux types de sables, concassés et roulés.

Selon Boutouil et Saussaye (2011), ce traitement effectué a conduit à une amélioration de la résistance à la compression uni axiale d'un facteur de plus de 40% après utilisation du sable concassé et 28 jours de cure (Figure 4.5), tandis qu'aucune différence n'a été observée sur la résistance à la traction indirecte entre les deux types de sables.

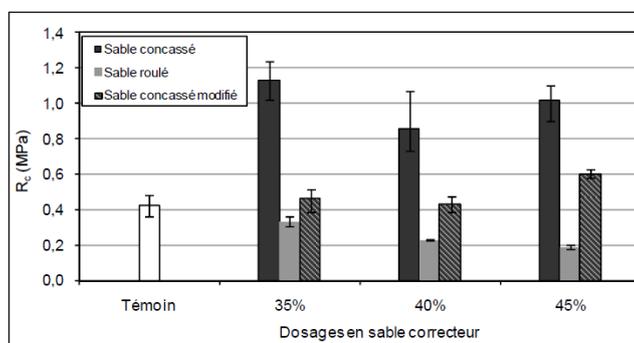


Figure 4.5. Résistances à la compression simple à 28 jours du sédiment traité avec 10% de ciment, sans et avec 35, 40 et 45% de sable correcteur (Boutouil et Saussaye, 2011)

Une analyse granulométrique des matériaux solidifiés a été aussi effectuée afin de constater les modifications structurelles apportées par ce traitement S/S.

La figure 4.6 présente l'analyse granulométrique par sédimentométrie des matériaux solidifiés avec 45% de sable correcteur. Cette analyse effectuée fait apparaître une granulométrie plus grossière par rapport au sédiment naturel et au sédiment traité sans apport de correcteur (témoin).

Selon Boutouil et Saussaye (2011), la complémentarité des deux traitements, liant et sable correcteur, se traduit par une augmentation de la taille des grains. La fraction fine, affectée par les deux processus est réduite.

La dilution des paramètres de nature, tels que les teneurs en eau, en matières organiques ou en argiles, associée à l'apport d'un nouvel élément de structure est immédiate ; le processus de floculation est suivi d'une phase de cimentation.

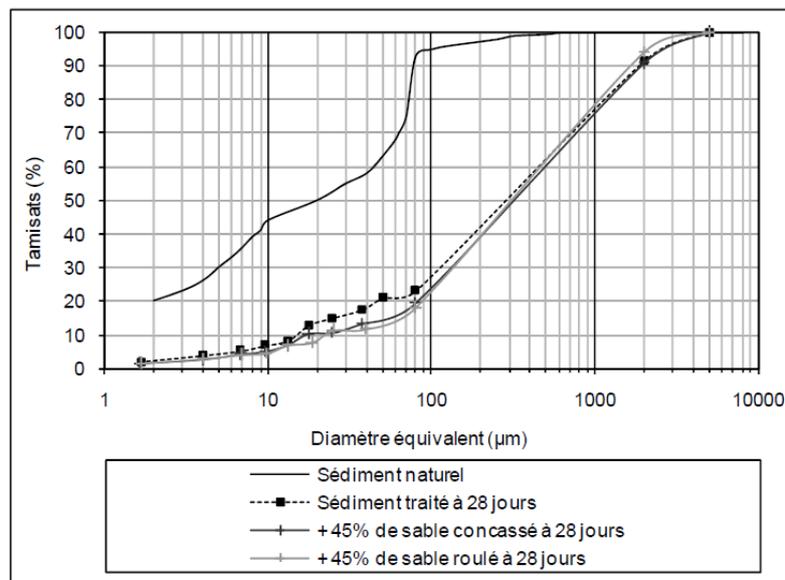


Figure 4.6. Analyse granulométrique à 28 jours du sédiment naturel et traité avec 10% de ciment, sans et avec 45% de sable correcteur (Boutouil et Saussaye, 2011).

Une répartition granulométrique plus uniforme et plus étalée du sable correcteur semble pouvoir améliorer la compacité du squelette granulaire. Le sable correcteur participe au renforcement de la structure et améliore les performances mécaniques du matériau solidifié.

4.3.3. Travaux de Rekik (2008)

Rekik 2008 a étudié le comportement en compressibilité de deux sédiments marins avant et après traitement avec 2, 5 et 10% de ciment après 7 et 28 jours de cure. Les résultats ont montré (Figures 4.7 et 4.8) une augmentation de la pression de pré consolidation, une diminution de la compressibilité, une accélération de la phase de consolidation et une réduction de la compression secondaire.

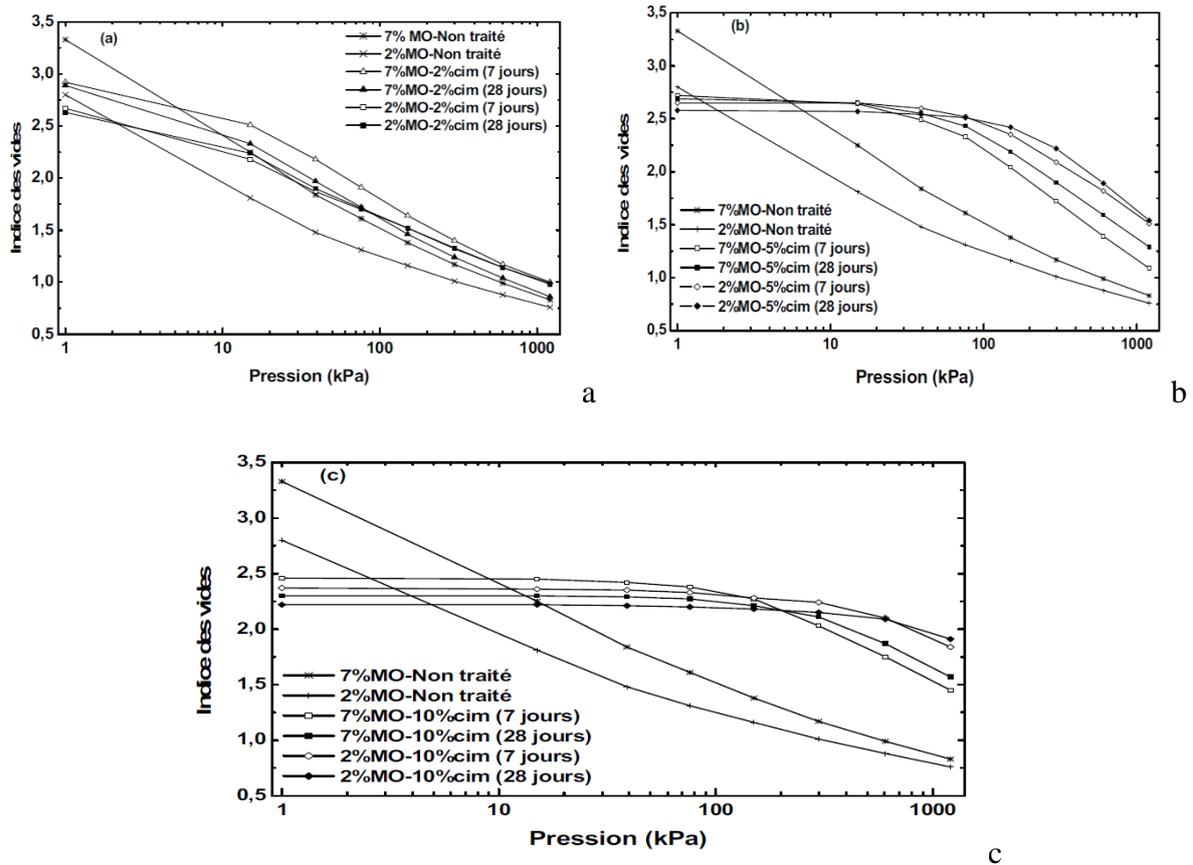


Figure 4.7. Courbes de compressibilité des sédiments marins contenant 2 et 7% de MO traité avec du ciment (Rekik, 2008): (a) 2% de ciment, (b) 5% de ciment, (c) 10% de ciment.

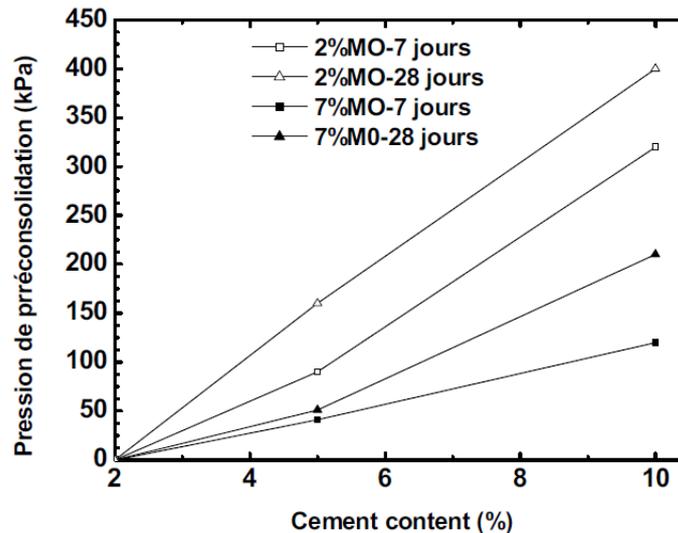


Figure 4.8. Evolution de la pression de préconsolidation avec le dosage en ciment et la teneur en matières organiques (MO) (Rekik, 2008)

Selon Rekik 2008, les propriétés des sédiments après traitement sont d'autant plus intéressantes que la teneur en matières organiques (MO) soit faible où le traitement au ciment permet la solidification du matériau et une amélioration de son comportement mécanique (Tableau 4.1).

Tableau 4.1. Variation de l'indice de compression (Cc) des sédiments marins traités (Rekik, 2008).

Age (jours)		Non traité	7			28		
Ciment (%)			2	5	10	2	5	10
MO (%)	2	0,55	0,59	0,96	0,59	0,62	1,12	0,62
	7	0,74	0,79	1,05	0,97	0,74	0,99	0,98

Le traitement au ciment permet la solidification du matériau et une amélioration de son comportement mécanique. Les grains fins s'agglomèrent pendant les premières heures par floculation/agglomération et continue de s'agglomérer avec le temps par cimentation. Cette agglomération modifie le comportement en compressibilité de ces matériaux qui passe progressivement vers celui d'un sol plus grossier.

La teneur en MO est un facteur important lorsqu'un traitement au ciment est envisagé tant de point de vue efficacité du traitement que de point de vue économique. En effet, les résultats de cette étude ont montré que les propriétés du sédiment contenant 7% de MO traités avec 10% de ciment sont comparables à celles du sédiment contenant 2% de MO traité avec 5% de

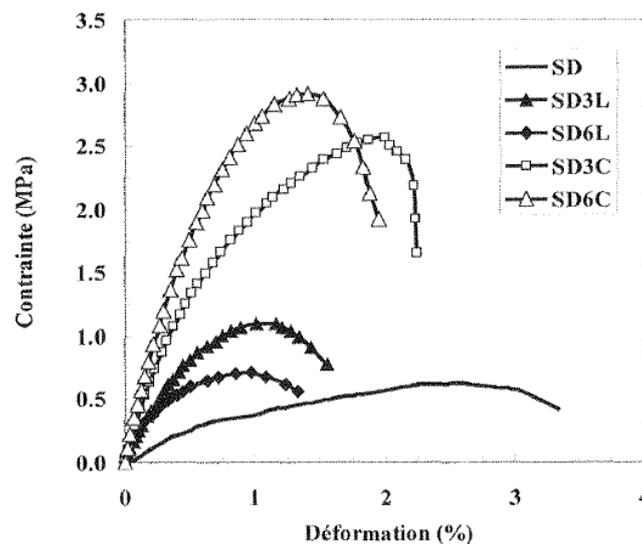
ciment. Selon Rekik (2008), cela implique qu'une réduction préalable de la teneur en MO permet d'économiser une quantité importante de ciment nécessaire au traitement.

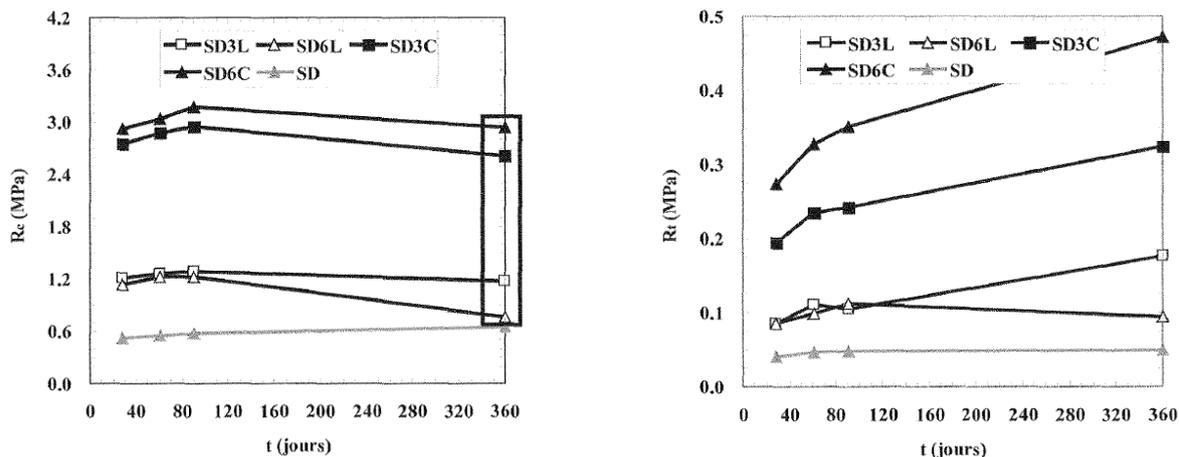
4.3.4. Travaux de Abriak et al.2013

L'estimation du comportement à long terme de sédiments traités par la technique S/S à la chaux ou au ciment a été analysée par Abriak et al.2013 sur des sédiments marins issus du port autonome de Dunkerque (France). Cette étude a été effectuée en utilisant des essais de compression et de traction afin de déterminer les résistances de ces sédiments à différentes échéances et en particulier à 360 jours.

Le traitement aux liants est choisi de telle sorte à identifier l'effet de ces liants à différents dosages sur l'évolution des résistances mécaniques d'un côté et sur l'évolution de ces caractéristiques dans le temps de l'autre côté.

Selon Abriak et al.2013, l'analyse de l'évolution de la résistance à la compression (R_c) et à la traction (R_t) à long terme (Figure 4.9), laisse apparaître une augmentation importante des résistances avec le type de traitement (résistance mesurée plus importante pour un traitement au ciment) mais également avec le taux de traitement. Il apparaît également, que fonction du type de traitement la cinétique des résistances à la compression et à la traction sont différentes.





Les formulations sont notées SDXL ou SDXC (SD : sédiment de dragage, X : le % de liant, L : Chaux, C : Ciment)

Figure 4.9. Evolution des courbes de résistances à la compression et à la traction à long terme des sédiments stabilisés aux liants (Abriak et al.2013).

L'ajout du ciment ou de la chaux diminue la déformation à la rupture par rapport aux sédiments bruts, lorsque la résistance en compression et en traction augmente (Tableau 4.2).

Tableau 4.2. Résistances et déformations à rupture des sédiments marins stabilisés à la chaux ou au ciment à 360 jours (Abriak et al.2013).

Matériaux	Rc _{360js} (MPa)	Rt _{360js} (MPa)	ε _{360js} (%)
SD	0,65	0,05	2,61
SD3L	1,17	0,18	1,00
SD6L	0,77	0,09	0,93
SD3C	2,61	0,32	1,99
SD6C	2,94	0,47	1,40

4.3.5. Travaux de Wang et al.2012

Wang et al.2012 ont étudié les effets d'introduction de liants sur la stabilisation de sédiments fins dragués du port de Dunkerque (France) pour une utilisation en couche de structure routière.

Selon Wang et al.2012, les limites de liquidité des sédiments traités à la chaux ou au ciment ont montré une augmentation initiale avec l'ajout de 3% de liant, suivie d'une valeur relativement constante avec 6% de liant et d'une diminution progressive avec 9% de liant (Figure 4.10).

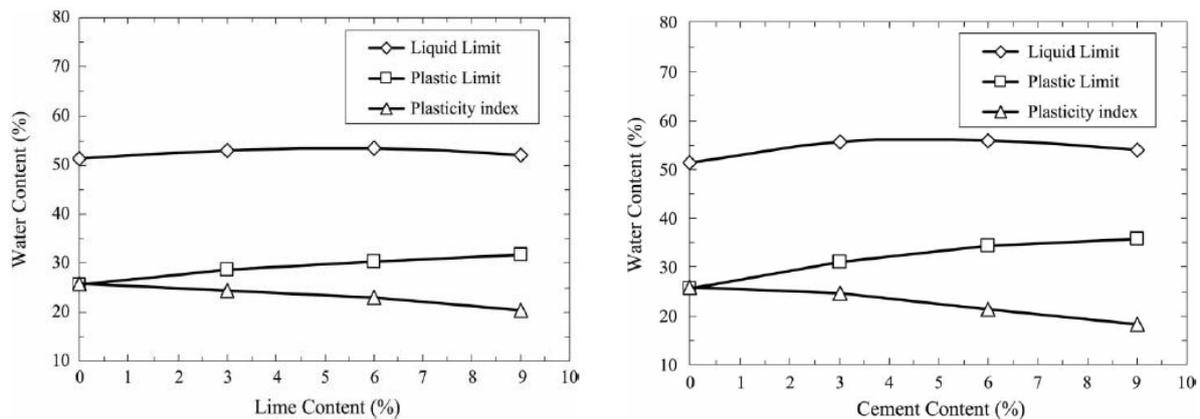


Figure 4.10. Effets de la chaux et du ciment sur les limites d’Atterberg des sédiments marins de Dunkerque (Wang et al.2012).

Selon Osula (1991), la réduction de la limite de liquidité avec l’augmentation de la teneur en liants est attribuée à la réaction d’échange cationique entre les cations de sols avec ceux des liants (Figure 4.11), qui floccule et cimente les particules d’argile ensemble réduisant ainsi la fraction argileuse et la surface spécifique totale.

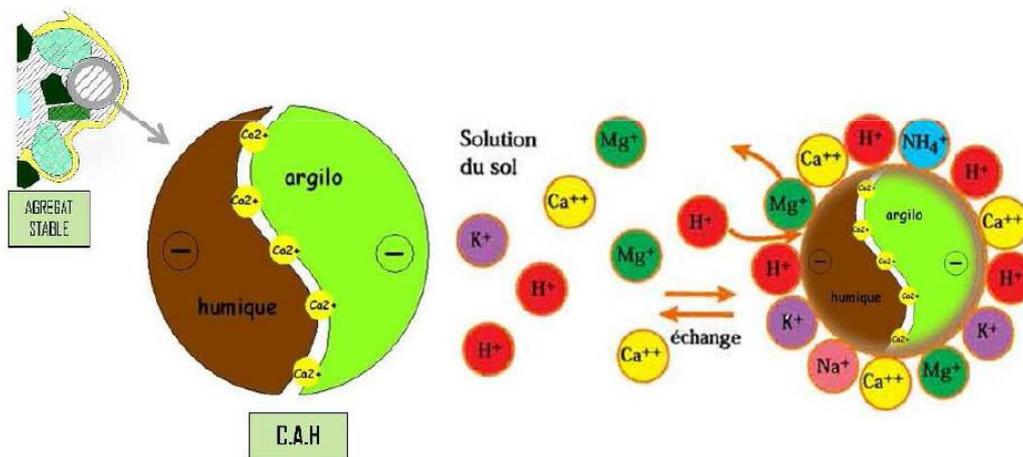


Figure 4.11. Echange cationique sédiment-liant

Selon Wang et al.2012, la limite de plasticité augmente lorsque la teneur en liants varie de 0 à 9%, ce qui entraîne par conséquent une réduction de la plage de plasticité des sédiments solidifiés avec ces liants. Osula (1991), considère que ce changement de propriété est principalement attribué à l’ altération de l’ eau adsorbée entourant les minéraux argileux.

La densité sèche maximale des sédiments solidifiés diminue avec la teneur en liant jusqu’ à ce que le liant compense les espaces poreux grands, tandis que la teneur ne eau optimale et la portance (ICBR) augmentent (Figure 4.12).

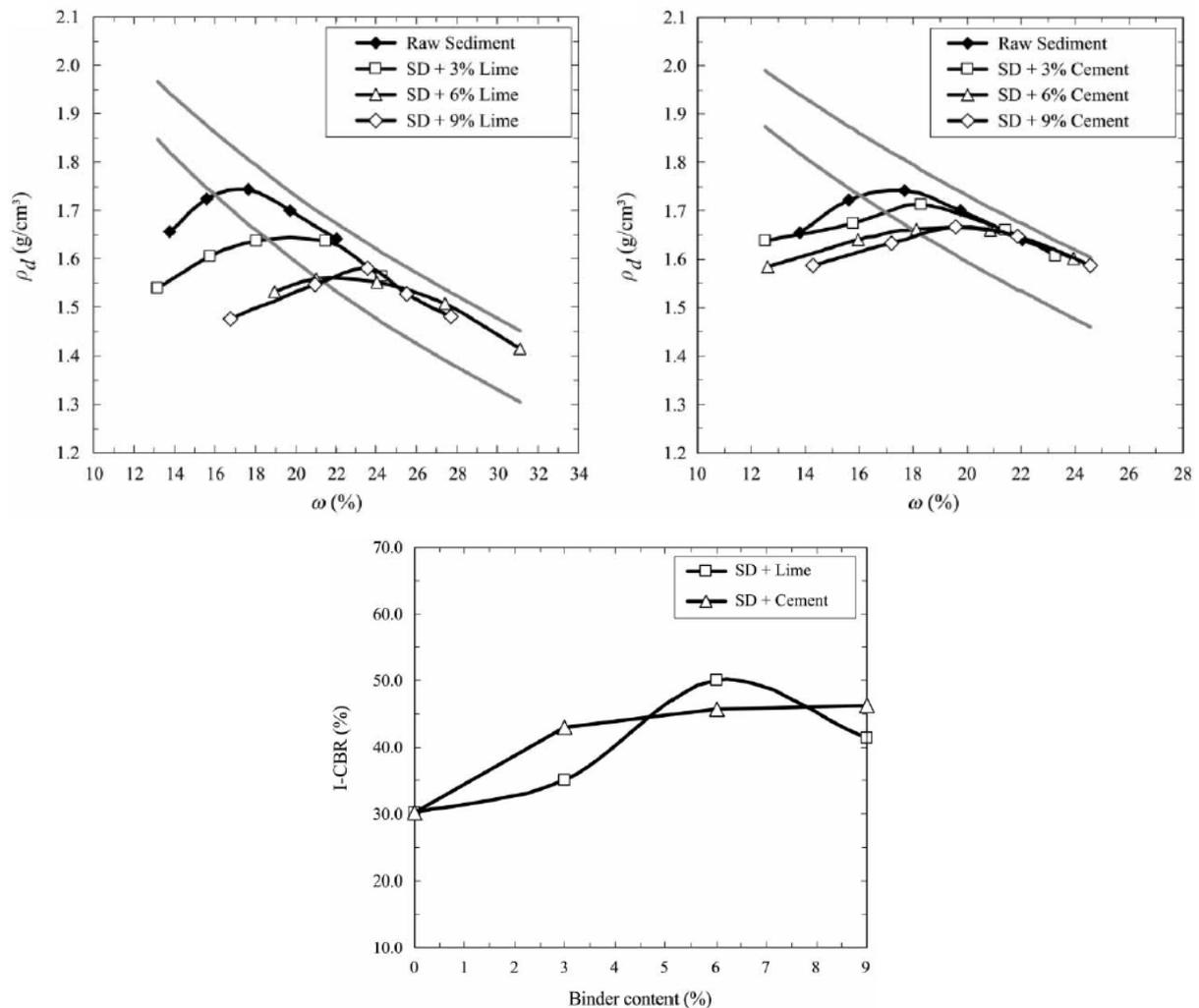


Figure 4.12. Variation de la compacité et la portance des sédiments solidifiés aux liants (Wang et al.2012).

La teneur en eau optimale des sédiments solidifiés à la chaux est plus élevée que celle des sédiments solidifiés au ciment pour une même teneur en liant. Ce phénomène est dû au fait que la chaux nécessite plus d'eau pour son hydratation, ce qui entraîne une teneur en eau plus élevée par rapport à l'hydratation du ciment.

L'augmentation de la portance des sédiments avec la teneur en liants est attribuée selon Wang et al.2012 au développement continu du couple C-S-H (calcium silicate hydrate), considéré comme le composé cimentaire (Figure 4.13).

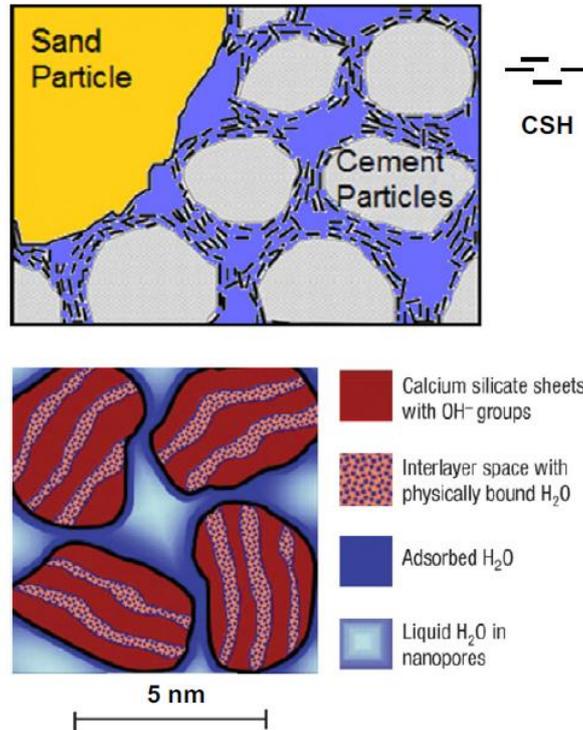
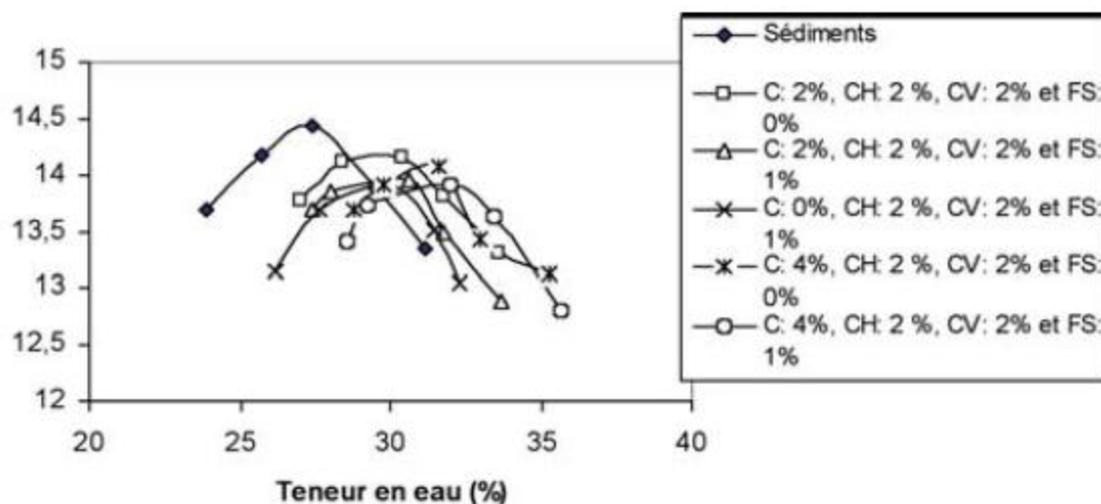


Figure 4.13. Développement du couple C-S-H (calcium silicate hydrate) dans le composé cimentaire (Heinz et al.2017).

4.3.6. Travaux de Mezazigh et Behmanesh (2009)

Mezazigh et Behmanesh (2009) ont étudié le comportement à court terme de sédiments dragués du port autonome du Havre traités par solidification/stabilisation en utilisant un mélange de ciment, chaux, cendre volante, fumée de silice et additifs. Différents pourcentages de liants hydrauliques ont été utilisés.

L'effet des liants sur la compacité (w_{opt} et γ_{dmax}) dépendent de la nature des sédiments et des liants utilisés. Mezazigh et Behmanesh (2009), indiquent que l'ajout de liants dans les sédiments modifie les valeurs des densités sèches et la teneur en eau optimale. La figure 4.14 montre que l'augmentation des liants dans les sédiments entraîne un accroissement de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale.



C : Ciment, CH : Chaux, CV : Cendres volantes et FS : Fumée de silice

Figure 4.14. Effets d’ajout des liants sur la compacité des sédiments du Havre (Mezazigh et Behmanesh, 2009).

Cette augmentation de la teneur en eau avec l’addition des liants dans les sédiments résulte de l’attractivité de l’eau par les liants (Figure 4.15), c’est-à-dire que l’ajout des liants dans les sédiments augmente la surface spécifique des particules du mélange par rapport aux sédiments de référence grâce à l’ajout des matières fines. En effet, les liants utilisés, en augmentant la taille des groupes de particules floculées et leur coefficient de frottement, pénalise l’arrangement des grains lors du compactage et aplatit ainsi les courbes de compactage des sédiments traités.

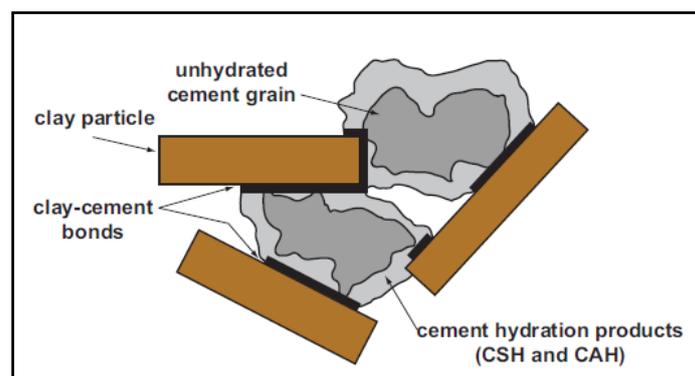


Figure 4.15. Attractivité de l’eau par les liants dans les sédiments (Halsted et al.2008).

Le groupement des particules de sédiments avec les macropores peut expliquer la diminution de la densité sèche maximale selon Mezazigh et Behmanesh (2009).

La résistance à la compression simple croît avec l’âge des sédiments traités et avec la

modification de la teneur en eau. L'augmentation de la concentration en ciment et fumée de silice conduit à une résistance à la compression plus élevée (Figure 4.16).

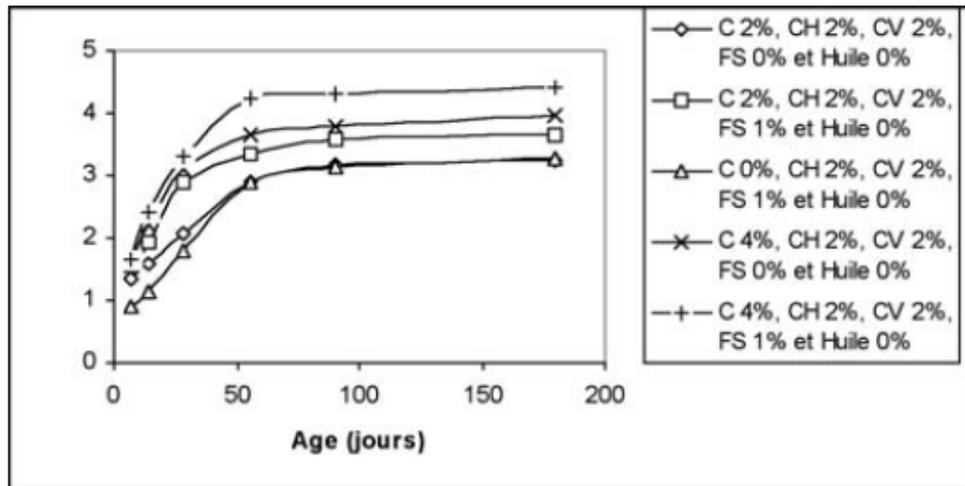


Figure 4.16. Variation de la résistance en compression simple des sédiments du Havre traités (Mezazigh et Behmanesh, 2009).

Selon ces deux auteurs, l'hydratation du ciment et la chaux contribuent à la formation d'hydroxyde de calcium, $(Ca(OH)_2)$. Dans les réactions pouzzolaniques, la silice peut réagir avec le calcium. Cette réaction peut créer les chaînes C-S-H qui sont responsables de l'augmentation de la résistance mécanique. La fumée de silice améliore la structure physique des sédiments traités avec le remplissage des pores entraînant une augmentation de la densité des mélanges.

La résistance à jeune âge des échantillons avec de la fumée de silice est plus importante que les autres. En effet, la présence d'ions de silice favorise la production des chaînes C-S-H liées aux réactions pouzzolaniques (Figure 4.17).

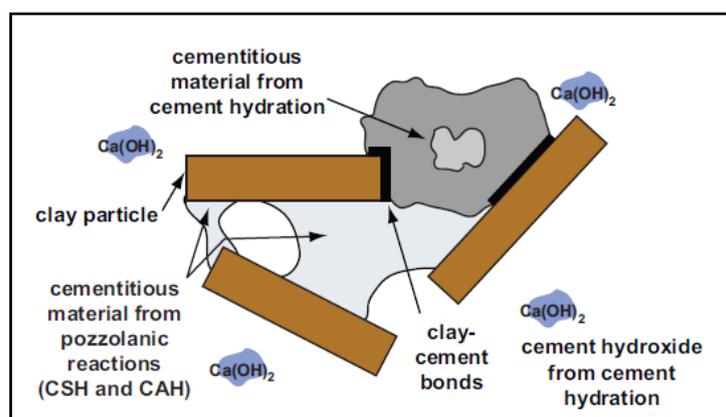


Figure 4.17. Réaction pouzzolanique (Halsted et al.2008)

Chapitre 4 Traitement des sédiments dragués par la technique de solidification/stabilisation (S/S)

La perméabilité des sédiments traités de la fumée de silice est plus faible que celle des autres mélanges (Tableau 4.3). Ceci peut être lié selon Mezazigh et Behmanesh (2009) à la taille très fine des grains de la fumée de silice qui permet de remplir les espaces vides entre les grains dans les matériaux solidifiés.

Tableau 4.3. Perméabilités des sédiments du Havre traités mesurées par cellule triaxiale (Mezazigh et Behmanesh, 2009)

Série	Mélange (%)	k(m/s)* 10 ⁻⁸
1	C2, CH2, CV2 et H0	6,8
2	C2, CH2, CV2, FS1 et H0	5,1
3	CH2, CV2, FS1 et H0	6,5
4	C4, CH2, CV2 et H0	5,1
5	C4, CH2, CV2, FS1 et H0	3,2

4.4. Conclusion

Un grand volume de sédiments est dragué chaque année des milieux portuaires et retenues de barrages en vue de maintenir leurs activités hydrauliques. La gestion de ces sédiments dragués, contaminés ou pas, doit faire face à maintes difficultés liées essentiellement à la raréfaction des sites de dépôts à terre et aux réglementations en matière de protection de l'environnement. Ceci sans oublier les répercussions de telles solutions sur l'environnement aquatique et terrestre dans le cas des sédiments contaminés.

Afin d'éviter leur stockage à terre ou rejet et immersion en mer, la proposition de traitement et d'utilisation en tant que matériau de construction routière peut être envisagée. Parmi les nombreuses techniques utilisées actuellement pour traiter ces sédiments de dragage, le procédé de solidification/stabilisation (S/S) a montré son efficacité, offrant tant d'avantages.

Outre la stabilisation et l'immobilisation des contaminants inorganiques, la technique S/S ouvre ces perspectives de valorisation du matériau traité. Plusieurs études dans ce contexte ont montré que cette technique est largement adoptée et utilisée.

D'après les recherches bibliographiques menées, on note une variété de procédés qui dépendent essentiellement des caractéristiques géotechniques et chimiques du sédiment à traiter.

L'objectif global est d'obtenir de meilleures caractéristiques physico-mécaniques, un taux d'immobilisation des contaminants élevé, avec des dosages en liants et additifs faibles, en vue

de limiter les coûts de traitement.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Les opérations de dragage des milieux portuaires et fluviaux génèrent annuellement des volumes de déchets considérables. La mise en dépôt de plus en plus coûteuse de ces matériaux dans de vastes aires aménagées, mais qui arrivent à sa saturation, devient cruciale et rend la question relative à leur devenir plus que jamais d'actualité.

Devant cette situation, différents modes de traitement de ces sédiments sont utilisés pour leur réutilisation dans le domaine routier en particulier dont la technique de solidification/stabilisation (S/S) qui a montré son efficacité de traitement pour ce type de déchets.

Ce procédé de solidification/stabilisation (S/S) des sédiments est donc une technologie émergente pour le recyclage des déchets de sédiments dragués répondant ainsi aux indicateurs de performance d'ingénierie requis. Cette technologie S/S qui fait référence à un type d'agent de durcissement qui est préparé en mélangeant plusieurs matériaux inorganiques et organiques, et qui est ajouté et mélangé en une quantité appropriée. Après une série de réactions chimiques (hydrolyse et hydratation), les sédiments présenteront en général les caractéristiques suivantes : excellente résistance structurelle, bonnes performances en capacité portante, faible perméabilité, forte stabilité à l'eau, etc.

Ces performances mécaniques améliorées par utilisation de cette technique S/S favoriseront donc son utilisation dans le traitement et valorisation des sédiments en domaine routier.

Outre la stabilisation et l'immobilisation des contaminants, cette technique (S/S) ouvre donc ces perspectives de valorisation du matériau traité. Plusieurs études dans ce contexte ont montré que cette technique est largement adoptée et utilisée.

D'après les recherches bibliographiques menées, une variété de procédés sont adoptés qui dépendent essentiellement des caractéristiques géotechniques et chimiques du sédiment à traiter.

L'objectif global est d'obtenir de meilleures caractéristiques physico-mécaniques, un taux d'immobilisation des contaminants élevé, avec des dosages en liants et additifs faibles, en vue de limiter les coûts de traitement.

À la lumière des différents travaux menés sur cette technique de traitement par solidification/stabilisation (S/S), on peut tirer les conclusions suivantes :

Conclusion Générale

1. L'ajout d'un matériau granulaire dans la solidification des sédiments conduit à une amélioration de la densité sèche et une réduction de la teneur en eau optimales. La teneur en matières organiques (MO) n'influe pas sur la compacité mais elle agit défavorablement sur la portance du sédiment.
2. L'ajout de liants hydrauliques comme stabilisateur chimique augmente la portance du sédiment traité. Il entraîne aussi un accroissement de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale.
3. La résistance à la compression croît avec l'âge des sédiments traités où l'augmentation de la concentration en ciment et fumée de silice conduit à une résistance mécanique plus élevée.
4. Les limites de liquidité des sédiments traités avec les liants montrent une augmentation initiale avec l'ajout de 3% de ces liants et une diminution progressive avec 9% de liants.
5. Le traitement par ajout de liants (chaux et/ou ciment) diminue la plasticité des sédiments solidifiés.
6. Les résistances mécaniques à la compression et traction augmentant avec la teneur en ciment et la durée de curage, à la différence des sédiments solidifiés par la chaux. D'autre part, l'ajout du ciment ou de la chaux diminue la déformation à la rupture par rapport aux sédiments bruts, lorsque la résistance en compression et en traction augmente.
7. L'utilisation de la fumée de silice réduit la perméabilité des sédiments traités par rapport au traitement par ajout de liants hydrauliques (chaux et/ou ciment). Ceci peut être lié à la taille très fine des grains de la fumée de silice qui permet de remplir les espaces vides entre les grains dans les matériaux solidifiés.
8. Le comportement en compressibilité des sédiments solidifiés indique une augmentation de la pression de préconsolidation, suivi d'une diminution de la compressibilité primaire et secondaire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRIAK, N.E., WANG, D., ZENTAR, R. (2013).** Estimation des propriétés mécaniques à long terme des sédiments de Dunkerque traités à la chaux ou au ciment. *Revue Française de Géotechnique*, (142), 39-47.
- ABRIAK, N. E., GREGOIRE, P. (2003).** Amélioration de la portance du sable de dragage extrait de l'Avant-Port de Dunkerque. 2nd International Symposium on Contaminated Sediments–Posters, Québec, Canada.
- ALZIEU C., ANDRAL C., BASSOULLET P. et BOUTIER B. (2003).** Bioévaluation de la qualité environnemental des sédiments portuaires et des zones d'immersion. Plouzane édition Ifremer, 2003, 247p.
- 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.
- BOUTOUIL, M. SAUSSAYE, L. (2011).** Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques. *Revue Paralia*, Volume 4. pp 8.1-8.11
- BOUTOUIL, M., LEVACHER, D. (2000).** Traitement et valorisation des vases de dragages par solidification/stabilisation: état de l'art. VIèmes Journées Nationales Génie Civil–Génie Côtier, Caen, France.
- BOUZID Samir.(2005).** Validation du modèle global GOCART de NASA et son apport à l'étude des variations mensuelles des phénomènes de sable sur le Sahara Algérien.
- 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, 323 p.
- DJENAOUI, A., CHATTA, S. (2016).** Etude expérimentale de système de dragage par l'air. Mémoire de Master en Hydraulique, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie.
- DUBOIS, V. (2006).** Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins. Thèse de doctorat, Université d'Artois, France.
- ESSAIDI, N. (2013).** Formulation de liant aluminosilicaté de type géopolymère à base de différentes argiles Tunisiennes », Thèse de doctorat, Limoges, France

- G.E.O.R.E (2001).** Gestion optimale des ressources en Eau. Projet GE.O.R.E, Coopération Allemande au Développement, Coopération Technique Tunis-Allemande.
- GITIPOUR, S., FIROUZBAKHT, S., MIRZAEI, E., & ALIMOHAMMADI, M. (2014).** Assessment of soil screening levels due to ingestion and dermal absorption of chrysene and benzo [k] fluoranthene and appropriate remediation method for Dorson Abad. *Environmental monitoring and assessment*, 186(6), 3541-3552.
- GTR (2000).** Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Editions du SETRA-LCPC, Fascicules I & II.
- HALSTED, G. E., ADASKA, W. S., MCCONNELL, W. T. (2008).** Guide to cement-modified soil (CMS).
- HEINZ, H., PRAMANIK, C., HEINZ, O., DING, Y., MISHRA, R. K., MARCHON, D., FLATT, R.J., LOPIS, I.E., LOP. J., MOYA. S., ZIOLO, R. F. (2017).** Nanoparticle decoration with surfactants: molecular interactions, assembly, and applications. *Surface Science Reports*, 72(1), 1-58.
- HUTIN, A. (2020).** Les milieux poreux en ingénierie de réservoir
- HÜBNER, R. (2009).** Sediment geochemistry-a case study approach. 2009. Thèse de doctorat. Bournemouth University, United Kingdom.
- LAHLOU A. (1988).** The silting of Moroccan dams. *Sediment Budgets, Proceedings of the Porto Alegre Symposium*, IAHS Publ. N° 174.
- LEDJILOT, M., MAZARI, M. (2018).** Mesures préventives contre l'envasement des barrages en Algérie avec étude de cas (barrage K'SOB). Mémoire de Master en Hydraulique. Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira, Algérie.
- MAC FARLANE, F.(2004).** Méthodologie de gestion des matériaux de dragage maritime - Application au port de Dunkerque. Thèse de doctorat, Université d'Artois– Ecole des Mines de Douai, France.
- MEZAZIGH, S., BEHMANESH, J. (2009).** Effet de la fumée de silice sur le comportement mécanique et géotechnique d'un sédiment stabilisé à base de ciment et additifs. *Revue Déchets Sciences et Techniques*, 53, 24-29.
- MIRANDA, M. N., ROSA, C., PERES, A., MAIA, R. (2021).** Sedimentation assessment and effects in Venda Nova dam reservoir (Portugal). *Science of The Total Environment*, 766, 144261.
- NAVARRO, A. (1999).** "Déchets et environnement contribution de la stabilisation Contribution De La Stabilisation". *Déchets - Sciences Et Techniques* N° 16 – 4eme trimestre, pp. 6.

- OSULA, D.O.A. (1991).** Lime modification of problem laterite, Eng. Geol. 30 (1991), pp. 141–154.
- PERRODON, A., MATHIEU, Y. (2015).** Géologie et géodynamique des hydrocarbures. Encyclopédie de l’Energie.
- POUHET, R. (2015).** Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, France.
- REKIK B. (2008).** Compressibilité d’un sédiment de dragage traité au ciment à forts rapports E/C. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, 14-16 Octobre 2008, Sophia Antipolis, France
- REMINI, B. (2017).** Une nouvelle approche de gestion de l’envasement des barrages. Larhyss Journal, 31, 51-81.
- REMINI, B., BENSAFIA, D. (2016).** Envasement des barrages dans les régions arides. Exemples algériens. Larhyss journal, (27), 63-90.
- REMINI, B. (2011).** Une nouvelle approche de lutte contre l’envasement des barrages: la technique des obstacles émergés. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (9).
- REMINI B., HALLOUCHE W., ACHOUR B. (2009).** L’Algérie : Plus d’un siècle de désenvasement des barrages. Ouvrage intitulé : Etat des ressources en eau au Maghreb en 2009, édité par UNESCO Office à Rabat, pp. 123-142.
- REMINI B., HALLOUCHE W. (2004).** La sédimentation dans les barrages Algériens. La Houille Blanche, N°01.
- REMINI, B. (2003).** Envasement des barrages algériens. Séminaire national sur l'eau et l'environnement, Bechar (Algérie), 12 et 13 octobre 2003
- TRAN, N.T. (2009).** Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse de doctorat, Université d’Artois, France.
- USEPA (1996).** Innovative Treatment Technologies, Annual Status Report. 8th Edition, EPA/542/R-96/010, USEPA, Washington, DC.
- WANG, D.X., ABRIAK, N.E., ZENTAR, R., XU, W. (2012).** Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction. Environmental technology, 33(1), 95-101.
- ZERZOURI, M. (2015).** Valorisation de quelques argiles Marocaines pour l’élaboration de matériaux géopolymères. Mémoire de fin d’études, Université de Limoge, France.

WEBOGRAPHIE

1. <https://www.finistere.gouv.fr/content/download/3476/22639/file/Sch>
2. https://www.tramaf.fr/portfolio_page/deroctage/
3. [https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/02/Guide_Dragage_Injection_d_Eau_cle0f4556\(1\).pdf](https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/02/Guide_Dragage_Injection_d_Eau_cle0f4556(1).pdf)
4. <https://www.flandres-analyses.com/dragage-analyses-des-sediments-marins-sable-de-sediments-extraits-de-cours-deau/>
5. <http://doc.lerm.fr/sediments-marins-dragage-clapage-et-gestion-a-terre/>
6. <https://www.infociments.fr/route/generalites-sur-le-fonctionnement-des-chaussees>
7. <https://pdfcoffee.com/dimensionnement-dx27une-structure-de-chaussee-routiere-pdf-free.html>
8. <https://www.techniroute.fr/vos-routes/>
9. <https://www.geoengineer.org/education/web-class-projects/cee-549-geoenvironmental-engineering-winter-2013/assignments/stabilization-solidification>
10. <https://www.selecdepol.fr/fiche-technique/solidification-stabilisation-in-situ>
11. <https://www.selecdepol.fr/fiche-technique/solidification-stabilisation-sur-site-hors-site>
12. <https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Solidification/cat/Overview/>
13. <https://frtr.gov/matrix/Solidification-and-Stabilization/>