

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 : **Structures**

Thème

Gestion durable des déchets de sédiments en construction

Présenté par :

Mr. GUENOUNE Ilyes

Mr. HADDOUCHE Youssouf

Encadré par : Dr. BOURABAH Maghnia Asmahane

Soutenu le / 11 / 2021 devant le jury composé de :

Mr. HOUTI Farid

Président

Mr. SELKA Ghouti

Examineur

Année Universitaire : **2020 / 2021**

Remerciements

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

*Nous tenons tout d'abord à exprimer nos profonds remerciements à notre encadrante: **BOURABAH Maghnia**, Docteur à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.*

*Nos remerciements iront également vers tous ceux qui ont accepté avec bienveillance de participer au jury de ce mémoire : Mr **Houti Farid** et Mr **Selka Ghouti**,*

Un remerciement très spécial pour mon chers frère Mr. Guenoune Ibrahim et ma chère sœur Nadia, pour leurs conseils et motivations.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *A mes très chers parents, qui ont illuminé mon chemin par leur affection, patience et encouragement durant tous ce long parcours de mes études .*
- *A mes chers frères Amine et Ibrahim*
- *A tout les membres de ma grande familles.*
- *A tous mes ami(e)s et camarades qui m'ont aidé à réaliser ce travail.*
- *A mon binôme Youssef.*
- *A tous les enseignants du Département de Génie Civil, en particulier mon Encadrante Dr. BOURABAH Maghnia .*
- *A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.*
- *A tous ceux que j'aime.*

Ilyes

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

-A mes tres chers parents , source de vie ,d'amour et d'affection .

-A mes chers frères et leurs enfants source de joie et de bonheur.

-A toute ma famille source d'espoir et bonheur spécialement ma chère petite sœur Nourhane .

-A Ilyes mon cher ami avant d'être binôme .

-A tous les enseignants du Département de Génie Civil, en particulier mon Encadrant Dr.

BOURABAH Maghnia.

-A vous cher lecteur.

Youssef

RESUME

Le domaine de la construction n'a jamais cessé de se développer depuis des années, que ce soit en travaux publics, maritime ou habitation. Cependant, la demande de la matière première, à l'image des carrières, reste élevée. En outre, cette source qui est considérée comme origine de quelques matières comme le béton, la brique et le ciment est une source épuisable. Tout cela a encouragé les chercheurs et les industrielles trouver une alternative pour remédier à cette problématique. Le sédiment de dragage est proposé comme une source prometteuse qui a marqué le domaine de la construction.

Cette étude s'intéresse en l'élaboration d'une analyse synthétique sur l'exploitation des sédiments de dragage dans une perspective de développement durable en domaine de construction.

Mots clés: Sédiments de dragage, béton, construction, gestion, réglementation

ABSTRACT

The field of construction has never stopped growing for years, whether in public works, maritime or residential. However, the demand for the raw material, like the quarries, remains high. In addition, this source which is considered to be the origin of some materials such as

concrete, brick and cement is an exhaustible source. All this has encouraged researchers and industrialists to find an alternative to remedy this problem. The dredged sediment is proposed as a promising source that has marked the field of construction.

This study is interested in the elaboration of a synthetic analysis on the exploitation of dredged sediments in a sustainable development perspective in the field of construction.

Keywords: Dredged sediments, concrete, construction, management, regulations

ملخص

لم يتوقف مجال البناء عن التطور منذ سنوات، سواء في ميادين الأشغال العمومية، البحرية أو السكنية. ومع ذلك، فإن الطلب على المواد الخام، مثل المحاجر، لا يزال مرتفعا بالإضافة إلى ذلك، فإن هذا المصدر الذي يعتبر أصل بعض المواد مثل الخرسانة والطوب والأسمنت هو مصدر قابل للاستنفاد. كل هذا شجع الباحثين والصناعيين على إيجاد بديل لمعالجة هذه المشكلة. تعتبر الرواسب المجروفة من المصادر الواعدة التي ميزت مجال البناء.

نهتم في هذه الدراسة إلى تطوير تحليل تركيبى بغية استغلال الرواسب المجروفة من منظور التنمية المستدامة في قطاع البناء.

الكلمات المفتاحية: الرواسب المجروفة، الخرسانة، البناء، إدارة، تنظيم

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Abstract

Résumé

Liste des figures..... 10

Liste des tableaux 11

Introduction générale14

Chapitre I: Principes généraux sur les sédiments de dragage

I.1. Introduction17

I.2.définition d'un sédiment.....17

I.3principaux types de sédiment.....18

I.4 composition minéralogique des sédiments20

I.4.1.fraction minérale.....20

I.4.2.fraction organique20

I.4.3.phase eau.....21

I.5.pollution des sédiments.....22

I.5.1.les polluants organiques23

I.5.2.les métaux lourds.....24

I.6.dragage des sédiments.....25

I.7.techniques de dragage.....26

I.7.1.les dragage mécaniques27

I.7.2les dragages hydrauliques.....28

I.7.3.les dragages par agitation(à l'américaine)30

<i>I.8.transport et dépôt des sédiments de dragage.....</i>	<i>31</i>
<i>Conclusion</i>	<i>31</i>

Chapitre II : Réglementation et gestion des sédiments de dragage

<i>II.1.Introduction</i>	<i>33</i>
<i>II.2. cadre réglementaire développé pour la gestion des sédiments dragués</i>	<i>34</i>
<i>II.2.1.échelle internationale.....</i>	<i>34</i>
<i>II.2.2. échelle européenne.....</i>	<i>41</i>
<i>Conclusion</i>	<i>43</i>

Chapitre III : Techniques de traitements des sédiments de dragages

<i>III.1. Introduction.....</i>	<i>46</i>
<i>III.2. méthode d'extraction et de prétraitement des sédiments.....</i>	<i>46</i>
<i>III.2.1.prétraitement et rinçage des sédiments pollués.....</i>	<i>46</i>
<i>III.3.Technique de traitement des sédiments.....</i>	<i>48</i>
<i>III.3.1.Traitement physico-chimique.....</i>	<i>49</i>
<i>III.3.2Traitement thermique.....</i>	<i>50</i>
<i>III.3.3.Traitement biologique</i>	<i>55</i>
<i>Conclusion</i>	<i>57</i>

Chapitre IV : Exploitation des sédiments de dragage pour utilisation en matériaux de construction

<i>IV.1.introduction.....</i>	<i>59</i>
<i>IV.2.devenir des sédiments dans le domaines de la construction</i>	<i>59</i>

<i>IV.3.Etat de connaissances sur la valorisation des sédiments en matériaux de construction....</i>	<i>61</i>
<i>IV.3.1.travaux de Kazi aoual-benslafa et al.2011</i>	<i>61</i>
<i>IV.3.2.travaux de Benyerou et al .2016.....</i>	<i>62</i>
<i>IV.3.3.travaux de Zhao et al.2015.....</i>	<i>64</i>
<i>IV.3.4.travaux de Karam et al.2018.....</i>	<i>65</i>
<i>IV.3.5.travaux de Benasla et al.2015.....</i>	<i>67</i>
<i>IV.3.6.travaux de Achour (2013).....</i>	<i>69</i>
<i>IV.3.7.travaux de Agostini (2006).....</i>	<i>71</i>
<i>IV.3.8.travaux de Safhi (2020).....</i>	<i>74</i>
<i>IV.3.9.travaux de Belas et al.2011</i>	<i>74</i>
<i>Conclusion</i>	<i>75</i>

Conclusion générale

Références bibliographiques

liste des figures

Chapitre 1 : Principes généraux sur les sédiments de dragage

Figure 1.1. Phénomène de sédimentation.

Figure 1.2. Erosion exogène et endogène des sédiments.

Figure 1.3. Classes granulaires d'un sédiment.

Figure 1.4. Composés organiques présents dans les sédiments.

Figure 1.5. Formes de l'eau dans les sédiments

Figure 1.6. Réactions d'un écosystème aquatique aux pollutions dans un bassin versant.

Figure 1.7. Carte des barrages algériens les plus envasés

Figure 1.8. Représentation schématique des trois types de dragages mécaniques

Figure 1.9. Représentation schématique des trois types de dragages hydrauliques

Figure 1.10. Proportions draguées par la technique de dragage hydraulique

Chapitre 2 : Règlementation et gestion des sédiments de dragage

Figure 2.1. Objectifs de la convention OSPAR (1992)

Figure 2.2. Pollution en milieu maritime causée par des activités humaines.

Figure 2.3. Pays signataires de la Convention de Londres

Figure 2.4. Pays méditerranéens concernés par la convention de Barcelone

Chapitre 3 : Techniques de traitements des sédiments de dragage

Figure 3.1. Techniques de déshydratation des sédiments.

Figure 3.2. Schéma de principe du tri granulométrique

Figure 3.3. Schéma de principe du rinçage des sédiments

Figure 3.4. Schéma de principe d'un hydro cyclone.

Figure 3.5. Schéma de principe de la flottation

Figure 3.6. Schéma de principe de la désorption thermique

Figure 3.7. Schéma de principe de la pyrolyse

Figure 3.8. Schéma de principe de l'incinération

Figure 3.9. Schéma de principe du procédé d'Oxydation/réduction

Figure 3.10. Schéma de principe de la vitrification thermique

Figure 3.11. Cycle de la bioremédiation.

Figure 3.12. Schéma du processus de phytoremédiation

Chapitre 4 : Exploitation des sédiments de dragage pour utilisation en matériaux de construction

Figure 4.1. Schéma général de valorisation des sédiments en matériaux de construction

Figure 4.2. Evolution des résistances en compression des différents mortiers en fonction de l'âge

Figure 4.3. Evolution de la perte de masse en fonction du temps d'immersion

Figure 4.4. Evolution de la consistance et de l'indice de fluidité de la barbotine en fonction de la concentration des ajouts en sédiments marins

Figure 4.5. Evolution des pourcentages en aluminés et en sulfates en fonction de la concentration massique en sédiments marins

Figure 4.6. Evolution de la contrainte seuil avec la concentration massique en sédiments marins

Figure 4.7. Résistance à la flexion et à la compression des mortiers

Figure 4.8. Variation du pourcentage de résistance avec le taux de substitutions en sédiment

Figure 4.9. Evolution des résistances à la compression pour les formulations avec et sans silicates en présence et en absence de sédiments

Figure 4.10. Evolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité avec la vitesse de cisaillement pour les mélanges à base de la vase de l'Oued Fodda et de l'argile de CERAL

Figure 4.11. Variation de la résistance à la flexion et de la perte au feu avec la température pour les deux carreaux éprouvette (vase de l'Oued Fodda et de l'argile de CERAL)

Figure 4.12. Variation du retrait en longueur et largeur avec la température pour les deux carreaux d'éprouvettes testées (Oued Fodda et CERAL)

Figure 4.13. Courbes contrainte/déformation et variations de la résistance à la compression et du module d'élasticité des deux bétons B1 et B2 (à 12,5 et 20% de sédiments)

Figure 4.14. Procédé Novosol (Unités A et B) pour le traitement des sédiments pollués

Figure 4.15. Variation de la masse volumique et la porosité avec la substitution des sédiments

Figure 4.16. Variation de la résistance à la compression (R_c) uni-axiale des mortiers en fonction du taux de substitution et des conditions de cure

Figure 4.17. Variation du temps de prise des pâtes avec la substitution des sédiments

Figure 4.18. Evolution de la fraction des résistances en compression des bétons à base de vase par rapport au béton témoin (sans vase)

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Principes généraux sur les sédiments de dragage

Tableau 1.1. Echelle et classification granulométrique des sédiments selon Wentworth

Tableau 1.2. Composition élémentaire des substances fulvique et humique dans les sédiments.

Chapitre 3 : Techniques de traitements des sédiments de dragage

Tableau 1.3. Types de métaux présents dans les sédiments de dragage

Chapitre 4 : Exploitation des sédiments de dragage pour utilisation en matériaux de construction

Tableau 1.4. Résultats des travaux de la drague

Tableau 4.1. Formulations avec ajout de sédiments marins de 0 à 20%

Tableau 4.2. Formulations de matériaux alcali-activés avec ou sans silicates, avec et sans sédiments à des rapports E/S de 0,45 et de 0,62

Liste des photos

Photo 1.1. Technique de dragage par agitation (à l'américaine)

Liste des notations et symboles :

$[\text{SiO}_4]^{4-}$: tétraèdre orthosilicates

(CaCO_3) : carbonate de calcium

(MgCO_3) : carbonate de magnésium

(FeCO_3) : la sidérite

(Na_2CO_3) : carbonate de sodium

$\text{M}(\text{OH})_x$: hydroxyde (base hydroxylée)

$\text{M}_x\text{O}_y(\text{OH})$: acide ternaire (oxacide)

Cd : cadmium

Cr : chrome

Cu : cuivre

Hg : mercure

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

PCB : polychlorobiphényl

(VOCs) : organiques volatils

(SVOCs) : organiques semi-volatils

INTRODUCTION GENERALE

La demande de ressources naturelles a grandement augmenté au cours de ces dernières années surtout dans le domaine du génie civil puisque tout projet de construction ou de réhabilitation requiert l'utilisation de matériaux granulaires. Une partie de ces matériaux granulaires sert à la fabrication de matériaux de construction, qui sont une préoccupation majeure de la communauté industrielle et scientifique.

Ainsi, le remplacement d'une partie du ciment par des sous-produits recyclés aura un impact économique et environnemental marqué. Dans une vision de développement durable et pour réduire l'appauvrissement des ressources naturelles, l'adoption de l'économie circulaire comme modèle de consommation est devenue une nécessité. Les sédiments de dragage pourraient constituer une alternative en devenant une nouvelle source de matériaux de construction. Habituellement, les sédiments non pollués sont immergés en mer ou traités par gestion à terre, une pratique qui s'éloigne de la vision du développement durable et d'économie circulaire. La considération des sédiments comme une richesse minérale recyclable limite l'usage de matériaux granulaires issus de l'extraction. Suivant leur origine, les sédiments contiennent une plus ou moins grande teneur en matières organiques, parfois en contaminants métalliques, et surtout en minéraux.

De ce fait, une caractérisation poussée est indispensable pour envisager un potentiel recyclage de ces déchets de sédiments. Cette valorisation peut être très avantageuse surtout dans des matériaux de construction comme les bétons, ciments et briques qui nécessitent un dosage élevé en éléments fins.

Le dragage est une activité nécessaire pour contrôler l'accumulation naturelle des sédiments au fond des ports, chenaux de navigation, et des voies navigables pour le maintien des profondeurs d'eau permettant la navigation où les opérations de dragage génèrent des quantités importantes de sédiments. Dans une optique du développement et de gestion durable et face à l'appauvrissement des ressources naturelles, les matériaux dragués présentent des opportunités dans le domaine du génie civil, grand consommateur de granulats.

L'étude entreprise dans ce mémoire s'intéresse à l'élaboration d'une analyse synthétique la gestion durable des déchets de sédiment en domaine de la construction. Ce travail est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les notions générales sur les sédiments de dragage (définitions et origine, composition minéralogique et les techniques de dragage).

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé le cadre réglementaire pour la gestion des sédiments de dragage aux échelles internationale et européenne.

Dans le troisième chapitre, nous décrivons les trois grands types de traitements adoptés sur les sédiments de dragage (physico-chimique, thermique et biologique). Dans le quatrième chapitre, on présentera un état des connaissances sur le comportement mécanique des sédiments traités et exploités dans le domaine des matériaux de construction.

Nous clôturons notre travail par une conclusion générale groupant les objectives atteintes dans notre étude.

Chapitre 1 :

**Principes généraux sur les sédiments de
dragage**

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous établissons une définition d'un sédiment de dragage en présentant son origine, les principaux types de sédiments, et leurs compositions minéralogiques. Nous décrivons après cela la pollution des sédiments ainsi que les différentes techniques de dragages.

I.2. Définition d'un sédiment :

Les sédiments sont des matériaux continentaux ou océaniques produits par des changements dans la matière du sol des dépôts alluviaux ou des roches. Ces matériaux sont enlevés par l'érosion et transportés par l'eau, le vent, la glace et la gravité. La formation et l'accumulation de sédiments constituent un phénomène de sédimentation (**Figure 1.1**). Ce processus est en grande partie naturel. Lorsque le dépôt implique une production locale du milieu, ces éléments sont considérés comme endogènes, et lorsqu'ils sont causés par l'érosion du bassin versant par des facteurs dynamiques externes, ces éléments sont considérés comme exogènes (Ramade, F, 1998). Cette origine a une grande influence sur leurs propriétés mécaniques de ces sédiments.

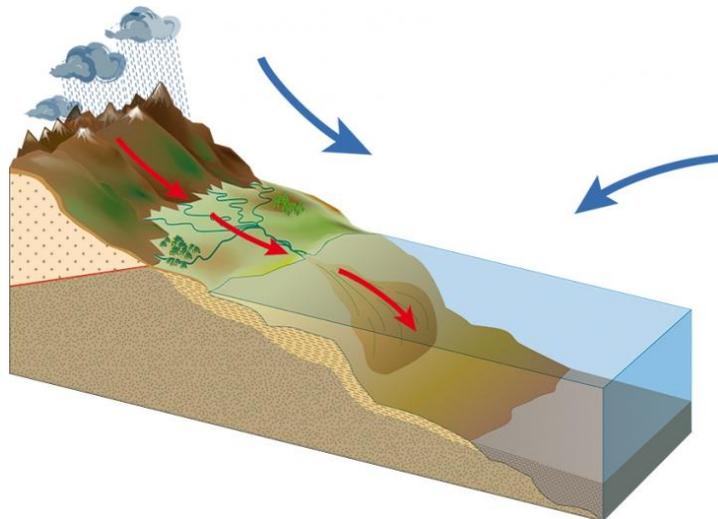


Figure 1.1. Phénomène de sédimentation [1]

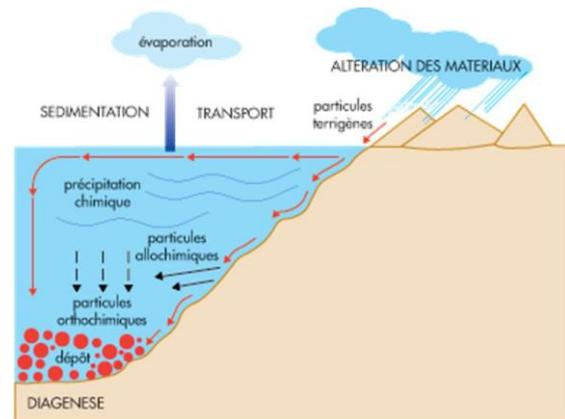
Les sédiments peuvent donc être d'origine (**Figure 1.2**) (Schneider, 2001) :

1. **Endogène** : Les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Cette production primaire engendre des débris de macrophytes (plantes aquatiques, cadavres de microphytes et d'animaux).

2. **Exogène** : Provient d'un apport de matières allochtones où il s'agit des particules issues de ruissellement des fleuves, des effluents ou de l'atmosphère. Cet apport peut être d'origine naturelle (décomposition de la matière végétale ou l'érosion des sols), ou anthropique (de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques, apports de matière en suspension, de matières organiques) (Aloui et Labiod, 2014).



Figure 1.2.
Erosion
exogène et
endogène des
sédiments.



I.3. Principaux types de sédiments :

Le sédiment est classé selon sa taille, c'est-à-dire le diamètre apparent (**Figure 1.3**) (Le plus petit diamètre de la sphère autour du sédiment). Par exemple, selon Wentworth (**Tableau 1.1**), on peut distinguer trois (03) principaux types de sédiments :

- Galets et graviers de l'estuaire des rapides ou érosion des falaises.
- Sable avec une granulométrie allant de quelques dizaines de microns à 2 microns de mètres sont le produit final de l'érosion fluviale de la roche cristalline, glacier disparu.
- Limons et boues d'une granulométrie inférieure à 60 μm .

Cette différence provient de la particularité de la vitesse de chute de ces sédiments.

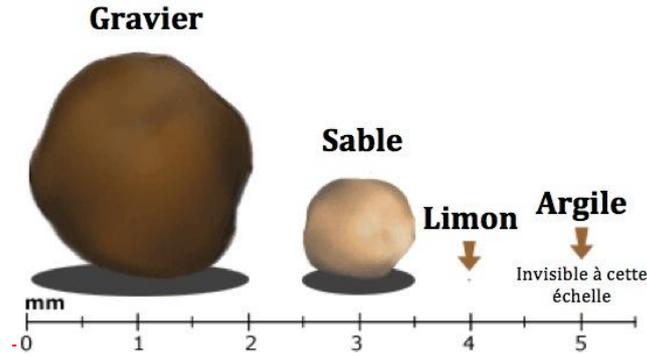


Figure 1.3. Classes granulaires d'un sédiment [2]

Diamètre(ϕ)	Diamètre(mm)	Sédiment meuble		Roche consolidée		classe
-3.32	10	Cailloutis et blocs		Conglomérats		Rudites
-1	2	Graviers				
0	1	Très grossiers	Sables	Très grossiers	Grés	Arénites
1	0.5	grossiers		Grossiers		
2	0.25	Moyens		Moyens		
3	0.125	Fins		Fins		
4	0.063	Très fins		Très fins		
5	0.0315	Très grossiers	silts	Très grossiers	Siltites	Lutites
6	0.016	Grossiers		Grossiers		
7	0.008	Moyens		Moyens		
8	0.004	Fins		Fins		
9	0.002	Très fins		Très fins		
		argiles		Argilites		

Tableau 1.1. Echelle et classification granulométrique des sédiments selon Wentworth

Pour les sédiments de dragage, les grains ayant une taille maximale inférieure à 2 mm, environ 70% de part les sédiments de dragage sont constitués de limons (taille de particule est inférieure à 63 μ m), ainsi les composants sont alors des argiles, des limons et parfois de sables fins.

Le comportement complexe des sédiments est causé par cette partie fine, provoquée par les interactions entre les ions présents dans la matrice aqueuse interstitielle (capacité d'échange de cations) aussi par les interactions de surface entre les particules solides comme la plasticité, perméabilité du matériau (Ammami, 2013).

I.4. Composition minéralogique des sédiments :

Le sédiment est caractérisé par une composition hétérogène dont la fraction minérale, organique et la quantité d'eau sont les composants généraux (**Ammami, 2013**) :

I.4.1. Fraction minérale :

Les composants principaux dans la fraction minérale d'un sédiment sont les silicates et les carbonates. Les silicates sont des combinaisons chimiques anioniques composées par des tétraèdres de $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés ayant une structure cristalline en feuillet.

Dans les sédiments, la plupart des minéraux carbonatés sont des calcites, mais éventuellement de la dolomite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), de la sidérite (FeCO_3), de la magnésite (MgCO_3) et du carbonate de sodium ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (**Hlavackova, 2005**).

En outre, des hydroxydes $\text{M}(\text{OH})_x$, oxyhydroxy des $\text{M}_x\text{O}_y(\text{OH})$ et des oxydes M_xO_y métalliques peuvent être présent dans les sédiments aussi des éléments métalliques (fer, aluminium), parfois certains métaux lourds.

I.4.2. Fraction organique :

Les composés organiques présents dans les sédiments sont généralement d'origine naturelle (**Figure 1.4**). Ils proviennent soit de débris végétaux, soit de micro-organismes, soit de colloïdes d'humus. Cette phase est composée de polymères naturels qui jouent un rôle important en tant que complexant. Il existe deux catégories :

- Acides non humiques : Ce sont des composés classiques relativement connus ; acides organiques, acides aminés, protéines, glucides.

-Acide humique : Cette partie constitue l'essentiel de la matière organique où elle peut représenter 80 à 90 % de la matière organique totale. Il existe deux grands types d'humus, l'acide humique (insoluble dans l'eau mais soluble en milieu alcalin) et l'acide fulvique représentent la plus grande proportion, soluble dans l'acide et les bases.

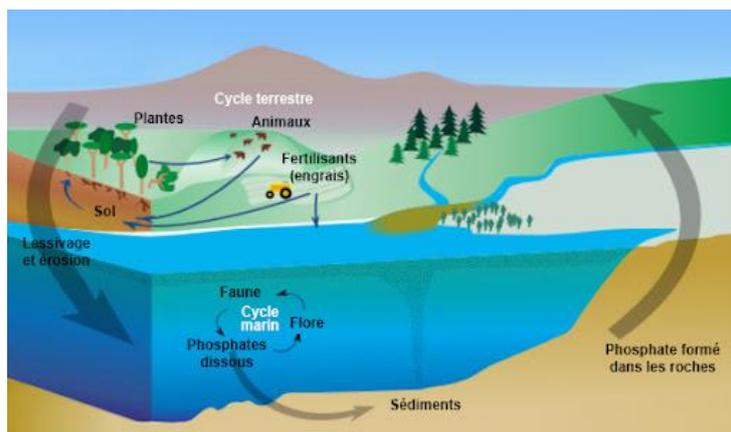


Figure 1.4. Composés organiques présents dans les sédiments.

Le tableau 1.2 ci-dessous représente la composition élémentaire des substances humiques en pourcentage dans les sédiments.

Eléments	C (%)	O (%)	H (%)	N(%)	S (%)
Acides fulviques	40 - 50	44 - 50	4 – 6	< 1 – 3	0 - 2
Acides humiques	50 - 60	30 - 35	4 – 6	2 – 6	0 - 2

Tableau 1.2. Composition élémentaire des substances fulvique et humique dans les sédiments.

Bien que la matière organique occupe un faible volume (environ 5%), elle joue un rôle très important car elle domine la plupart des phénomènes d'interaction moléculaire. Elle régule la mobilité d'un grand nombre de polluants, régulant ainsi leur biodisponibilité, notamment les composés organiques non ioniques. Outre la composition complexe et variable des sédiments, plusieurs autres paramètres (tels que le pH, le potentiel redox, la salinité, la teneur en oxygène et en sulfures) contrôlent la répartition des polluants entre les différentes phases des sédiments et leur biodisponibilité.

I.4.3 La phase en eau :

Il s'agit d'une partie très variable, en fonction de plusieurs facteurs, tels que les conditions de dragage et la localisation des sédiments. Généralement, on distingue l'eau libre, l'eau capillaire, l'eau colloïdale et l'eau cutanée (**Figure 1.5**) (Marot, F., 1998). La teneur en eau par rapport à la matière sèche dans les sédiments varie entre 50 % et 300%.

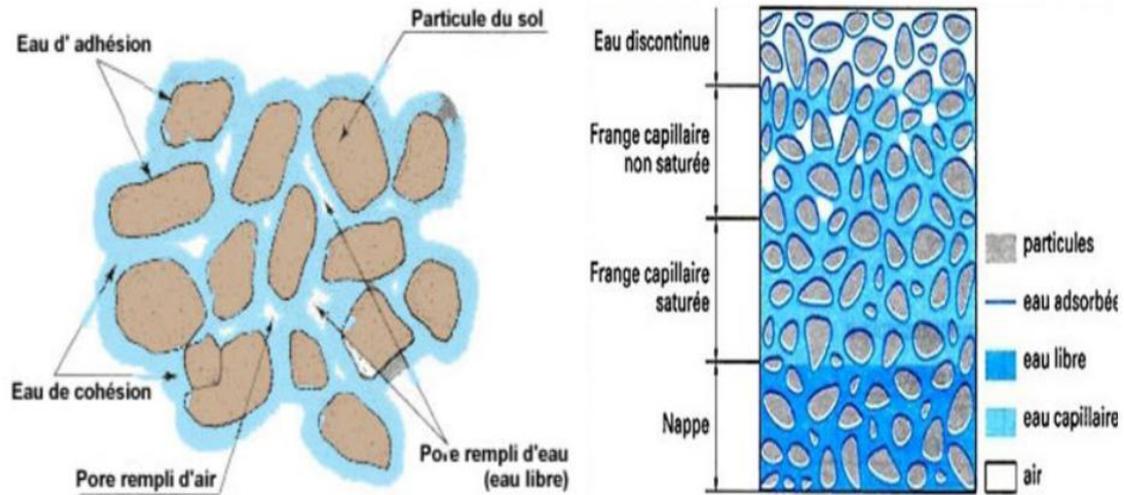


Figure 1.5. Formes de l'eau dans les sédiments (Tabiou, 2015).

I.5. Pollution des sédiments :

Face à la croissance des activités industrielles, les rivières, les lacs, etc. sont tous sujets au rejet de grandes quantités de substances toxiques. Les principaux polluants sont les métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Hg, N, Pb, Zn) et/ou les composés organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)). Les sédiments sont la destination ultime de cette pollution. La concentration de métaux dans les sédiments peut être 1 à 3 fois plus élevée que la surface de l'eau. Les principaux mécanismes de rétention sont l'adsorption, la précipitation et la complexation organique et inorganique.

La plupart des polluants contenus dans les sédiments sont difficiles à dissoudre dans l'eau. En raison de leur surface spécifique élevée, ils se trouvent principalement dans les matières en suspension et les particules fines (inférieures à $63\mu\text{m}$) des sédiments (**Figure 1.6**). S'il n'y a pas de remise en suspension, cette pollution n'est pas un problème. Une fois les sédiments extraits du milieu naturel au cours du processus de dragage et de stockage, des modifications des propriétés physiques et chimiques peuvent favoriser le rejet de polluants.

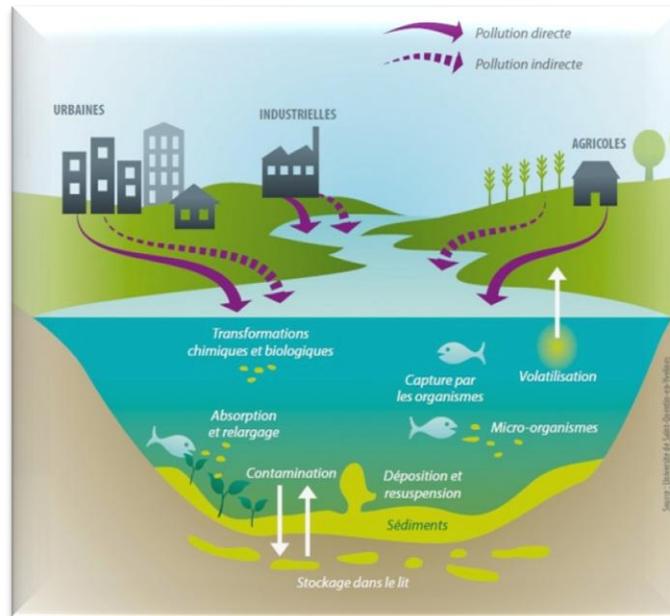


Figure 1.6. Réactions d'un écosystème aquatique aux pollutions dans un bassin versant.

I.5.1. Les polluants organiques :

Les propriétés de ces composés varient considérablement, selon les activités humaines et la source du rejet où il existe des dizaines de milliers de polluants organiques. La plupart de ces molécules n'existent pas naturellement, il est donc difficile pour les organismes de les décomposer.

Les principaux polluants organiques rencontrés dans les sédiments sont : les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (par exemple : naphthalène et phénanthrène), les composés phénoliques (par exemple : phénol) et les dérivés chlorés (polychlorobiphényles (PCB)).

Elles font l'objet de multiples interdictions, car la plupart de ces molécules sont cancérigènes et présentent un réel danger non seulement pour les organismes inférieurs mais aussi pour les organismes supérieurs et l'homme. Leur risque dépend de leur toxicité ou de leur nature, du degré et de la voie d'exposition, et des caractéristiques de la cible d'exposition.

I.5.2. Les métaux lourds :

Les métaux sont d'origine naturelle et sont classés selon qu'ils sont essentiels. Cette caractéristique varie d'un métal à l'autre et dépend de la concentration. 17 métaux sont considérés comme essentiels, dont (Na, K, Ca et Mg) sont présents en grandes quantités

(supérieures à $> 1 \text{ mmol Kg}^{-1}$ poids humide), tandis que les 13 autres sont présents à l'état de traces ($0,001$ à 1 mmol Kg^{-1} poids humide), ou des quantités ultra-traces ($<1 \text{ } \mu\text{mol Kg}^{-1}$ poids humide). Cependant, les métaux non essentiels n'ont actuellement aucun effet biologique connu. C'est le cas de Hg, As, Cd, Cr et Pb. Ils produisent des effets biologiques nocifs à de très faibles concentrations et sont considérés comme nocifs. **Le tableau 1.3** résume les métaux couramment trouvés dans les sédiments.

Tableau 1.3. Types de métaux présents dans les sédiments de dragage.

Cadmium	Engrais phosphatés ; traitement de surface des métaux ; industries de stabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles ; fabrication de caoutchouc ; colorants eau de ruissellement des voies de circulation.
Cuivre	Canalisation d'eau ; fils électriques ; radiateurs automobiles ; appareils de chauffage ; traitement de surface.
Zinc	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; conduites d'eau ; peinture ; piles ; galvanisation ; traitement de surface.
Nickel	Fabrication d'acier et d'alliage spéciaux ; recouvrement de surface par électrolyse ; hydrogénation des huiles et substances organiques ; fabrication de peinture de la laque et de produits cosmétiques.
Mercure	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; production et utilisation d'antifongiques ; appareils électriques ; produits électrolytiques ; du chlore et de la soude ; peinture ; pâte à papier fabrication de chlorures de vinyles et d'uréthane.
Chrome	Tannerie ; fabrication d'alliages spéciaux ; industries de traitement de surface
Plomb	Canalisation d'eau ; bac de batterie ; peintures ; additifs pour l'essence ; eau de ruissellement des voies de circulation ; industries pharmaceutiques et sidérurgiques ; télévision et ateliers photographiques.
Sélénium	Fabrication de peintures et de colorants; verre; semi-conducteurs; insecticides alliages
Arsenic	Pesticides; herbicides; fongicides; insecticides; raticides; défoliants; conservateurs du bois; cellule solaires; semi-conducteurs; électrographie; catalyse; pyrotechnique; céramique; produits pharmaceutiques; durcissement du cuivre et du plomb

I.6. Dragage des sédiments :

Les activités de dragage concernent principalement les ports et les voies navigables où ces opérations constituent une condition importante et nécessaire au maintien de ses activités. Elles sont l'accumulation de matériaux dans les ports et les cours d'eau provenant des bassins versants et/ou des océans et vise donc à rétablir le tirant d'eau, pour que le navire puisse se déplacer librement et en toute sécurité.

En Algérie, chaque année, plus de 30 millions de mètres cubes de sédiments se déposent dans 74 barrages et réservoirs (Remini, 2017). Une vingtaine de barrages sont gravement menacés par le phénomène d'envasement (Figure 1.7) où le dragage est désormais un choix inévitable pour prolonger leur vie. Néanmoins, la restauration des capacités de stockage par cette technique est une opération très coûteuse et peu économique pour les grands réservoirs (ICOLD, 1989). Dans certains pays, cette opération est nécessaire, surtout lorsqu'il y a peu de sites propice à la construction de nouveaux barrages.

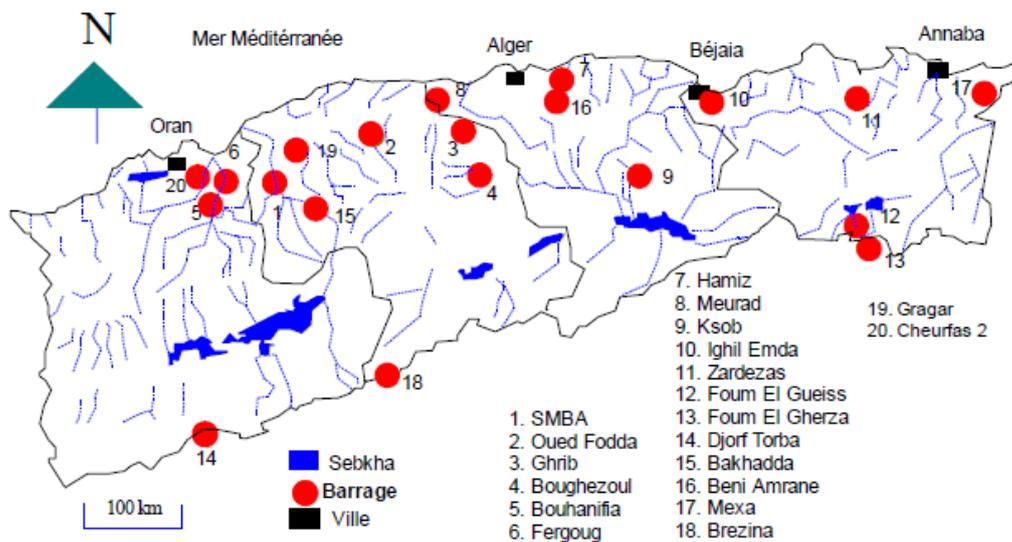


Figure 1.7. Carte des barrages algériens les plus envasés (Remini, 2017)

La première opération de dragage en Algérie a été effectuée par la drague "Lucien Dumay " à la fin des années (Remini, 1997). Quatre (04) réservoirs de barrage ont été dragués ; il s'agit des Barrages Sig, Cheurfas I, Fergoug I et Hamiz.

Au cours de la période 1958-1969, la drague "Lucien Dumay" a obtenu les premiers résultats ; résumés dans le tableau 1.4 où seulement 19 millions de mètres cubes de ~~limon~~ sédiments ont été dragués en 97 mois, et 96 millions de mètres cubes d'eau propre ont été perdus.

Tableau 1.4. Résultats des travaux de la drague « Lucien Dumay » [c]

Résultats	Barrages			
	Sig	Cheurfas I	Fergoug	Hamiz
Durée de dragage(en moi)	4	47	10	26
Volume de vase draguée (densité=1.6) (10^6 m ³)	1.96	10.2	3.1	3.77
Rapport : Eau clair/vase (en volume)	3.5	4.8	4.6	6.8
Densité moyenne du mélange	1.133	1.104	1.108	1.076

L'Algérie compte actuellement une vingtaine de barrages qui sont menacés d'envasement où ils ont perdu plus de 50 % de leurs capacités initiales. La seule façon d'économiser leur capacité de stockage d'eau est de nettoyer ou d'élever ces barrages. L'Algérie a acquis une expérience très riche en termes de techniques de traitement, les exemples de dragage et de rehaussement de barrages sont nombreux. Cette technologie est considérée aujourd'hui comme une solution sûre, mais le sort de la matière extraite a causé de graves problèmes écologiques. Des solutions ont été trouvées dans certains cas, comme le rejet le long des berges ou l'utilisation des sédiments comme matériau d'amélioration du sol, même en tant que matériau de construction.

1.7. Techniques de dragage :

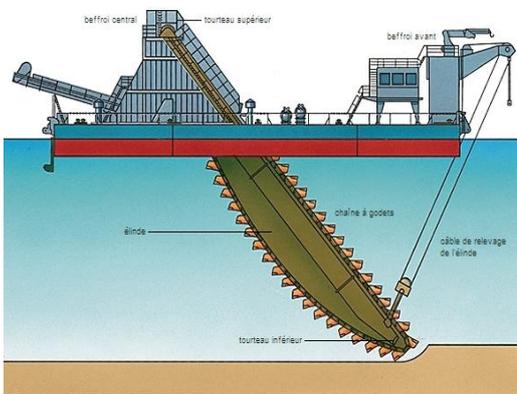
L'action de dragage se déroule suivant trois étapes (Manap et Voulvoulis, 2015) : le curage (l'opération de dragage), le transport et la disposition des sédiments dragués.

Le curage :

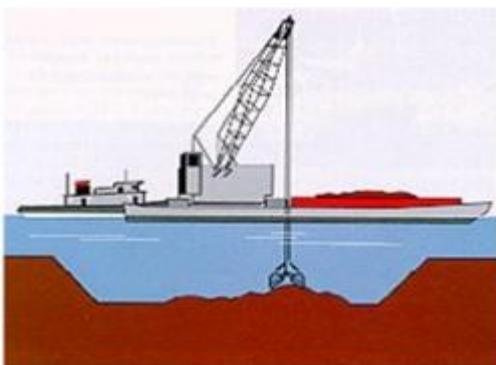
Selon la méthode à draguer et le volume du matériau, il peut être dragué par différentes techniques : Dragage mécanique (type benne preneuse), hydraulique (aspiration par tuyau), décapage (décapage avant extraction), dragage hydrodynamique (utilisation de l'écoulement de l'eau comme moyen de transport des sédiments) ou pneumatique (utilisé pour pompe à air comprimé) (Alzieu 1999; Hamdoun 2013). Parmi ces techniques, les dragages hydraulique et mécanique sont les deux méthodes les plus couramment utilisées. Certaines opérations nécessitent l'utilisation de techniques de dragage mixte (Combiner drague mécanique et hydraulique) (Le Guyader, 2013).

I.7.1. Les dragages mécaniques :

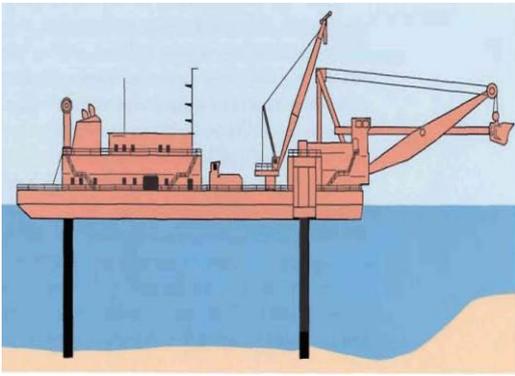
Le dragage mécanique est utilisé aussi bien dans les matériaux durs que meubles. Cette technique consiste à retirer les sédiments par l'application directe d'une force mécanique sur le fond. Il existe trois types de dragues mécaniques (Figure 1.8), soit la drague à godets, la drague à benne preneuse et la drague à pelle.



(a) Drague à godets



(b) Drague à benne preneuse

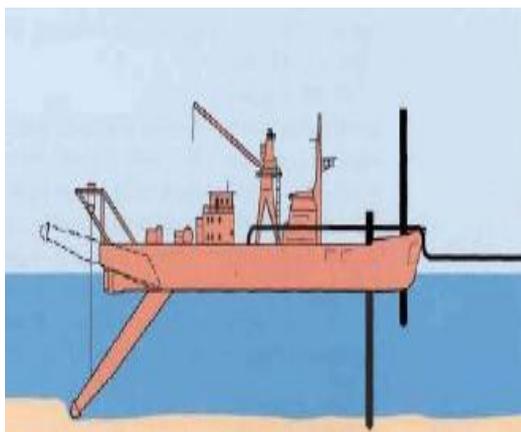


(c) Drague à pelle

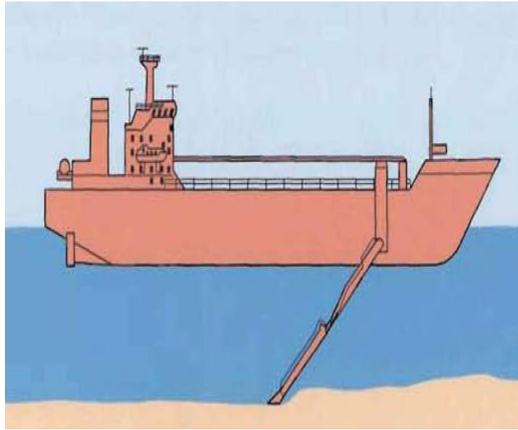
Figure 1.8. Représentation schématique des trois types de dragages mécaniques (Alzieu, 1999).

I.7.2. Les dragages hydrauliques :

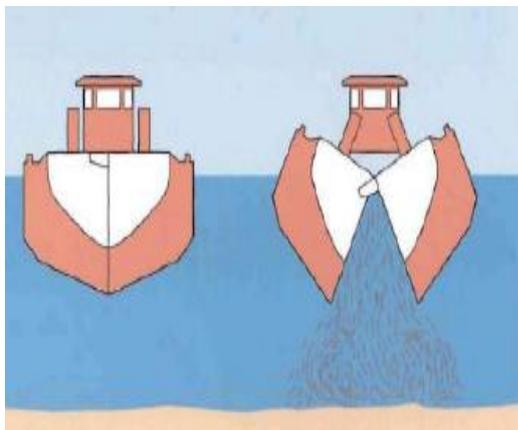
Le dragage hydraulique s'effectue au moyen d'un appareil qui désagrège les sédiments puis les aspire en suspension dans une conduite ayant un fort débit d'eau. Les dragues hydrauliques sont généralement montées sur des barges munies de pompes centrifuges qui sont actionnées par un moteur diesel ou électrique. Les pompes sont raccordées à des conduites (pipelines) de refoulement de 15 à 122 cm de diamètre, maintenues en surface par des flotteurs. Il existe trois principaux types de dragues hydrauliques (Figure 1.9): la drague aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement, la drague aspiratrice en marche et la drague suceuse autoporteuse (fendable).



(a) Drague aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement



(b) Dragage aspiratrice en marche



(c) Dragage suceuse autoporteuse (fendable)

Figure 1.9. Représentation schématique des trois types de dragages hydrauliques (Alzieu, 1999).

Ces dragues hydrauliques aspirent et donc repoussent des sédiments sous forme de boues liquides d'une teneur en eau d'environ 85 %. Concernant le volume extrait, l'une des principales différences entre le dragage mécanique et le dragage hydraulique est le volume extrait et la dilution du sédiment. En effet, bien que les équipements mécaniques ne perturbent que faiblement les sédiments (expansion de 10 %), le dragage par succion consiste à diluer le volume des sédiments in-situ avec 3 à 10 fois le volume d'eau.

La figure 1.10 suivante présente schématiquement les proportions draguées par ce type de dragage hydraulique.

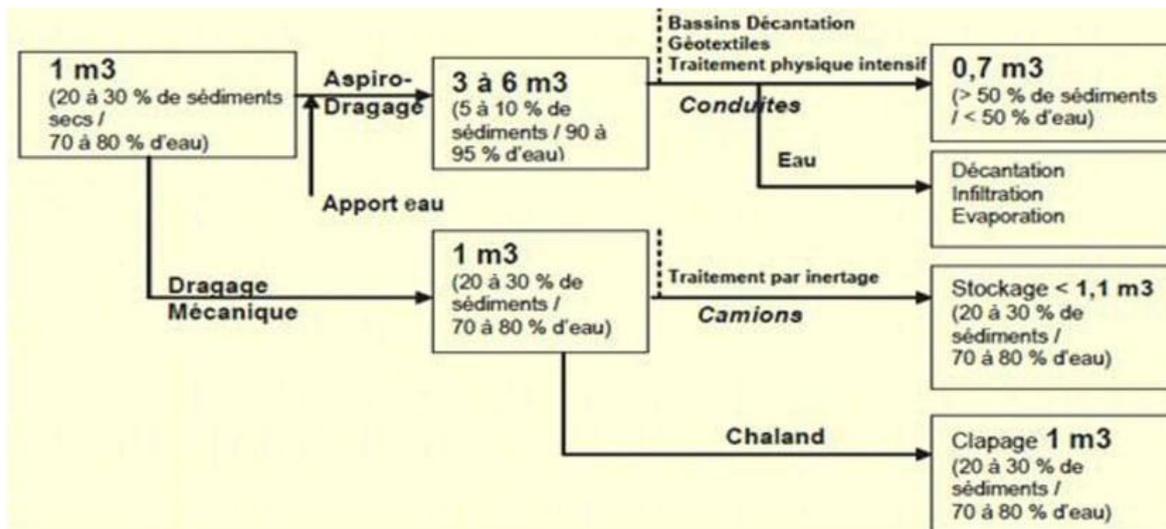


Figure 1.10. Proportions draguées par la technique de dragage hydraulique (Boutin, 2000).

I.7.3. Les dragages par agitation (à l'américaine) :

La technique de dragage par agitation (à l'américaine) (**Photo 1.1**) consiste à rejeter en continu les sédiments pompés dans le milieu, soit au bordé, soit par clapets ouverts. Cette technique est d'autant plus efficace qu'elle est pratiquée dans des zones à forts courants susceptibles d'évacuer vers les zones souhaitées la mixture issue de la surverse.

Le dragage à l'américaine est utilisé occasionnellement dans certains estuaires où cette pratique persiste ponctuellement pour répondre à la nécessité d'évacuer rapidement des matériaux encombrant le chenal en liaison avec l'arrivée d'un navire de fort tirant d'eau et qui ne peuvent être transportés et immergés sur le site de dépôt faute de temps. Le recours à ce type de dragage se justifie par des raisons uniquement économiques et non environnementales (**GEODE, 2012**).



Photo 1.1. Technique de dragage par agitation (à l'américaine)

I.8. Transport et dépôt des sédiments de dragage :

Le choix de la méthode de transport des sédiments dragués dépend de la localisation des sédiments. Par exemple, les sédiments peuvent être transportés dans la région par bateau, immerger ou stocker sur terre par camion. En raison de l'état des sédiments qui représente de gros volumes à forte teneur en eau ($> 100\%$), le transport de ce type de matériau pose de nombreux défis économiques et écologiques. Par conséquent, un processus de déshydratation des sédiments pour réduire leur eau et leur volume sont nécessaires. La technologie de déshydratation des sédiments, également appelée prétraitement, peut être traditionnellement divisée en plusieurs catégories : décanteurs, technologie mécanique (compression, filtre presse ou filtre à bande, consolidation sous vide, Centrifugation, etc.) ou de chaleur (évaporation).

Ces processus de déshydratation sont généralement peu coûteux et faciles à mettre en œuvre, mais ils peuvent être longs et leur efficacité est plus ou moins bonne. Cependant, la technologie d'électro déshydratation peut surmonter ces faiblesses causées par la forte teneur en eau et la faible perméabilité des sédiments (Citeau et al. 2012 ; Ammami, 2013).

La submersion et le dépôt à terre sont les deux principales destinations des sédiments de dragage. D'après les statistiques de GEODE (2012), pour les ports maritimes côtiers, Dans la Manche et l'océan Atlantique, 7,3 % et 3,9 % des matières se déposent à terre. Autre une partie des matériaux de dragage de la Manche et de l'océan Atlantique, 2% et 4% sont utilisés pour recharger la plage.

Conclusion :

Aujourd'hui, la gestion des sédiments de dragage est un enjeu majeur et un véritable enjeu environnemental ; car les rendements sont étonnants et ils sont accusés de causer des effets néfastes. Ces sédiments sont généralement des matériaux fins riches en minéraux, et leur mise en valeur peut remplacer leur utilisation dans divers domaines du génie civil. D'une manière générale, les canaux d'aménagement sédimentaire dépendent de plusieurs critères indivisibles, à savoir des critères économiques. La technologie, l'environnement et la réglementation ont conduit à la conversion de ce sédiment de simple déchet à éliminer en une ressource naturelle exploitable.

Chapitre 2 :

Règlementation et gestion des sédiments de dragage

II.1. Introduction

La problématique relative à la gestion des sédiments gérés à terre est récente et a suscité de nombreuses réflexions chez les gestionnaires de ce domaine. Les connaissances et retours d'expérience acquis ces dernières années ont permis une avancée considérable en matière de gestion et de valorisation des sédiments de dragage.

Au fil de ce chapitre, on abordera le cadre réglementaire pour la gestion des sédiments dragués aux échelles internationales et européennes en vue de bien les exploiter en domaine de construction.

II.2. Cadre réglementaire développé pour la gestion des sédiments dragués

Depuis le début des années 2000, la réglementation internationale a été renforcée dans le domaine des opérations de dragage afin d'entretenir les voies navigables, restaurer les voies d'eau et/ou améliorer la qualité du milieu aquatique marin ou continental.

Cette réglementation oblige désormais une évaluation systématique de la qualité physico-chimique de ces sédiments préalablement à toute opération de dragage. Des seuils ont été définis aussi bien pour le milieu aquatique marin que continental. Ainsi, les caractéristiques et en particulier le niveau de contamination des sédiments permettent d'orienter ceux-ci vers le mode de gestion jugé le plus adapté.

II.2.1. Echelle internationale

Au niveau international, trois instruments juridiques encadrent et organisent les activités suivantes : Dragage et gestion des sédiments extraits (Hayet et al.2017) :

1. La convention OSPAR (1992) ;
2. Le protocole de Londres (1996) ;
3. La convention de Barcelone.

Au niveau réglementaire, ils engagent aux pays signataires de respecter certaines dispositions, dont l'application se traduit le plus souvent par une modification ou une mise à jour de la législation au niveau communautaire et/ou national. En matière de gestion des sédiments, ces conventions défendent un principe général commun d'interdiction d'immersion de toute substance. Elles autorisent à titre exceptionnel l'immersion en mer sous réserve de démontrer que les sédiments ne sont pas dangereux pour le milieu marin.

La caractérisation des sédiments de dragage définie par ces conventions consiste en la comparaison de résultats d'analyses physico-chimiques avec des seuils fixés par chaque état signataire.

1. La convention OSPAR (1992)

La convention pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique Nord-Est, dite **OSPAR**, adoptée en 1992, est une convention de mer régionale précurseur en matière de surveillance du milieu marin.

Elle résulte de la fusion de deux conventions internationales : la convention d'Oslo de 1972 (traitant de la prévention de la pollution marine) et la convention de Paris de 1974 (traitant des rejets de substances d'origine tellurique). Elle vise à prévenir et éliminer la pollution marine résultant des activités humaines en Atlantique Nord-Est afin d'en protéger les écosystèmes et la diversité biologique.

La Convention OSPAR compte 16 parties contractantes (Figure 2.1) : les États riverains de l'Atlantique du Nord-Est (Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, France, Irlande, Norvège, Islande, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède), ainsi que le Luxembourg, la Finlande, la Suisse et l'Union Européenne. La Commission OSPAR, composée des représentants de chaque partie contractante, examine l'état de sa zone maritime concernée, adopte diverses recommandations et décisions et veille à leur mise en œuvre.

La zone maritime OSPAR couvre une superficie de 13,5 millions de km², soit 4% des océans de la planète [1]. Elle comprend :

- les eaux intérieures et la mer territoriale des parties contractantes ;
- la zone située au-delà de la mer territoriale et adjacente à celle-ci sous juridiction de l'état côtier ;
- la haute mer, y compris l'ensemble des fonds marins correspondants.

La Convention **OSPAR** évalue périodiquement l'état du milieu marin de sa zone de compétence. Sa priorité, au-delà de la surveillance, est la protection de la biodiversité marine.

Le travail d'évaluation et les actions menées dans le cadre de la Convention **OSPAR** favorisent l'amélioration des mesures prises en faveur de la protection du milieu marin sur le plan international. Ils renforcent également la coopération entre les états signataires et membres de l'UE dans le cadre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM, 2008), qui vise à atteindre le bon état écologique des eaux européennes en 2020.

Des progrès importants ont été accomplis grâce aux mesures prises dans le cadre de la Convention **OSPAR** (Figure 2.1).

- En matière de protection des espèces et habitats en danger ou en déclin en Atlantique Nord-Est : diverses recommandations ont été adoptées et un programme d'actions collectives a été établi pour les mettre en œuvre ;
- En termes de lutte contre les pollutions et déchets marins : le plan d'actions adopté a permis un recul sensible des émissions de substances nucléaires dans le milieu marin,

qui se rapprochent aujourd'hui de l'objectif 2020, c'est-à-dire une concentration de substances radioactives artificielles proche de zéro. Les résultats sont plus contrastés s'agissant des substances dangereuses non-radioactives. Par ailleurs, **OSPAR** a adopté un plan d'action régional pour lutter contre les déchets marins ;

- En terme d'aires marines protégées, **OSPAR** a permis le développement du réseau dans sa zone maritime, que ce soit dans les zones sous-juridictions mais également hors juridictions des Etats Parties. La dernière réunion de la Commission **OSPAR** (2018) a permis la classification de nouvelles AMP (portant son réseau actuel d'AMP à 6,1% de la zone maritime d'**OSPAR**). La coopération avec les autorités compétentes pour la gestion des activités humaines dans les zones au-delà des juridictions nationales est toutefois nécessaire pour une protection efficace de l'environnement marin.

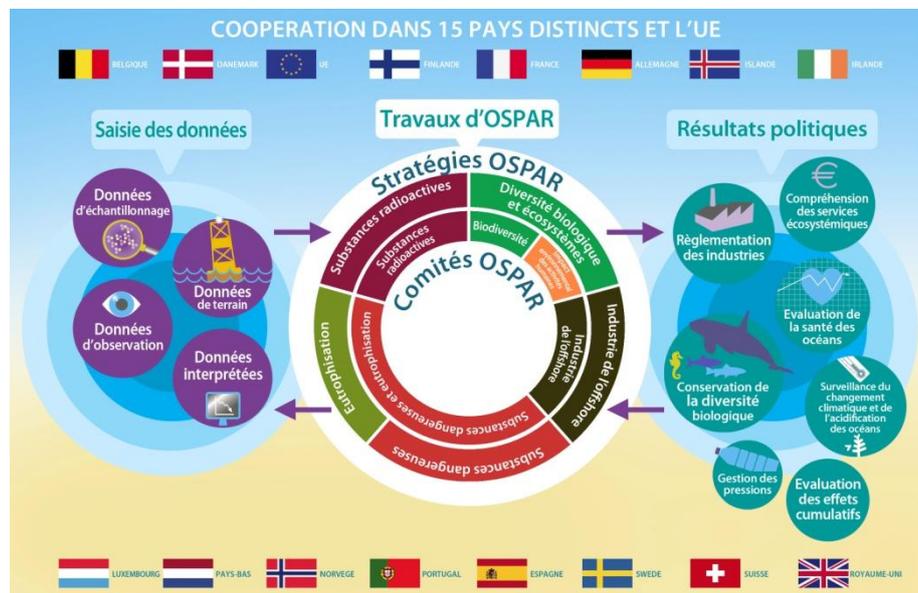


Figure 2.1. Objectifs de la convention OSPAR (1992) [2].

2. Le protocole de Londres (1996)

C'est l'une des premières conventions internationales (entrée en vigueur le 30 Août 1972) pour la protection du milieu marin contre les activités humaines (Figure 2.2). Le traité de 1972 a été complété et modernisé en 1996 par le protocole de Londres. Ce dernier interdit toute incinération en mer et la plupart des immersions, à l'exception de certains figurants dans une contre-liste. C'est le cas principalement de certains déchets inertes (déblais, béton) ou biodégradables (déchets de poissons, végétaux) et des épaves de navires. Ces immersions sont réglementées et s'intègrent dans des procédures de réduction des impacts environnementaux.



Figure 2.2. Pollution en milieu maritime causée par des activités humaines.

Le protocole introduit aussi de nouvelles notions telles que le principe de précaution et le principe pollueur-payeur. Il élargit en outre la convention au domaine terrestre en incitant au développement de solutions terrestres de prévention des pollutions et de traitement des déchets.

Cette convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, communément appelée Convention de Londres ou **LC72** est un traité international sur le contrôle de la pollution des mers par immersion de déchets, encourageant les accords régionaux en complément du texte de base. Elle porte sur l'élimination des déchets et autres matériaux en mer, depuis les navires, aéronefs et plates-formes. Elle ne couvre ni les émissions à partir de sources côtières, comme les égouts, ni les déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales maritimes, et ne s'applique pas en cas de force majeure lorsqu'il s'agit de sauvegarder des vies humaines ou de sécurité des navires. Elle ne couvre pas non plus le stockage de matière dans un but autre que l'élimination.

La Convention de Londres est composée de 22 articles et de 3 annexes :

- L'annexe I liste les déchets dont l'immersion est interdite (bien que pour certains de ces matériaux, l'immersion soit autorisée à l'état de traces ou sous une forme devenant rapidement inoffensive) ;
- L'annexe II détaille les déchets pour lesquels un permis spécifique d'immersion est requis ;
- L'annexe III précise les critères régissant la délivrance d'un permis général d'immersion pour tous les autres déchets, et traite de la nature des déchets autorisés, des caractéristiques du lieu d'immersion et de la méthode d'évacuation.

L'objectif principal de la Convention de Londres est d'empêcher l'évacuation incontrôlée de débris en mer pouvant mettre en danger la santé humaine, les organismes marins,

l'environnement maritime, ou pouvant interférer avec les autres activités maritimes. La Convention étend son champ sur toutes les eaux maritimes autres que les eaux internes des États signataires (Figure 2.3).

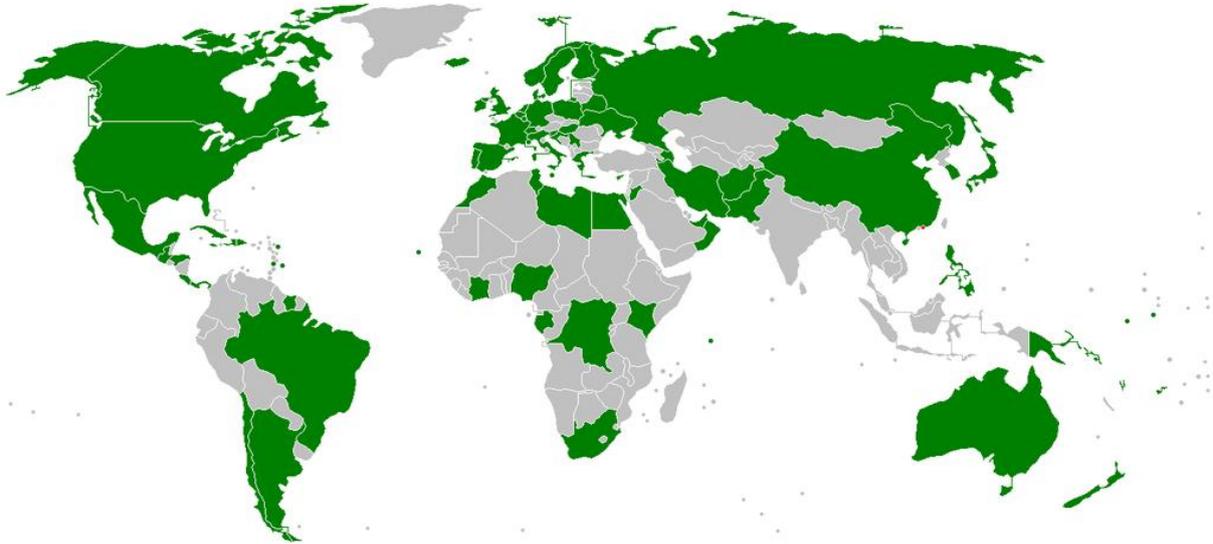


Figure 2.3. Pays signataires de la Convention de Londres [3].

3. La Convention de Barcelone (1995)

La Convention pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée, intitulée à l'origine Convention pour la protection de la mer Méditerranée contre la pollution, et souvent simplement appelée la Convention de Barcelone, est une convention régionale adoptée en 1976 pour prévenir et réduire la pollution marine par les navires, les aéronefs et les sources terrestres en mer Méditerranée. Cela inclut les décharges, les eaux de ruissellement et les rejets d'effluents liquides. Les signataires acceptent de coopérer pour réduire la pollution et de protéger et améliorer le milieu marin de la mer Méditerranée, grâce à la surveillance et à la recherche scientifique. La convention a été adoptée le 16 février 1976 et amendée le 10 juin 1995.

Les objectifs de la convention sont [4]:

- de protéger le milieu marin et le littoral en prenant toutes les mesures visant à prévenir et à réduire la pollution, ainsi qu'à éliminer celle-ci autant que possible, qu'elle soit due à des activités terrestres ou marines;
- d'évaluer et de contrôler la pollution;
- d'assurer la gestion durable des ressources marines et côtières;
- d'intégrer l'environnement au développement économique et social;
- de protéger le patrimoine naturel et culturel;

- de renforcer la solidarité entre les pays bordant la Méditerranée; et de contribuer à améliorer la qualité de la vie.

Les parties contractantes (Figure 2.4) à la convention s'engagent à:

- introduire un système de coopération et mettre en œuvre un programme intégré de surveillance et d'évaluation comportant des informations et des évaluations pour protéger le milieu marin et le littoral de la Méditerranée et réduire ou éliminer la pollution dans la Méditerranée en vue de parvenir à un bon état écologique;
- instaurer des aires marines protégées (dénommées «AMP»), ainsi que des aires spécialement protégées d'importance méditerranéenne (dénommées «ASPIM»);
- mettre en œuvre une gestion intégrée des zones côtières (GIZC);
- s'attaquer aux sources terrestres de pollution;
- s'attaquer aux sources marines de pollution;
- prévoir des plans d'intervention d'urgence;
- coopérer dans les domaines des sciences et de la technologie;
- élaborer des procédures appropriées concernant la détermination des responsabilités et la réparation des dommages résultant de la pollution en violation des dispositions de la convention.



Figure 2.4. Pays méditerranéens concernés par la convention de Barcelone [5].

La convention a été modifiée en 1995. Les principales modifications portaient sur:

- l'extension du champ d'application géographique de la convention au littoral;
- l'application du principe de précaution;
- l'application du principe «pollueur-payeur»;
- la promotion des analyses d'impact;
- la protection et la préservation de la diversité biologique;
- la lutte contre la pollution due à la circulation transfrontalière de déchets dangereux;
- l'accès à l'information et la participation du public.

La convention est assortie de sept (7) protocoles:

Le protocole «immersions»

Ce protocole couvre uniquement la pollution dans la région de la mer Méditerranée due aux navires et aux aéronefs. Il interdit les opérations d'immersion de certains types de déchets et de substances (certains composés toxiques, le mercure, le cadmium, les plastiques, le pétrole brut, etc.).

Il nécessite la délivrance préalable d'autorisations nationales pour d'autres types de déchets ou de substances comme l'arsenic, le plomb, le cuivre, le zinc, le chrome, le nickel, les conteneurs, la ferraille et certains types de pesticides.

Le protocole «prévention et situations critiques»

Ce protocole incorpore dans la convention de Barcelone des règles pour la coopération entre les parties en matière de prévention et, en cas de situation critique, de lutte contre la pollution de la Méditerranée due aux navires. Il s'efforce également de promouvoir le développement et la mise en œuvre des règles internationales adoptées sur la base de l'Organisation maritime internationale, où il précise certaines mesures opérationnelles que les parties doivent adopter en cas de pollution due à des navires (mesures d'évaluation, d'élimination ou de réduction, d'information), ainsi que des mesures d'urgence qui doivent être prises à bord des navires, des installations au large ou dans les ports (en particulier, le respect des plans d'urgence et mise à disposition de ces derniers).

Le protocole «tellurique»

Ce protocole couvre la pollution due aux déversements par les fleuves, les émissaires, les canaux et les autres cours d'eau, ainsi que la pollution émanant de toute autre activité (y compris la pollution atmosphérique d'origine tellurique) située sur le territoire d'une partie au protocole.

Il énumère d'une part les substances dont le rejet est interdit, ainsi que les facteurs devant être pris en compte pour éliminer la pollution due à ces substances et d'autre part les substances dont le rejet est soumis à autorisation par les autorités nationales compétentes.

Ce protocole promeut la coopération en matière de recherche et d'information, ainsi que l'adoption des programmes, des mesures et des normes appropriées pour réduire ou éliminer les substances visées.

Le protocole «aires spécialement protégées et diversité biologique»

Ce protocole concerne:

- les aires spécialement protégées dans la Méditerranée;
- la protection des ressources naturelles de la région méditerranéenne;

- la préservation de la diversité du pool génétique; et la protection de certains sites naturels par la création d'une série de zones spécialement préservées.

Il exige que les parties élaborent des orientations pour l'instauration et la gestion des zones protégées et énumère un certain nombre de mesures appropriées que les parties doivent adopter, comme: l'interdiction de déverser ou de rejeter des déchets et la réglementation de l'introduction de toute espèce non indigène ou génétiquement modifiée.

Ce protocole définit ainsi les mesures nationales ou locales que les parties doivent prendre afin de protéger les espèces animales et végétales dans toute la zone méditerranéenne.

Le protocole «offshore»

Ce protocole couvre un large éventail d'activités d'exploration et d'exploitation et aborde un certain nombre de questions, notamment:

- les exigences en matière de demandes de permis;
- l'enlèvement des installations abandonnées ou désaffectées;
- l'utilisation et l'élimination de substances nuisibles;
- les exigences en matière de responsabilité et de dédommagement;
- la coordination avec d'autres parties à la convention de Barcelone au niveau régional ;
- Individuellement ou par une coopération bilatérale ou multilatérale, les parties doivent adopter toutes les mesures appropriées pour prévenir, réduire, combattre et maîtriser la pollution dans les aires couvertes par le protocole et résultant des activités d'exploration et d'exploitation en mer ;

Il s'engage aussi à utiliser les meilleures techniques disponibles, économiquement appropriées et efficaces sur le plan de l'environnement.

Le protocole sur les déchets dangereux

Ce protocole exige que les parties coopèrent lorsqu'une grande quantité de pétrole ou d'autres substances nocives dans la mer Méditerranée, qu'elle se soit accumulée ou qu'elle ait été déversée de façon accidentelle, présente un risque grave et imminent pour le milieu marin, le littoral ou les intérêts économiques, sanitaires ou écologiques d'une ou plusieurs parties.

La coopération est axée sur les objectifs suivants:

- établir des plans d'action d'urgence;
- promouvoir les mesures visant à lutter contre la pollution marine;
- surveiller l'état de la mer Méditerranée et échanger les informations y afférentes;
- diffuser les informations sur l'organisation des ressources; et sur les nouvelles méthodes de prévention et de lutte contre la pollution, et développer des programmes de recherche sur ce sujet.

Le protocole «gestion intégrée des zones côtières (GIZC)»

Il a pour objectif de définir une base commune pour une gestion intégrée des zones côtières, fondée sur une approche écosystémique de la Méditerranée. Ce protocole permet :

- le développement durable des zones côtières par la planification rationnelle des activités;
- la préservation des zones côtières;
- l'utilisation durable des ressources naturelles;
- la préservation des écosystèmes et des côtes;
- la prévention et la limitation des catastrophes naturelles et du changement climatique;
- le renforcement de la coopération.

II.2.2. Echelle européenne

La législation relative pour le traitement des matériaux dragués est compliquée et se situe à l'intersection de la directive cadre Européenne sur l'Eau (DCE), les déchets et la stratégie pour le milieu marin. Les procédures et les valeurs limites relatives aux polluants sont utilisées pour permettre l'élimination en mer ou la gestion à terre varient d'un pays à l'autre et ~~il n'y a~~ aucun règlement harmonisé au niveau de l'UE n'existe.

1. La Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE)

La Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE) s'applique à l'ensemble des Etats membres de l'Union Européenne et établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, en vue d'une meilleure gestion des milieux aquatiques. Elle fixe comme objectif général l'atteinte d'un bon état écologique et chimique des masses d'eau souterraines et de surface. Les Etats membres doivent en conséquence prévenir toute dégradation supplémentaire, préserver et améliorer l'état des écosystèmes aquatiques.

Le littoral de chaque bassin hydrographique est découpé en masses d'eau côtières et de transition qui sont des unités géographiques cohérentes définies sur la base de critères physiques ayant une influence avérée sur la biologie :

- Critères hydrodynamiques (courant, marnage, stratification, profondeur...),
- Critères sédimentologiques (sable, vase, roche...).

Pour évaluer la qualité écologique et chimique de ces masses d'eau, la DCE comporte trois outils [6] :

- **Les éléments de qualité** : la faune, la flore, des paramètres physico-chimiques mais aussi hydro-morphologiques sont surveillés dans les masses d'eau afin d'en évaluer

la qualité écologique. Pour ce faire, une liste d'éléments de qualité jugés pertinents sont suivis régulièrement dans le cadre du programme de surveillance.

- **Le programme de surveillance** : l'article 8 de la DCE prévoit la mise en œuvre d'un programme de surveillance des masses d'eau, de manière à « dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux au sein de chaque bassin hydrographique ». Ce programme est mené sur la durée d'un plan de gestion, soit 6 ans. Pour répondre à cette demande, chaque bassin hydrographique a ainsi défini différents réseaux de contrôles (de surveillance, opérationnel, d'enquête, additionnel).
- **Les indicateurs de qualité** : les données générées dans le cadre du programme de surveillance permettent de calculer des indicateurs de qualité. Une grille d'évaluation découpée en classes pour la biologie, la physico-chimie et l'hydro-morphologie permettent d'attribuer un état de la masse d'eau pour l'élément de qualité. Le développement des indicateurs et des seuils associés sont confiés à des experts de chaque thématique.

Les opérations de dragage doivent tenir compte des objectifs de qualité des eaux de surface imposant par la DCE.

2. Directive Cadre sur les Déchets 2008/98/CE du 19 novembre 2008

Cette directive établit un cadre juridique pour le traitement des déchets dans l'Union européenne. Son objectif est de protéger l'environnement et la santé humaine en prévenant les effets nocifs de la production et la gestion des déchets (GEODE, 2012).

La directive cadre sur les déchets 2008/98/CE du 19 novembre 2008 exclue de son champ d'application les « sédiments déplacés au sein des eaux de surface aux fins de gestion des eaux et des voies d'eau, de prévention des inondations, d'atténuation de leurs effets ou de ceux des sécheresses ou de mise en valeur des terres sont exclus du champ d'application de la présente directive, s'il est prouvé que ces sédiments ne sont pas dangereux. Par effet inverse, les sédiments dangereux sont donc considérés comme des déchets au sens de cette directive.

Conclusion :

Compte tenu des quantités considérables de sédiments contaminés, entreposés à terre, leur gestion est devenue un défi important auquel sont confrontés les gestionnaires, d'un point de vue technologique, juridique, économique et environnemental. En tant que processus de gestion, la caractérisation, l'analyse et l'évaluation des sédiments dragués sont nécessaires avant leur transport et traitement.

Les connaissances acquises ces dernières années ont permis une avancée considérable en matière de réglementation et de gestion de ces sédiments dragués.

Chapitre 3 :

Techniques de traitements des sédiments de dragage

III.1. Introduction

Depuis les années 1980, les scientifiques de nombreux pays industrialisés cherchent des solutions pratiques pour traiter les sédiments contaminés. Contrairement aux études des sols pollués, où la nature et les caractéristiques des polluants sont connues, la problématique des sédiments est beaucoup plus complexe. D'une part, la diversité de la provenance des polluants est très difficile à reconstituer, et d'autre part, la transformation et la dispersion en cours de route de ces polluants, rendent laborieux leur caractérisation.

Néanmoins, plusieurs techniques sont actuellement développées à travers le monde pour traiter ces sédiments de dragage pollués. Ce traitement implique presque toujours la mise en œuvre de plusieurs techniques et procédés, simultanément ou successivement.

On abordera dans ce chapitre les trois grands types de traitements adoptés sur les sédiments de dragage (physico- chimique, thermique et biologique) en vue de les exploiter en domaine de construction.

III.2. Méthodes d'extraction et de prétraitement des sédiments

Compte tenu de la grande quantité de sédiments contaminés, entreposés à terre, leur gestion est devenu un défi important auquel sont confrontés les gestionnaires, d'un point de vue technologique, juridique, économique et environnemental. En tant que processus de gestion, la caractérisation, l'analyse et l'évaluation des sédiments dragués sont nécessaires avant leur Transport et traitement (Song, 2016).

Les principaux objectifs du traitement des sédiments contaminés sont l'extraction ou l'immobilisation des contaminants organiques ou inorganiques dans la matrice des sédiments pour empêcher leur infiltration dans l'environnement.

III.2.1. Prétraitement et rinçage des sédiments pollués

D'une façon générale, le traitement des sédiments de dragage a pour objectif, soit la décontamination des polluants, soit l'immobilisation des polluants. Plusieurs techniques sont actuellement disponibles pour faire face aux problématiques des sédiments de dragage pollués.

1. Prétraitements

Les prétraitements ont pour objectif de conditionner le sédiment en vue de son traitement ultérieur. Le recours au prétraitement est essentiellement nécessaire pour débarrasser ce sédiment des gros débris (pneus, débris et bloc de carrosseries d'automobile, cailloux, etc.) et surtout pour déshydrater le sédiment. Deux techniques sont généralement utilisées :

- La déshydratation qui permet de réduire jusqu'à 50% l'eau interstitielle contenue dans les sédiments (Ramaroson, 2008). Plusieurs techniques sont utilisés pour cela, à savoir

(Figure 3.1) : la centrifugation, le filtre presse, la consolidation sous vide, les bassins de décantation et les évaporateurs.

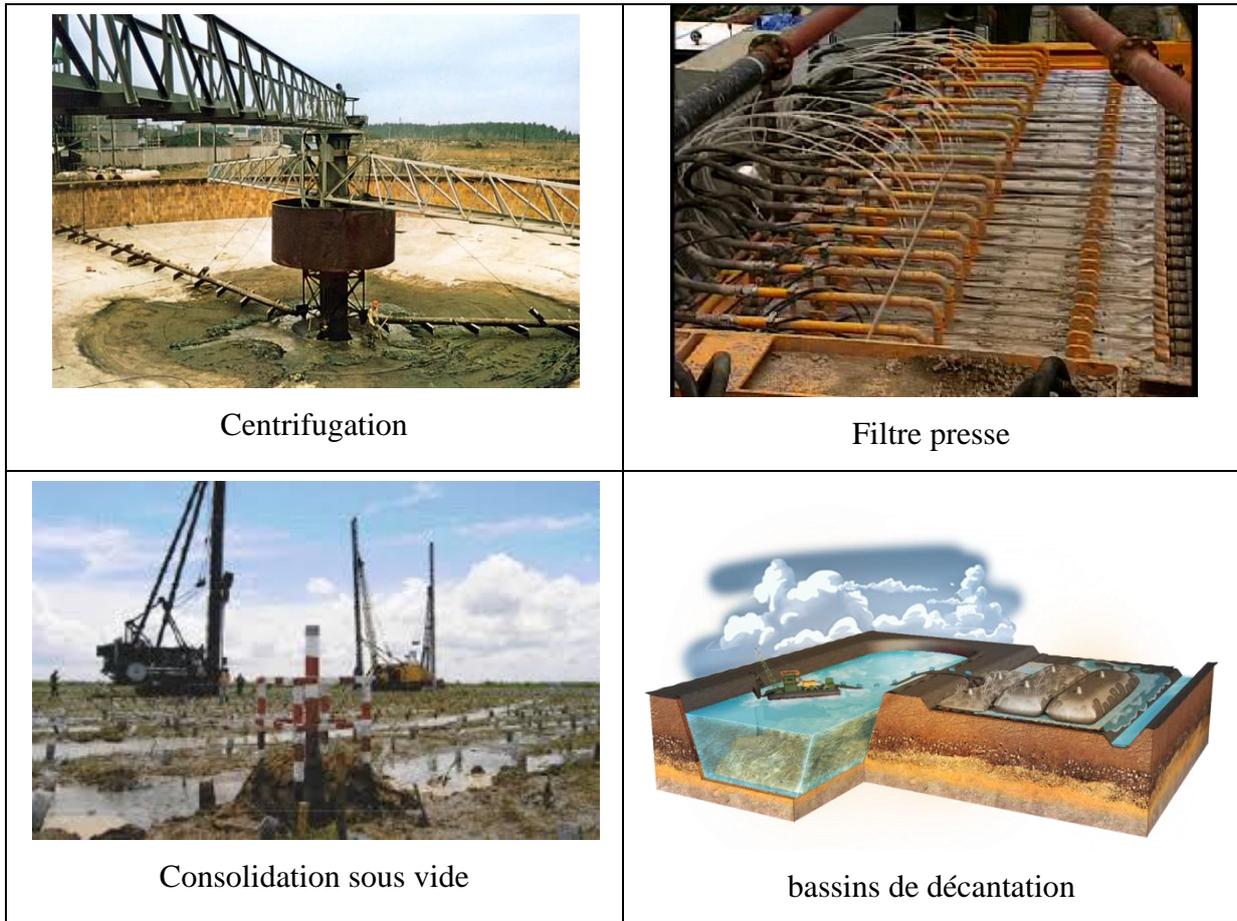


Figure 3.1. Techniques de déshydratation des sédiments.

- Le tri granulométrique qui permet de dissocier les fractions fines par hydro-cyclonage (Figure 3.2). Ces fractions fines qui représentent les fractions les plus polluées sont ainsi isolées avant traitement. Il ne constitue donc qu'une phase préliminaire du traitement et/ou de la réhabilitation.

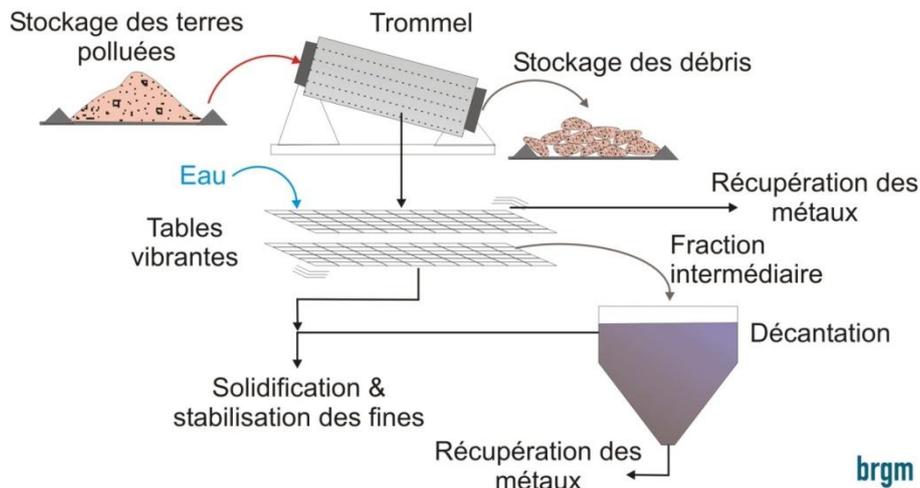


Figure 3.2. Schéma de principe du tri granulométrique [a].

2. Rinçage des sédiments

Le rinçage (ou lessivage) des sédiments comprend l'ajout d'une solution avec les sédiments contaminés pour transférer les polluants des sédiments vers la solution de rinçage (Song, 2016). Le liquide de rinçage peut être de l'eau ou l'eau en combinaison avec des solvants organiques, agents chélatants, tensioactifs, solution acide ou alcaline (Figure 3.3). Ce rinçage peut traiter les milieux poreux contaminés par des polluants organiques ou inorganiques. Cependant, son efficacité est limitée à cause des particules fines, la faible perméabilité, la teneur élevée en matières organiques, etc. (Song, 2016).

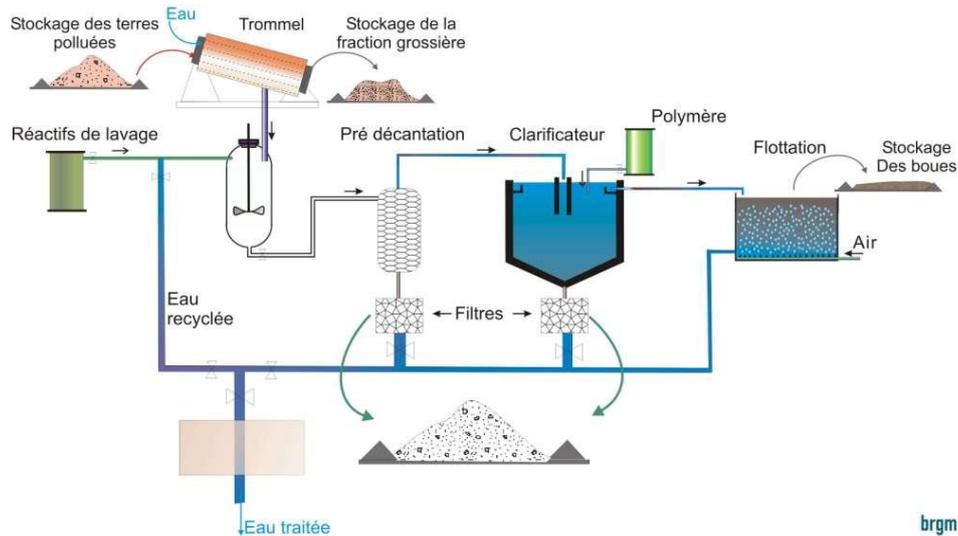


Figure 3.3. Schéma de principe du rinçage des sédiments [a].

III.3. Techniques de traitement des sédiments

Trois grands types sont disponibles pour le traitement des sédiments :

- ✓ les traitements physico-chimiques ;
- ✓ les traitements thermiques ;
- ✓ les traitements biologiques.

Ces types de traitement peuvent être mis en œuvre soit in situ, c'est-à-dire sans excavation des sols, soit sur site après excavation et préparation d'une aire étanche de traitement ou mise en route d'unité de traitement mobile, soit hors site dans des unités de traitement ou de stockage de grande capacité. Mis à part le confinement, la plupart des traitements conduisent à une dégradation du polluant qui peut être obtenue soit par voie physico-chimique, soit par voie biologique.

III.3.1. Traitements physico-chimiques

Ces traitements utilisent des techniques qui sont basées sur des principes physiques ou chimiques. Sachant que la majorité des polluants sont fixés sur les particules fines (Kribi, 2005), les techniques de séparation consistent à enlever la fraction fine du sédiment afin d'éliminer les contaminants. Plusieurs méthodes de traitements physico-chimiques sont actuellement disponibles (Ben Abdeljelil 2020 ; Hayet et al., 2017 ; Ruban et al.2010, Kribi 2005) :

- **La centrifugation** : Fait tourner les éléments solides en suspension à grande vitesse pour les isoler.
- **L'hydro cyclonage** : Le cyclonage est une technique de séparation granulométrique qui utilise la force centrifuge pour séparer les particules grossières des particules fines et légères. Les sédiments sont introduits sous pression dans une chambre cylindrique, ce qui les entraîne dans un mouvement rotatif avec une grande vitesse angulaire. Les particules les plus grossières sont entraînées par la force centrifuge vers les parois et elles descendent jusqu'au fond du cône pour sortir (Figure 3.4). Les particules les plus fines ou légères, remontent grâce au vortex créé au centre de la chambre et sont évacuées par le haut de l'hydro cyclone.

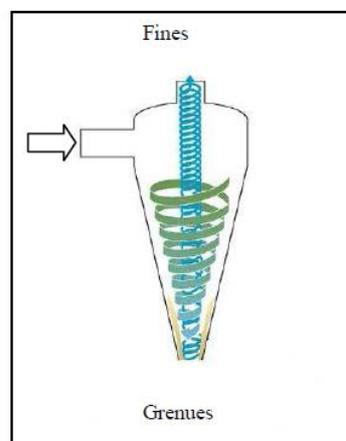


Figure 3.4. Schéma de principe d'un hydro cyclone.

- **Le lessivage** : Enlève les contaminants liés physiquement aux particules par l'action mécanique de l'eau et des agents d'extraction (acides, bases, chélateurs).
- **La flottation** : Permet de concentrer les polluants en se basant sur la différence de densité, le caractère hydrophobe ou hydrophile des solides et l'ajout d'additifs chimiques (Figure 3.5).

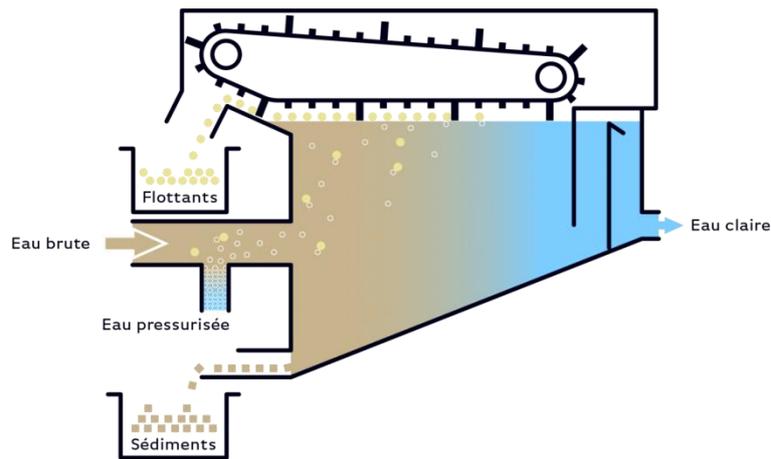


Figure 3.5. Schéma de principe de la flottation

III.3.2. Traitements thermiques

Hors mis le coût élevé dû à l'apport en énergie, le recours aux traitements thermiques est depuis quelques décennies adapté aux décontaminations des sédiments de dragage, en complément à d'autres types de traitements.

Ce traitement thermique est une méthode qui permet le transfert des composants (Polluants) organiques volatils (VOCs) aux composants organiques semi-volatils (SVOCs) des sédiments contaminés avec une température d'évaporation généralement de 100°C à 500°C (USEPA, 1993). Par conséquent, la toxicité de ces polluants organiques est diminuée avec évaporation. De plus, si la température de vaporisation est élevée (jusqu'à 800°C), Hg, As, Cd et leurs composés peuvent s'évaporer (Song, 2016), mais aussi causer un coût énergétique important. Plusieurs méthodes de traitements thermiques sont actuellement disponibles et fréquemment utilisés (Ramaroson, 2008) :

- **La désorption** : La méthode de désorption permet d'extraire les contaminants organiques et/ou métalliques par vaporisation ou désintégration (Figure 3.6). Le point d'ébullition du contaminant à extraire est déterminant pour fixer les conditions de vaporisation. La température utilisée est inférieure à celle nécessaire pour l'incinération.

Les terres excavées sont introduites dans un four pour être chauffées jusqu'à des températures moyennes comprises entre 90 et 560°C (ces températures sont inférieures à celles de l'incinération). Ce chauffage permet, d'une part, de désorber les polluants adsorbés sur la matrice sols et, d'autre part, d'augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils et de

les extraire en phase gazeuse. Une partie des composés organiques peut être détruite même à de basses températures.

Les composés gazeux et particulaires sont entraînés par un flux d'air et sont récupérés en vue d'un traitement. Les particules sont au préalable récupérées dans des filtres, des dépoussiéreurs humides ou des dépoussiéreurs électrostatiques ; par la suite, les composés organiques sont éliminés par destruction (brûlage, oxydation catalytique) ou fixation (charbon actif, condenseur).

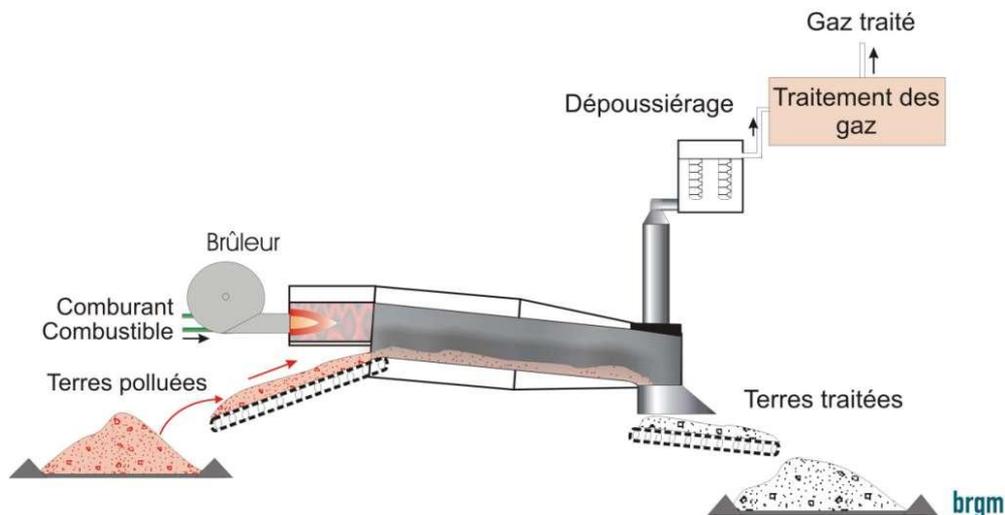


Figure 3.6. Schéma de principe de la désorption thermique [a].

Contrairement aux sols traités par incinération, les sols dépollués par désorption thermique ne sont pas réduits à l'état de cendre. Ils conservent une bonne partie de leurs propriétés physiques (notamment leurs propriétés structurantes permettant de supporter éventuellement une activité biologique). Ils peuvent être incorporés le cas échéant à d'autres matériaux ou être enfouis. Il existe deux types de désorption :

La désorption thermique à basse température (90 à 320°C) : cette technique est la plus utilisée notamment pour les polluants organiques.

La désorption thermique à haute température (320 à 560°C) : cette technique est souvent utilisée en combinaison avec l'Incinération ou la Stabilisation-solidification.

- **La pyrolyse :** La pyrolyse est un procédé thermique fréquemment utilisé pour traiter les ordures ménagères (MSW). Elle consiste à chauffer les sols en l'absence d'oxygène pour en extraire les polluants volatils et semi-volatils (Figure 3.7).

Ce procédé, en absence d'oxygène, est donc utilisé pour désintégrer les contaminants organiques lors du traitement de sédiment contaminé.

La pyrolyse consiste à introduire les terres excavées dans un four afin de les chauffer en l'absence d'oxygène à des températures comprises entre 150 et 540°C. Dans les faits, il est

impossible d'obtenir une concentration en oxygène proche de 0%, les techniques actuelles permettent néanmoins de travailler avec des concentrations en oxygène inférieures aux conditions stœchiométriques. La méthode de traitement est donc très proche de celle utilisée pour l'Incinération, la différence réside dans le fait que les conditions d'opération sont réalisées à des températures plus basses et en présence de peu d'oxygène.

Le but est de désorber les contaminants adsorbés sur la matrice sol et d'augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils afin de les volatiliser et de les transférer dans la phase gazeuse. Préalablement à la pyrolyse, les sols sont traités par tamisage, séchage, etc.; seules les particules de quelques centimètres sont acceptées dans le four.

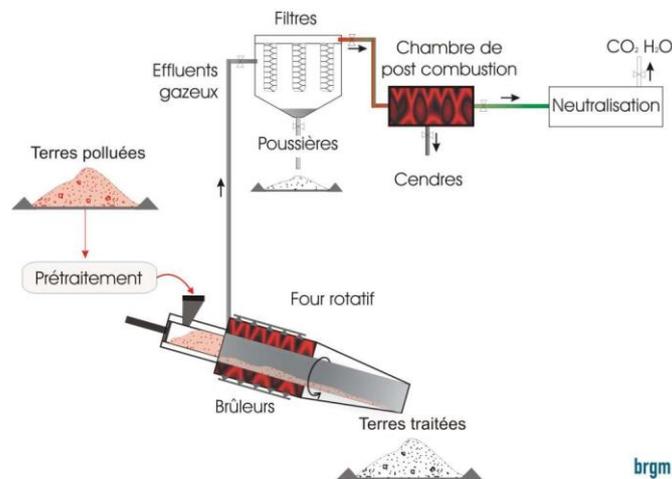


Figure 3.7. Schéma de principe de la pyrolyse [a].

Les sols pollués sont ainsi transformés en gaz et en un résidu solide. La **Pyrolyse** provoque le « cracking » des polluants organiques en composés plus simples. Les gaz sont constitués de monoxyde de carbone, d'hydrogène, de méthane et d'hydrocarbures divers. La faible présence d'oxygène lors de la pyrolyse permet d'éviter la formation de sous-produits toxiques (par exemple, les dioxines). Les gaz sont récupérés en vue d'un traitement : élimination des particules (filtres, scrubbers) puis élimination des composés organiques et du monoxyde de carbone (brûleur, oxydation catalytique, seconde chambre de combustion, condenseur ou charbon actif).

Un résidu solide formé de cendres et de carbone (coke) ainsi que de verres et de métaux est récupéré. Il est soit valorisé par production d'électricité et de chaleur (thermolyse intégrée), soit lavé, soit éliminé en centre de stockage des déchets.

- **L'incinération** : Cette technique est utilisée depuis plusieurs années pour traiter les boues de station d'épuration. Elle permet, d'une part, d'éliminer les constituants organiques, et d'autre part, de transformer les métaux en oxydes métalliques qui se concentrent dans les cendres volantes.

Son principe repose sur une combustion aérobie (en présence d'air) dans un four où les températures sont importantes (870 à 1 200°C). Ces hautes températures détruisent les polluants ou les volatilisent (Figure 3.8).

La combustion aérobie permet de détruire les polluants organiques en vapeur d'eau, gaz carbonique et résidus de combustion (cendres). Les métaux ne sont pas détruits et se retrouvent soit dans les effluents gazeux soit dans la fraction solide (cendres). Les métaux présents dans la fraction gazeuse peuvent faire l'objet d'une oxydation et d'une récupération spécifique. Généralement, l'Incinération se décompose en deux phases :

Une première chambre dans laquelle les polluants organiques sont désorbés et volatilisés (température > 400°C),

Une seconde chambre de combustion dans laquelle les polluants organiques sont détruits (température > 1 000°C).

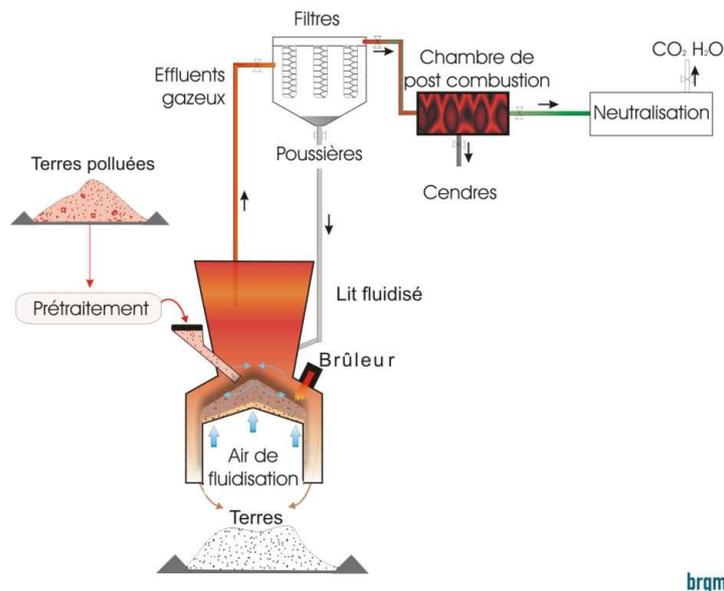


Figure 3.8. Schéma de principe de l'incinération [a].

Les composés gazeux et particulaires sont entraînés par un flux d'air et sont récupérés en vue d'un traitement. Le chlore, l'azote et le soufre (présents sous forme de HCl, NO_x, et SO_x) sont éliminés des rejets atmosphériques le plus souvent par neutralisation en solution alcaline.

- **L'oxydation et réduction chimiques :** Les procédés d'Oxydation/réduction permettent de transformer les polluants contenus dans les sols pollués excavés en polluants non toxiques (plus stables, moins mobiles ou inertes). Le procédé repose donc sur un mélange intime entre les oxydants/réducteurs et les sols homogénéisés (Figure 3.9).

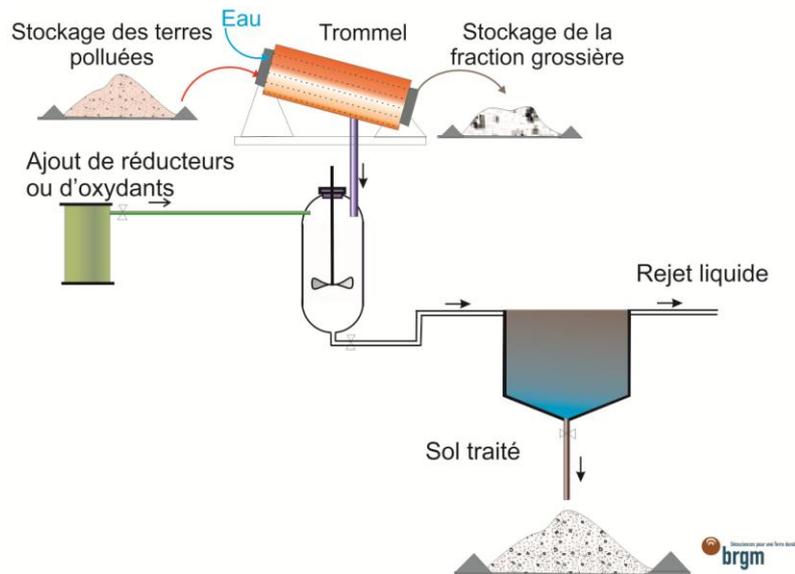


Figure 3.9. Schéma de principe du procédé d'Oxydation/réduction [a].

Les premières étapes du traitement par Oxydation/réduction sont très proches du lavage à l'eau. Le principe repose sur une première étape de réduction du volume de matériau à traiter par frottement (attrition) afin de ne conserver que la fraction fine.

Le procédé d'Oxydation/réduction est composé de deux étapes distinctes et complémentaires :

- isolement des fractions les plus polluées du sol en petits volumes grâce à des séparations et des attritions utilisées dans la séparation granulométrique,
- oxydation ou réduction des polluants.

L'Oxydation/réduction a lieu dans des cuves agitées ayant pour but de mettre en contact les sols pollués, l'eau et les réactifs (oxydants ou réducteurs). Les réactifs usagés peuvent être dirigés vers une filière de traitement appropriée ou récupérés et réutilisés sur site.

Les sols traités sont par la suite lavés et déshydratés dans des unités similaires à celles du traitement des boues classiques. Il faudra par la suite évacuer les sols vers les filières appropriées (décharge, réutilisation sur site).

Il existe plusieurs catégories de réactions selon les additifs : oxydation des polluants et réduction des polluants.

- **La vitrification** : La Vitrification est un traitement thermique qui a pour but de solidifier/stabiliser les sols excavés par élévation de la température afin de les transformer en un matériau fondu qui se vitrifie en se refroidissant.

Ce procédé de traitement thermique est réalisé dans des fours qui permettent d'obtenir des températures extrêmement élevées (1 600 à 2 000°C) lors de l'introduction des sols pollués. L'élévation de la température peut être réalisée via la fusion électrique, la fusion par

induction, la fusion par torche à plasma, la fusion par oxycombustion, les électrobrûleurs, le four à micro-ondes.

Les composés organiques ainsi que certains composés métalliques volatils (mercure...) sont pyrolysés et vaporisés à ces très hautes températures (Figure 3.10). La vapeur d'eau et les produits pyrolysés sont récupérés et dirigés vers les unités de traitement des rejets atmosphériques (similaires à ceux utilisés en incinération).

Les composés inorganiques mais aussi l'amiante et les radionucléides sont incorporés dans la matrice vitrifiée. Cette dernière est très stable, inerte et très peu lixiviable.

La masse vitreuse en fusion est soit coulée dans des lingotières soit refroidie à l'eau et conditionnée sous forme de granulats. Des ajouts tels que la silice, l'alumine peuvent être réalisés sur les sols afin d'obtenir une bonne vitrification.

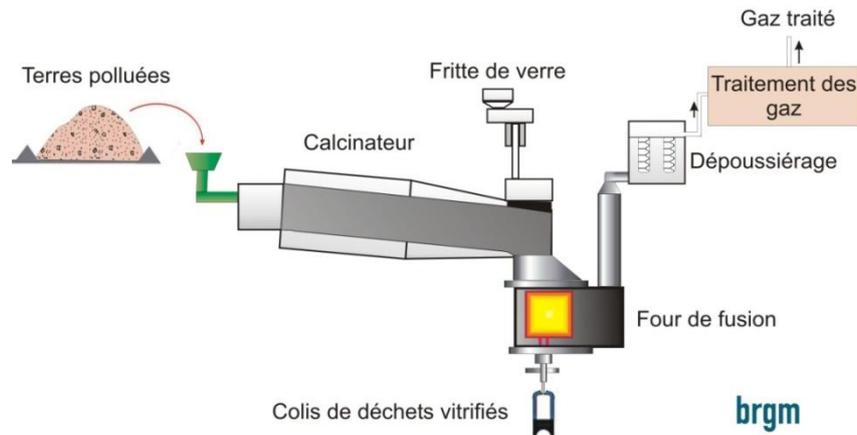


Figure 3.10. Schéma de principe de la vitrification thermique [a].

La vitrification thermique permet donc la dégradation de la matière organique par combustion et fixe les métaux lourds non volatils.

III.3.3. Traitements biologiques

Les traitements biologiques consistent à utiliser des organismes supérieurs (végétaux) ou des micro-organismes pour dégrader les polluants organiques. Les champignons, les bactéries, les actinomycètes et les algues sont les principaux micro-organismes des sols. En général, sous leur action, les polluants organiques sont transformés en molécules de moins en moins polluantes (en termes de persistance et de toxicité). Les procédés biologiques de dépollution visent donc à augmenter les capacités de dégradation des micro-organismes des sols pour accélérer les phénomènes naturels, afin de ramener les quantités de polluant extractibles en dessous des normes établies (Mougin et al.1996).

L'identification des techniques biologiques existantes ou émergentes met en évidence deux catégories principales : les techniques de bioremédiation qui utilisent essentiellement des

bactéries et les techniques de phytoremédiation qui exploitent les propriétés des végétaux (plantes, arbustes, arbres).

- **La bioremédiation** : désigne les processus de dégradation des polluants par des méthodes biologiques utilisant le potentiel métabolique des micro-organismes pour détériorer des composés organiques variés (Figure 3.11).

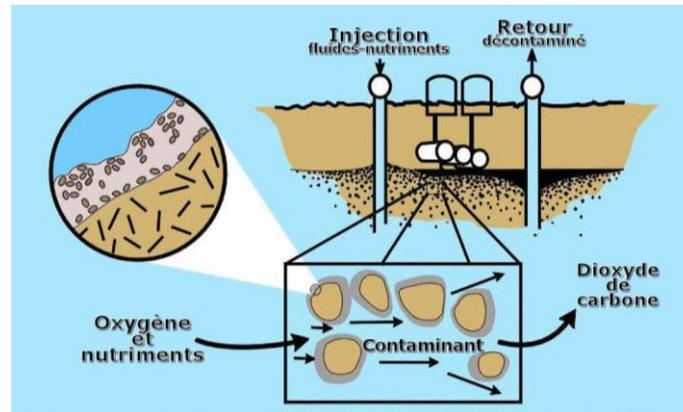


Figure 3.11. Cycle de la bioremédiation.

Cette technique consiste donc à augmenter la biodégradation ou la biotransformation, en inoculant des micro-organismes spécifiques (bioaugmentation, bioréhabilitation) ou en stimulant l'activité de populations microbiennes indigènes, par biostimulation, par apport de nutriments et par ajustement des conditions de milieu (potentiel d'oxydoréduction, humidité). Les technologies peuvent être généralement classées comme in situ ou ex situ. La biorestauration in situ consiste à traiter le matériel contaminé sur le site, tandis que ex situ implique l'enlèvement de la matière contaminée pour la traiter ailleurs.

Parmi les exemples de technologies liées à la bioremédiation, on peut citer la bioaération ou bioventilation (bioventing), lixiviation, épandage, emploi de bioréacteur, compostage, bioaugmentation, rhizofiltration (biosparging) et biostimulation.

- **La phytoremédiation** : Cette méthode consiste à cultiver sur les sites pollués certaines espèces végétales (strates herbacées, plantes, arbustes, arbres, algues) qui ont la capacité de retenir, transformer ou contribuer à dégrader les polluants organiques ou inorganiques. Ce traitement par phytoremédiation fait intervenir trois types de phénomènes naturels (Figure 3.12) :

La phytoextraction qui est l'utilisation de plantes (dites hyperaccumulatrices) pour traiter les sols pollués, notamment par les éléments traces métalliques;

La phytodégradation qui consiste à accélérer la dégradation des composés organiques polluants (hydrocarbures, pesticides, etc.) en présence de plantes. Cette dégradation peut se faire à l'aide de l'activité des micro-organismes de l'environnement des

racines (rhizosphère), ou dans la plante après que le composé soit absorbé puis dégradé dans les cellules ;

La phytostabilisation qui consiste à immobiliser la pollution en installant un couvert végétal avec des espèces tolérant les polluants. Ces plantes permettent de réduire l'érosion et le ruissellement des particules contenant les polluants et d'éviter leur propagation en profondeur. L'efficacité de ce processus dépend des caractéristiques des plantes et du sol à traiter.

Il s'agit donc par ce procédé d'installer un couvert végétal avec des espèces tolérant les polluants (Song, 2006).

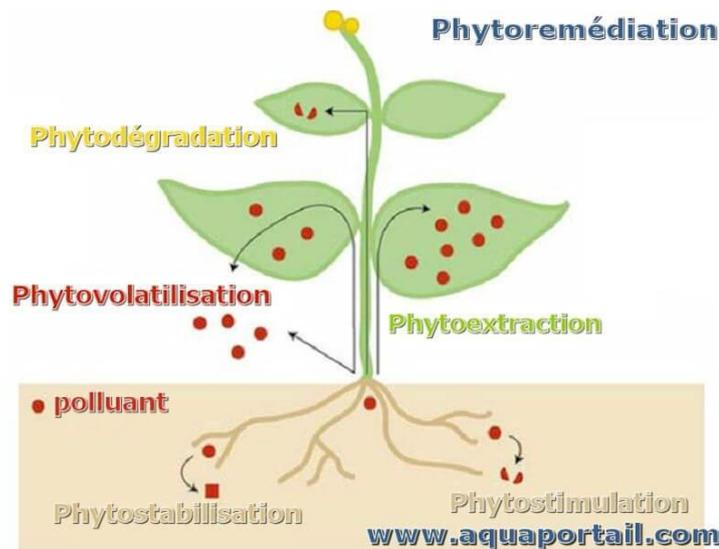


Figure 3.12. Schéma du processus de phytoremédiation

Conclusion :

Les différentes méthodes de traitements décrites dans ce chapitre ont pour objectif la destruction, la transformation ou la stabilisation des contaminants présents dans les sédiments de dragage. Les traitements physico-chimiques sont efficaces, mais présentent des coûts élevés qui peuvent entraver le dragage. Les traitements thermiques sont efficaces pour l'immobilisation des polluants, mais ils sont très énergivores et coûteux. Les traitements biologiques sont plus écologiques et peu coûteux, mais nécessitent des délais de réalisation relativement longs.

Chapitre 4 :

**Exploitation des sédiments de dragage pour
utilisation en matériaux de construction**

IV.1. Introduction

La production de béton est l'un des principaux consommateurs de matériaux et les granulats sont l'un des matériaux de base de cette industrie. En fait, le granulat dans le béton ou les éléments de base constituant la brique et/ou le ciment, est un matériau souvent utilisé pour la fabrication de ces matériaux de construction. La grande majorité d'entre eux proviennent de carrières terrestres et d'alluvions dont les ressources sont sur le point de s'épuiser. De plus, l'exploitation minière dans la carrière devient difficile. Dans ce cas, l'utilisation de sédiments dragués sous forme de granulats peut être développée pour répondre à la demande croissante du secteur de la fabrication de ces matériaux de construction à base de sédiments.

En effet, considérés comme des déchets dès leur dépôt à terre, les sédiments de dragage ne sont pas sans poser problème aux gestionnaires de voies fluviale et maritime. Mais des travaux dans ce domaine laissent entrevoir des filières de traitement et de valorisation prometteuse.

On présentera dans ce chapitre, un état des connaissances synthétique sur le comportement mécanique des sédiments traités et exploités dans le domaine des matériaux de construction.

IV.2. Devenir des sédiments dans le domaine de la construction

Les sédiments de dragage sont issus de l'érosion des sols et proviennent principalement de gisements marins et fluviaux. Compte tenu de leur nature de gisement et leurs caractéristiques minéralogiques, ces sédiments dragués peuvent potentiellement être valorisés dans plusieurs filières. Effectivement, leurs caractéristiques minérales, proche d'un sable ou de granulats, offre une diversité dans les applications du BTP, grands consommateurs de ressources minérales.

En effet, le champ d'étude de la construction consomme beaucoup de granulats où la plus part proviennent de carrières naturelles. Or, l'ouverture de nouvelles professions est désormais plus réglementée avec des normes environnementales plus strictes et plus exigeantes. D'autre part, le volume annuel de sédiments dragués atteint des millions de mètres cubes où la quantité importante de ce dernier pourrait avoir une source d'approvisionnement en granulat pour la filiale de la construction.

La législation européenne comporte quinze protocoles (H1 à H15) pour l'évaluation du caractère dangereux/non-dangereux des déchets destinés à une gestion à terre. Le critère H14 y est ainsi défini : "Ecotoxique" : déchets qui présentent ou peuvent présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement. C'est ainsi

qu'au fil de ces dernières années, l'étude des applications du sédiment a pris plus d'ampleur dans le domaine du génie civil (Figure 4.1).

Les principaux acteurs constituant le sédiment sont le sable, l'argile et le calcaire avec un pourcentage qui peut varier en fonction de la source du sédiment. La diversité de cette composition enrichit le potentiel de la valorisation du sédiment dans le domaine de construction, à savoir le routier, granulats dans le béton ou les éléments de base constituant la brique et/ou ciment (Bourabah (2012) ; Abriak et Grégoire (2003) ; Boutouil et Saussaye (2011) ; Achour (2013) ; Agostini (2006) ; Ben Allal et al. (2011) ; Belas et al. (2011) ; Alviset (1994) ; Remini (2006)).

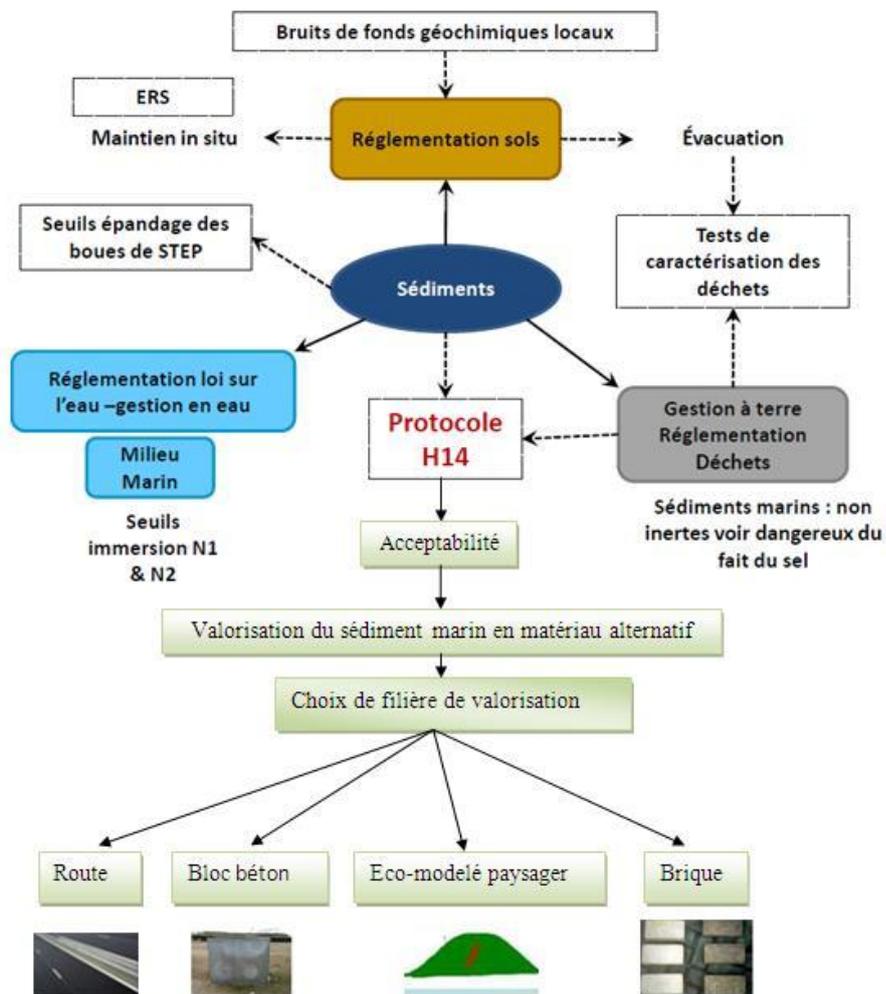


Figure 4.1. Schéma général de valorisation des sédiments en matériaux de construction (Achour, 2013).

IV.3. Etat des connaissances sur la valorisation des sédiments en matériaux de construction

Dans ce qui suit, une discussion sur les différents principaux résultats bibliographiques trouvés sur l'exploitation des sédiments de dragage en domaine de construction.

4.3.1. Travaux de Kazi Aoual-Benslafa et al.2011

Kazi Aoual-Benslafa et al.2011 ont étudié l'ajout des sédiments marins du port d'Oran dans la confection des mortiers. Quatre (04) pourcentages de sédiments phosphatés et calcinés (SPC) (5%, 10%, 15% et 20%) ont été utilisés dans les mortiers confectionnés.

Les résistances mécaniques et aux attaques chimiques (durabilité) ont été déterminées et comparées à celles d'un mortier témoin.

Les cinq (05) séries de mortier confectionnées sont désignées par : MT (mortier témoin : ciment CPA+15% de pouzzolane naturelle) et MSPC5, MSPC10, MSPC15, MSPC20, les mortiers avec respectivement les pourcentages de 5, 10, 15 et 20% de sédiments SPC.

L'évolution de la résistance à la compression avec l'âge de cure et les pertes de masse en fonction du temps d'immersion des cinq (05) séries de mortier est illustrée sur les figures 4.2 et 4.3.

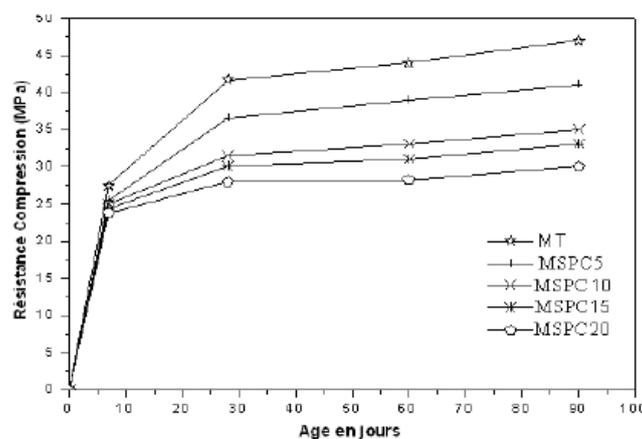
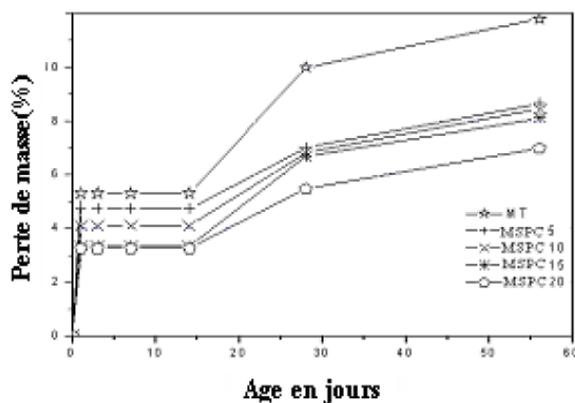
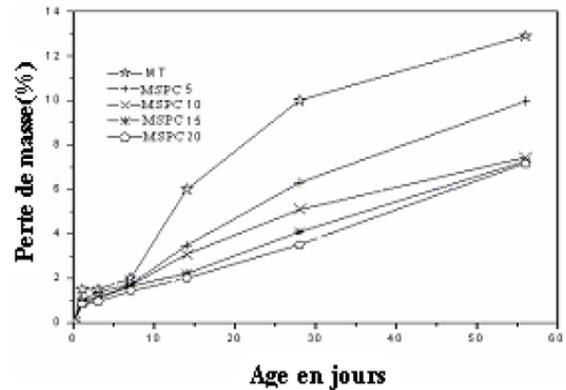


Figure 4.2. Evolution des résistances en compression des différents mortiers en fonction de l'âge (Kazi Aoual-Benslafa et al.2011).



(a)



(b)

Figure 4.3. Evolution de la perte de masse en fonction du temps d'immersion (Kazi Aoual-Benslafa et al.2011) : (a) pour HCl et (b) pour H₂SO₄

Selon Kazi Aoual-Benslafa et al.2011, l'ajout de 5% et 10% de sédiments traités (SPC) dans les mortiers a permis d'approcher la résistance mécanique du mortier témoin et d'améliorer leurs résistances aux attaques chimiques.

4.3.2. Travaux de Benyerou et al.2016

Benyerou et al.2016 ont étudié la valorisation des sédiments marins du port de Bethioua (Algérie) pour la fabrication des briques. Ces sédiments dragués présentent un taux faible en hydrocarbures et une absence de pollution métallique.

Cinq concentrations massiques ont été utilisées pour effectuer les essais rhéologiques qui sont les suivants (Tableau 4.1) :

Référence	Sédiments marins (%)	Argile de brique (%)	Sable (%)
Barbotine	0	75	25
Formulation 1 (F1)	5	70	25
Formulation 2 (F2)	10	65	25
Formulation 3 (F3)	15	60	25
Formulation 4 (F4)	20	55	25

Tableau 4.1. Formulations avec ajout de sédiments marins de 0 à 20% (Benyerou et al.2016).

L'évolution de la consistance (K) et de l'indice de fluidité (n) de la barbotine sous l'effet des ajouts en sédiments marins est représentée sur la figure 4.4.

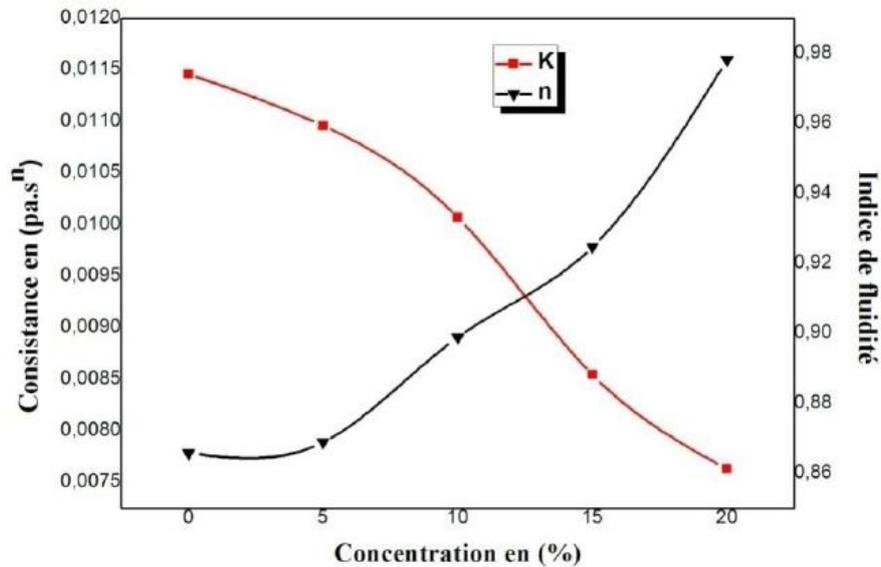


Figure 4.4. Evolution de la consistance et de l'indice de fluidité de la barbotine en fonction de la concentration des ajouts en sédiments marins (Benyerou et al.2016).

Selon Benyerou et al.2016, les résultats obtenus ont montré une augmentation significative de la consistance lorsque la concentration en ajouts augmente, en revanche, une diminution de l'indice de fluidité est observée. Les sédiments marins de Bethioua peuvent être valorisés jusqu'à une concentration de 15%, sachant que dans ce cas les paramètres rhéologiques sont presque identiques à ceux de la barbotine de référence.

D'autre part, l'introduction de 5, 10 et 15% des sédiments marins dans la barbotine de brique donne une contrainte seuil comparable avec la barbotine de brique (Figures 4.5 et 4.6). Les paramètres rhéologiques obtenus montrent donc que les sédiments marins de Bethioua peuvent être valorisables jusqu'à 15%.

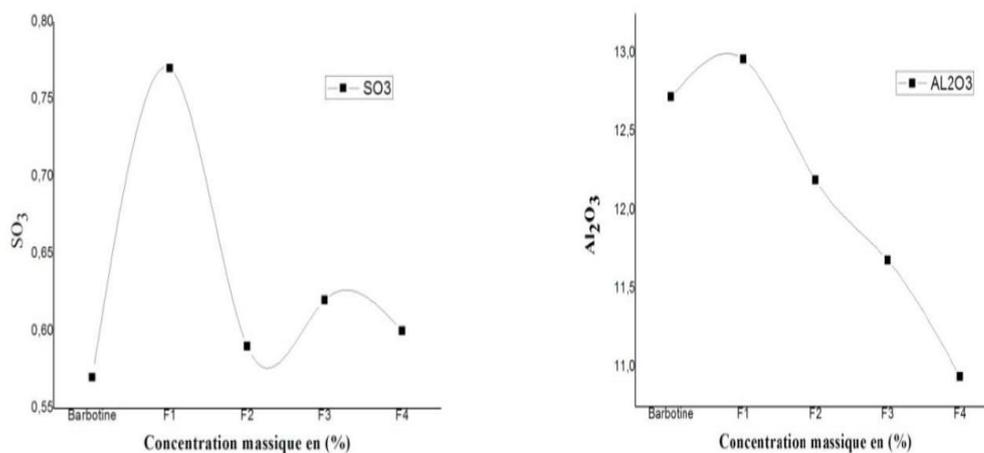


Figure 4.5. Evolution des pourcentages en aluminés et en sulfates en fonction de la concentration massique en sédiments marins (Benyerou et al.2016).

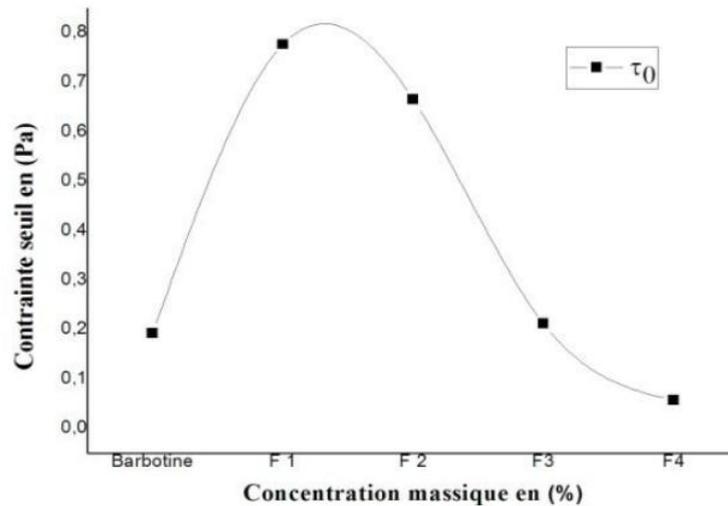


Figure 4.6. Evolution de la contrainte seuil avec la concentration massique en sédiments marins (Benyerou et al.2016).

4.3.3. Travaux de Zhao et al.2015

Des sédiments marins dragués, séchés puis broyés, ont été utilisés par Zhao et al.2015, en substitution partielle au ciment dans la fabrication de mortiers et de bétons. Un volume donné de ciment a été remplacé par le même volume de sédiments pour trois taux de substitution (10%, 20% et 30%) d'un ciment Portland CEM I 52,5 lors de la confection des mortiers.

C'est ainsi que quatre (04) mortiers ont été fabriqués à partir du ciment CEM I 52,5. Ces derniers ont été notés MC0-52,5, MC10-52,5, MC20-52,5, MC30-52,5.

Deux mortiers de référence sans sédiments ont été réalisés avec deux types de ciment Portland (CEM I 52,5 et CEM II (A-LL 32,5 (noté MC0-32,5))).

Selon les résultats trouvés par Zhao et al.2015, il a été montré que les résistances à la flexion et à la compression des mortiers diminuent lorsque le taux de remplacement du ciment augmente (Figure 4.7). Ceci selon Zhao et al.2015 est la conséquence normale du remplacement du ciment par des constituants peu ou pas réactifs chimiquement.

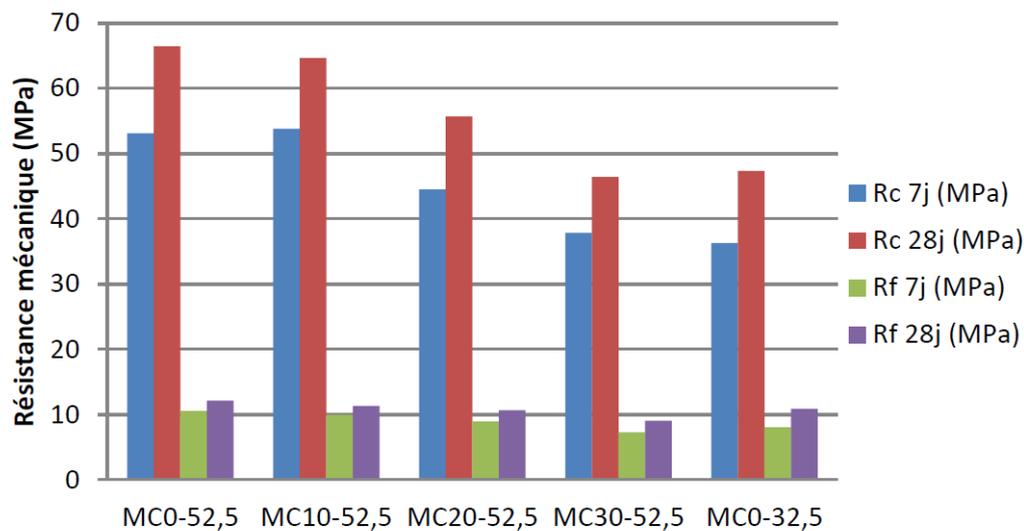


Figure 4.7. Résistance à la flexion et à la compression des mortiers (Zhao et al.2015)

Néanmoins, la résistance mécanique du mortier avec 30% de remplacement du ciment par le sédiment est similaire à celle du mortier avec le ciment de CEM II/A-LL32,5 qui contenant environ 20% de calcaire qui est connu pour avoir un effet physico-chimique bénéfique sur l'hydratation du ciment. Les sédiments ont donc un effet bénéfique sur l'hydratation du ciment.

En calculant le pourcentage de résistance mécanique du mortier avec sédiment par rapport au mortier de référence, en faisant l'hypothèse d'un sédiment inerte (Figure 4.8), Zhao et al.2015 ont prouvé que cette résistance mécanique diminue linéairement avec le taux de substitutions en sédiment.

Les pourcentages de résistances à la flexion et à la compression des mortiers sont toujours supérieurs aux valeurs théoriques mais un taux de substitution élevé conduit à minimiser l'impact bénéfique du sédiment comme c'est aussi le cas pour le calcaire.

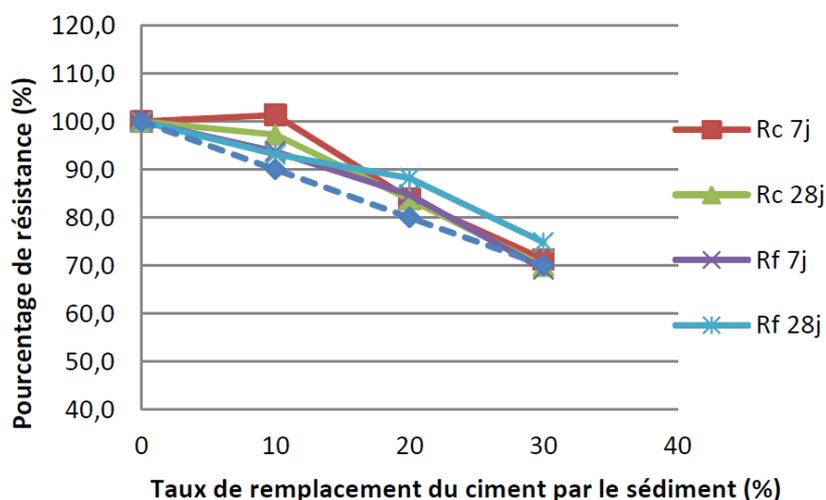


Figure 4.8. Variation du pourcentage de résistance avec le taux de substitutions en sédiment (Zhao et al.2015).

Les propriétés aux états frais et durci de bétons contenant des sédiments en remplacement du ciment ont démontré qu'il est possible de réaliser un béton de type C30 contenant moins de 20% de ciment substitué par des sédiments non pollués et séchés sans avoir recours à des adjuvants.

Selon Zhao et al.2015, la présence de chlorure due à NaCl contenu dans l'eau de mer est bénéfique vis-à-vis de l'hydratation du ciment et les quantités apportées par de faibles taux de substitutions ne sont pas rédhibitoires pour utiliser les sédiments marins en substitution du ciment même pour un béton armé de type C30.

4.3.4. Travaux de Karam et al.2018

Karam et al.2018 ont étudié le développement d'un nouveau type de liant alcali-activé, à base de laitiers de hauts fourneaux, incorporant la fraction fine des sédiments de dragage pour des applications dans le domaine du génie-civil.

Selon ces auteurs, les principaux facteurs qui peuvent affecter les réactions d'activation alcaline et jouer un rôle sur la structure, la minéralogie et les propriétés des matériaux obtenus sont la nature de l'activateur alcalin basique, sa concentration (% Na₂O et rapport Ms = SiO₂/Na₂O) et le rapport Eau/Solide.

Un pourcentage de 30% de sédiments a été incorporé dans les formulations des matériaux alcali-activés (MAA). Les effets de cet ajout sédimentaire sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du liant obtenu ont été étudiés par Karam et al.2018 à E/S constant de 0,45 et à E/S corrigé de 0,62 pour travailler à maniabilité constante.

Les formulations testées par ces auteurs sont représentées dans le tableau 4.2. La 1^{ère} partie des mélanges ne contient pas de sédiments, le rapport E/S est fixé à 0,45, le pourcentage de Na₂O est de 5% et pour les systèmes activés par des silicates, le rapport molaire est de 1,45.

		Formulations	Ms (SiO ₂ /Na ₂ O)	% Sédiments
E/S = 0,45 5% Na ₂ O	Sans SIL	Sans SED	0,00	0
	Ms = 0,00	Avec SED	0,00	30
		Avec SIL	Sans SED	1,45
	Ms = 1,45	Avec SED	1,45	30
E/S = 0,62 5% Na ₂ O	Avec SIL	Sans SED	1,45	0
	Ms = 1,45	Avec SED	1,45	30

Tableau 4.2. Formulations de matériaux alcali-activés avec ou sans silicates, avec et sans sédiments à des rapports E/S de 0,45 et de 0,62 (Karam et al.2018).

Dans une 2^{ème} partie, 30% de sédiments fins sont incorporés dans les formulations sans et avec silicates de la 1^{ère} partie.

Selon Karam et al.2018, l'ajout de 30% de sédiments à E/S de 0,45 et en absence de silicates, permet de maintenir des résistances mécaniques et des cinétiques comparables à celles obtenues sans sédiments sauf que les temps de prises sont ralentis. En présence de silicates à E/S de 0,45, l'ajout de sédiments permet de maintenir une bonne ouvrabilité mais réduit les performances mécaniques. En raison de la forte demande en eau des sédiments, la maniabilité des pâtes n'est pas constante. Le rapport E/S est augmenté à 0,62 afin de pouvoir travailler à maniabilité constante en présence des sédiments.

En terme de résistance mécanique, l'ajout de sédiments à E/S élevé (0,62) diminue celle-ci de façon plus prononcée (Figure 4.9). Toutefois, pour une formulation sans sédiments à E/S = 0,62, la résistance diminue du même ordre de grandeur qu'en présence de sédiments. À faible rapport E/S (0,45), l'ajout de sédiments est la cause de la réduction des résistances mécaniques. En revanche, à E/S élevé (0,62), c'est l'apport d'eau qui est responsable majoritairement de la diminution des résistances.

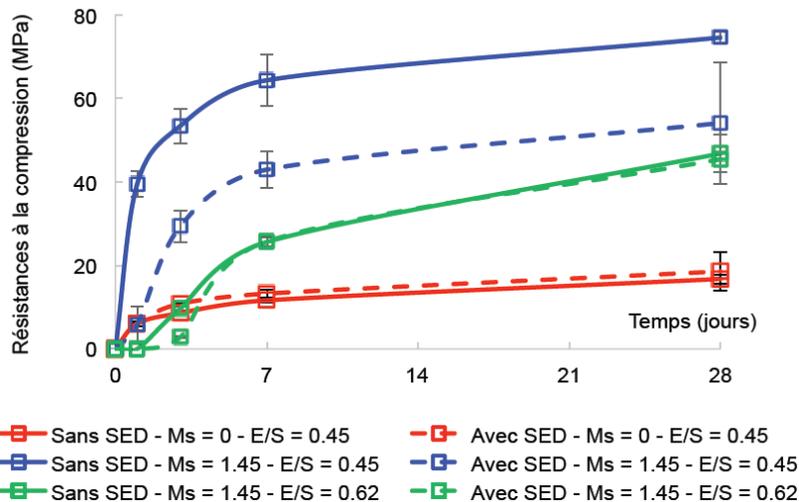


Figure 4.9. Evolution des résistances à la compression pour les formulations avec et sans silicates en présence et en absence de sédiments (Karam et al.2018).

La cinétique de montée en résistance en présence de sédiments et de silicates est moins rapide que celle sans sédiments et ce quel que soit les rapports E/S.

4.3.5. Travaux de Benasla et al.2015

Benasla et al.2015 ont étudié la valorisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda (Chlef) pour la fabrication des carreaux de sol en céramique. Une comparaison a été faite entre l'introduction de cette vase avec celle de l'argile d'Ain Franine utilisée dans l'usine CERAL (céramique algérienne) de la région d'Oran.

Le choix de la composition du mélange est confirmé par des essais physico-céramiques, permettant de vérifier les paramètres de contrôle de qualité du produit final à savoir le retrait, l'absorption, la perte au feu et la résistance à la flexion.

Les analyses chimiques de cette vase confirment qu'elle peut être utilisable dans la fabrication des carreaux de sol en céramique à un taux de 13%. Des éprouvettes sous forme de petits carreaux de dimensions 55 x 110 mm² ont été préparées par deux types de mélanges : un mélange basé sur l'argile d'Ain Franine et l'autre mélange sur cette vase du barrage de l'Oued Fodda.

En terme de performances mécaniques, il a été montré par Benasla et al.2015 que la variation de la contrainte de cisaillement avec la vitesse de cisaillement est linéaire (Figure 4.10) pour les deux mélanges, obéissant ainsi au modèle linéaire de Bingham.

La contrainte du seuil de la barbotine de l'Oued Fodda est inférieure à celle de la barbotine de CERAL. Ceci indique selon Benasla et al.2015 que le mélange à base de la vase de l'Oued Fodda s'écoule mieux dans le circuit, avec moins de risque de colmatage des conduites et un bon rendement des pompes.

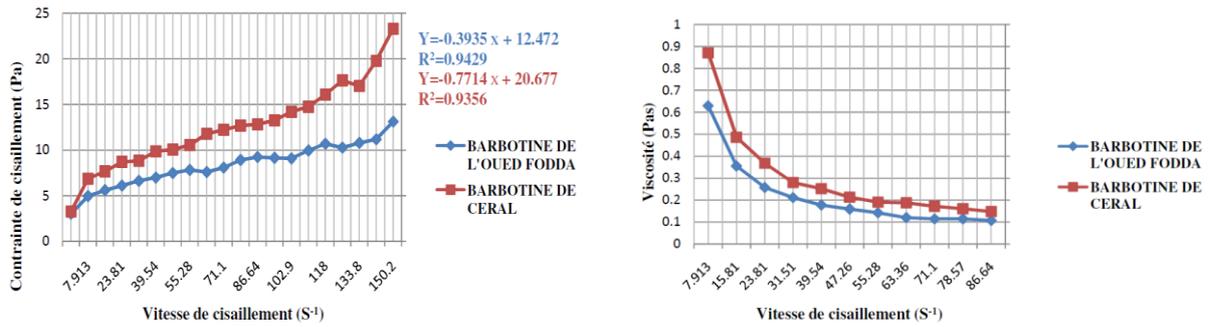


Figure 4.10. Evolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité avec la vitesse de cisaillement pour les mélanges à base de la vase de l’Oued Fodda et de l’argile de CERAL (Benasla et al.2015)

En terme de résistance à la flexion, Benaissa et al.2015 ont trouvé que cette résistance pour les carreaux préparés par la vase de l’Oued Fodda est proche à celle de l’argile de CERAL (Figure 4.11), pour différentes températures de cuisson. Selon ces auteurs, plus la température de cuisson augmente plus le carreau produit résiste bien à la flexion, où une température de 1000°C est suffisante pour avoir un carreau répondant aux normes et exigences internationales ISO 13006.

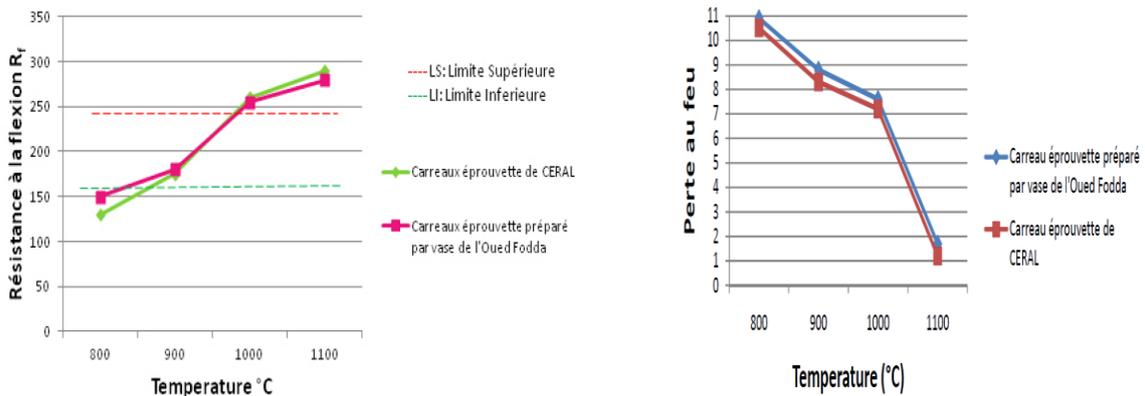


Figure 4.11. Variation de la résistance à la flexion et de la perte au feu avec la température pour les deux carreaux éprouvette (vase de l’Oued Fodda et de l’argile de CERAL) (Benasla et al.2015)

Selon Benasla et al.2015, la perte au feu ou la différence en poids du carreau (Figure 4.11) diminue avec la température de cuisson pour les deux types de carreaux où le taux de perte au feu dans le carreau préparé par la vase de l’Oued Fodda est de 7,6% et l’autre carreau de CERAL est de 7,2%. La température de cuisson de 1000°C a donné des carreaux de bonne qualité de point de vue déformation où les écarts de longueur et de largeur augmentent avec la température, restant au dessous de la limite minimale de la norme ISO 13006 (Figure 4.12).

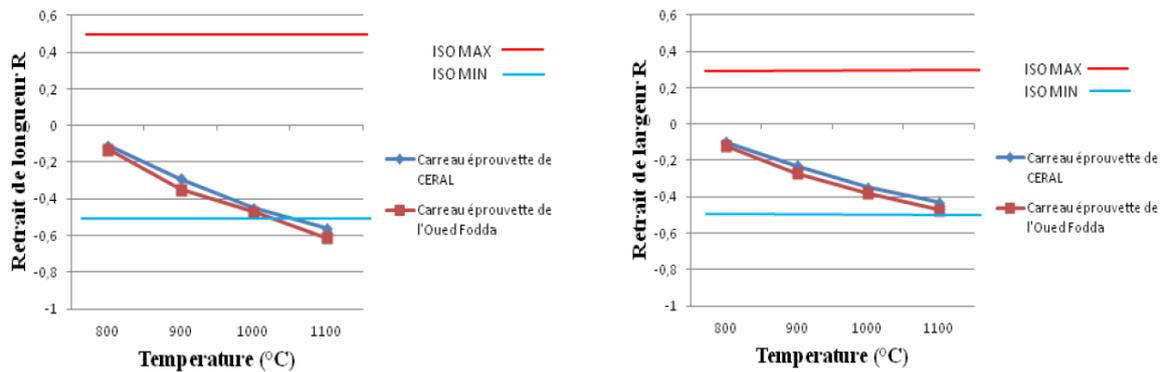


Figure 4.12. Variation du retrait en longueur et largeur avec la température pour les deux carreaux d'éprouvettes testées (Oued Fodda et CERAL) (Benasla et al.2015)

4.3.6. Travaux de Achour (2013)

Achour (2013) a étudié la durabilité de deux blocs en béton à base de sédiment marin où son étude est divisée en trois étapes : La première étape est consacrée à une caractérisation non destructive et destructive des deux bétons contenant 12,5% et 20% de sédiment associé à une caractérisation microstructurale. La seconde concerne la durabilité de ces bétons face aux attaques sulfatiques externes, à la soumission aux cycles gel/dégel et à la réaction alcali-granulats afin d'évaluer l'effet de l'incorporation des sédiments dans les bétons et le comportement de ces derniers. Enfin, la troisième étape traite du volet impact environnemental par des essais de lixiviation sur les deux types de bétons.

L'intégration des sédiments marins fins a été réalisée sur le béton à deux taux d'incorporation:

- Le premier béton intègre 12,5% de sédiment marin nommé B1 ;
- le deuxième béton à base de 20% de sédiment marin nommé B2.

Les résultats de ces travaux ont montré que le béton à 12,5% de sédiments présente des performances mécaniques plus élevées que celui de 20% (Figure 4.13). L'augmentation du taux d'incorporation du sédiment dans le béton à 20 % a rendu la carotte plus déformable, une diminution du module d'élasticité statique de l'ordre de 4 GPa a été constatée ; cette diminution peut s'expliquer par le changement de la microstructure ainsi que l'augmentation de la porosité et l'hétérogénéité du béton à 20 % par rapport à celles de 12,5 %. Il a été également constaté que l'augmentation du taux d'incorporation du sédiment est accompagnée d'une augmentation de la porosité du béton. Ainsi, le béton à base de 12,5 % de sédiments présente de bonnes performances mécaniques et microstructurales et révèle des qualités comparables à un béton ordinaire.

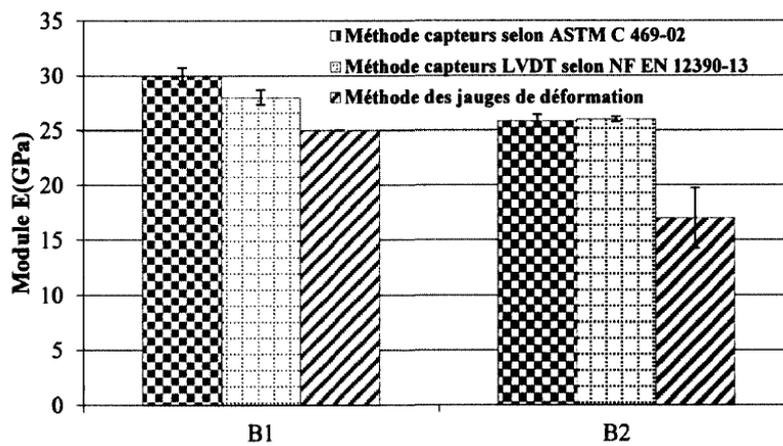
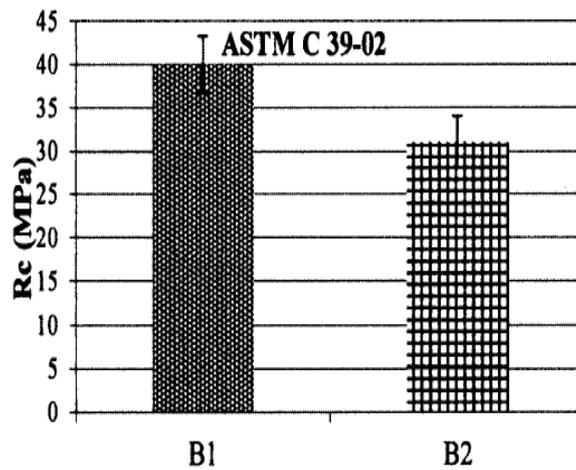
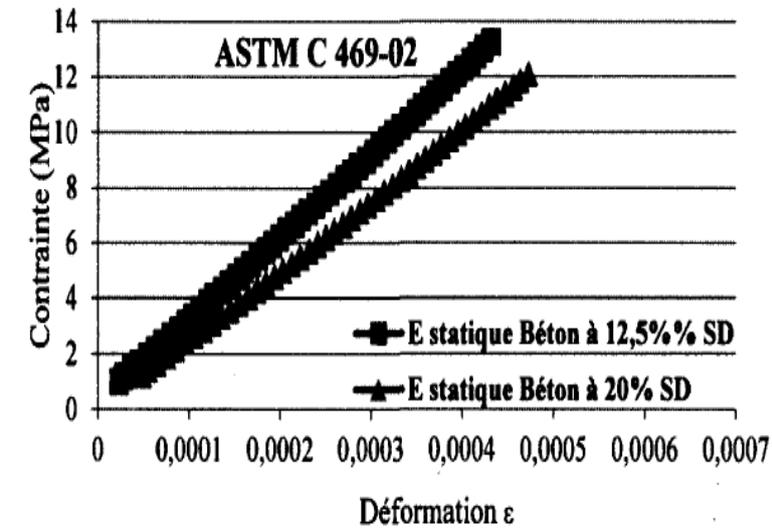


Figure 4.13. Courbes contrainte/déformation et variations de la résistance à la compression et du module d'élasticité des deux bétons B1 et B2 (à 12,5 et 20% de sédiments) (Achour, 2013).

4.3.7. Travaux de Agostini (2006)

Agostini (2006) avait étudié des sédiments contaminés en utilisant un processus de traitement appelé le procédé Novosol. L'objectif de ce procédé consiste à traiter les sédiments de dragage fluviaux et marins par un traitement chimique par phosphatation pour stabiliser la pollution inorganique (métaux lourds) et un traitement thermique pour dégrader la pollution organique et renforcer la stabilité des métaux lourds (Figure 4.14).

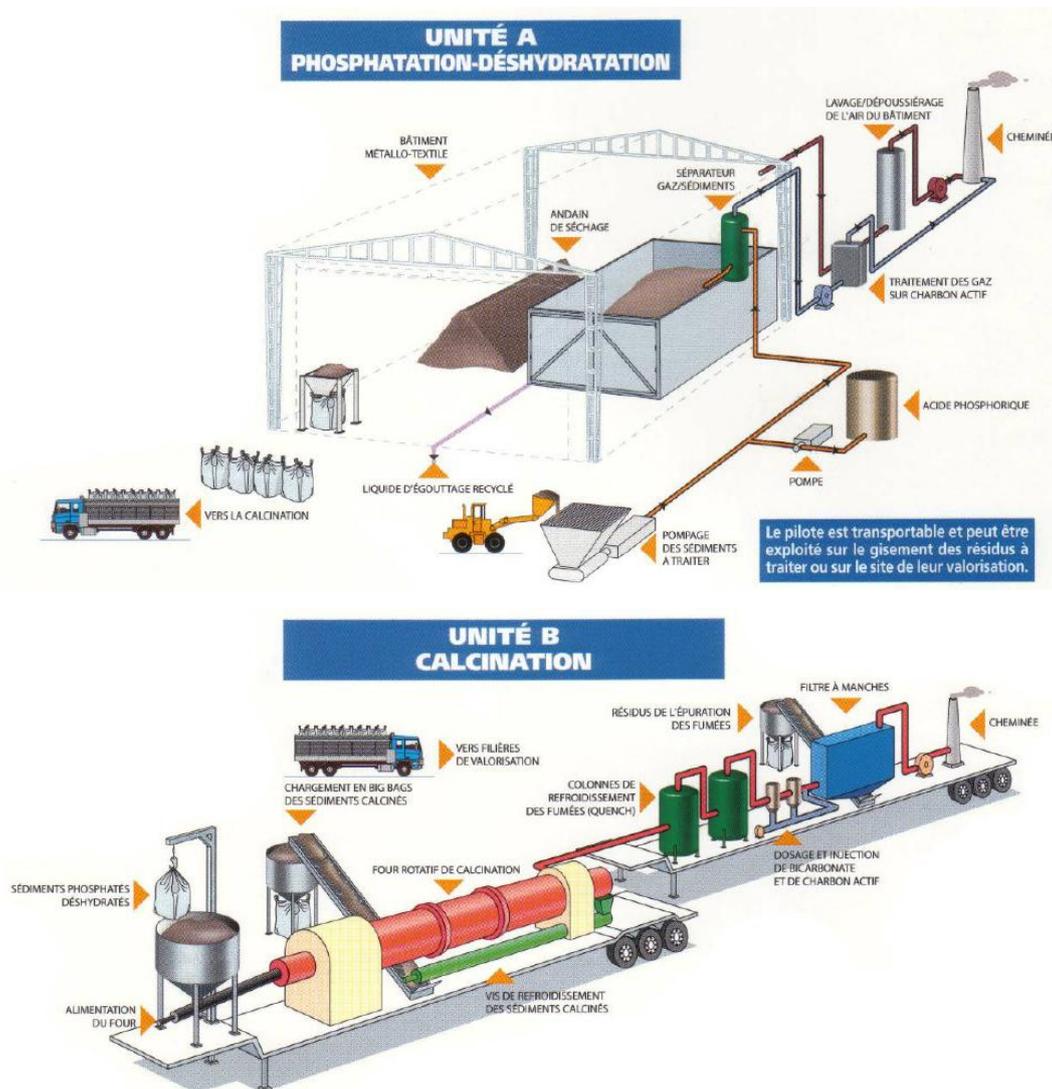


Figure 4.14. Procédé Novosol (Unités A et B) pour le traitement des sédiments pollués (Agostini, 2006)

Les produits traités ont été ensuite utilisés dans les mortiers en remplacement des granulats naturels. Quatre types de mortiers ont été réalisés : mortier de référence MR, mortiers à 33% ; 66% ; 100 % de remplacement du sable par le sédiment traité. La résistance à la compression, le module d'Young, la perméabilité au gaz, la porosité et la masse volumique ont été mesurés sur divers échantillons à l'âge de 28, 60 et 90 jours. Les résultats ont montré que lorsque la

quantité de sédiment dans le mélange augmente, la porosité augmente et la masse volumique diminue (Figure 4.15).

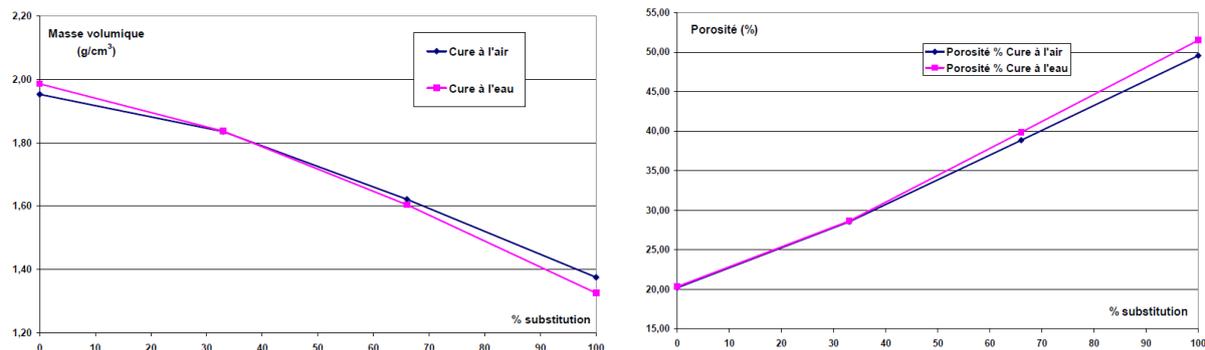


Figure 4.15. Variation de la masse volumique et la porosité avec la substitution des sédiments (Agostini, 2006)

La valeur de la perméabilité intrinsèque du mélange MS33 est très proche de celle du mortier de référence MR; en revanche les valeurs correspondant à MS66 et MS100 sont plus grandes de trois (03) fois par rapport aux deux premiers. Des mesures de retrait ont aussi été effectuées, où ils ont montré qu'à l'âge de 110 jours, la déformation de MS100 est jusqu'à neuf (09) fois supérieure à celle de MR. Pour les substitutions inférieures, les déformations finales sont trois à six fois supérieures à celle du mortier de référence. De larges fissures ont été observées rapidement sur l'échantillon MS100. Ce phénomène n'a pas été observé ni sur MS33 ni sur MS66.

En ce qui concerne la résistance à la compression, les résultats ont montré que l'introduction des sédiments traités dans les mortiers ont conduit à l'amélioration de la résistance à la compression (Figure 4.16). Une augmentation de 20% est obtenue pour MS33. Selon la courbe de compression en fonction du taux de substitution, la valeur optimale se trouve avoisine les 33%. Hors de cette zone, la résistance diminue, mais elle est encore plus grande que celle du mortier de référence. À cette fin, le processus Novosol permet de traiter efficacement les sédiments dragués et contaminés puisqu'il fixe les métaux lourds dans la matrice d'apatite et élimine les combinaisons organiques et que le produit obtenu peut être utilisé comme du sable avec un taux de substitution optimal d'environ 33%.

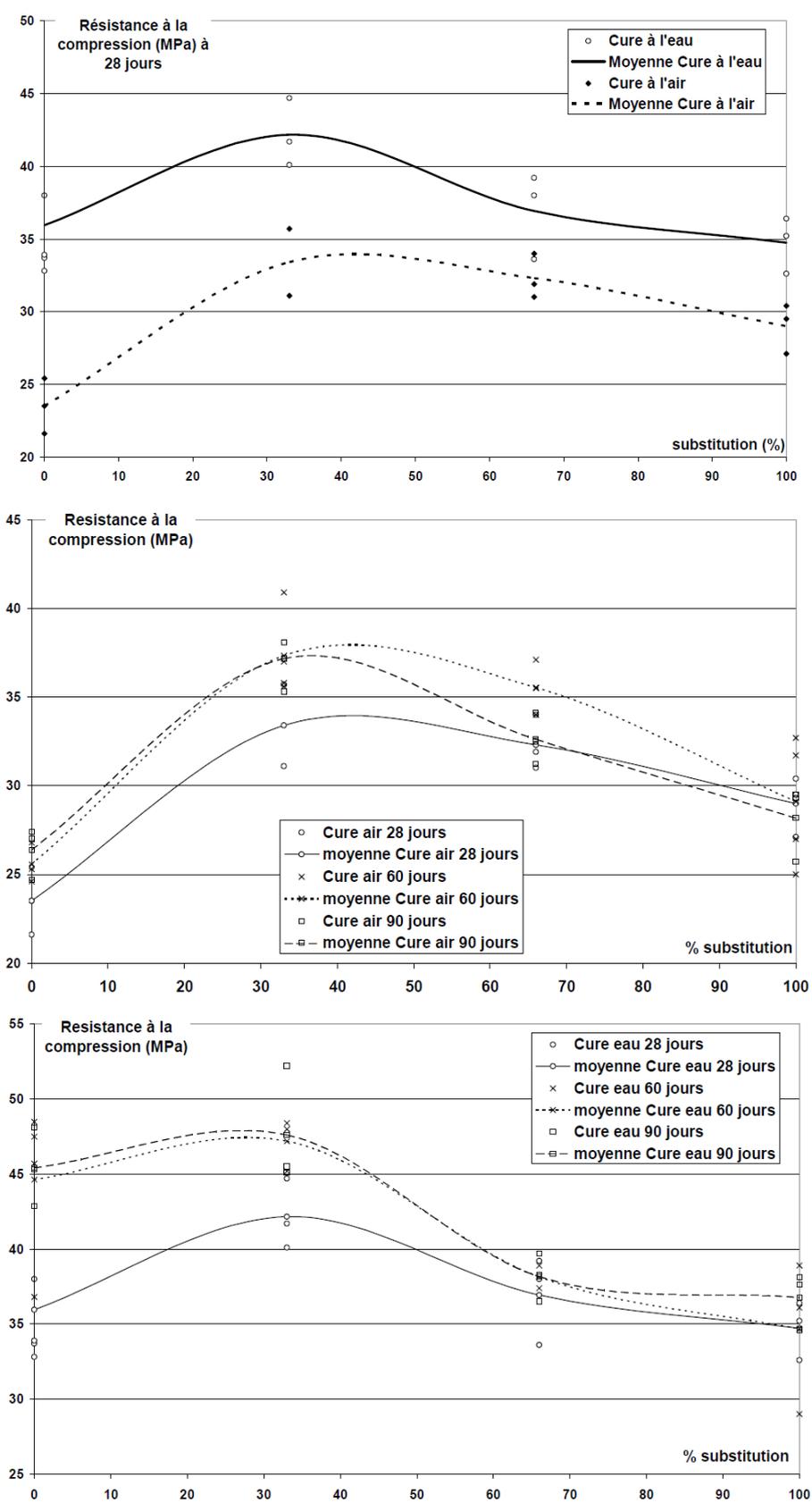


Figure 4.16. Variation de la résistance à la compression (R_c) uni-axiale des mortiers en fonction du taux de substitution et des conditions de cure (Agostini, 2006).

4.3.8. Travaux de Safhi (2020)

Safhi (2020) a étudié la possibilité d'utiliser des sédiments marins dragués comme additif de ciment dans les formulations de béton autoplaçant BAP (SCC en anglais). Selon les essais expérimentaux menés, ces sédiments marins nécessitent un supplément d'eau pour maintenir la maniabilité du béton. De plus, le traitement thermique est très efficace : il augmente la densité, la teneur en silice (forte intensité du pic de diffraction du quartz) et diminue la teneur en trioxyde de soufre. Il a été observé que le sédiment marin traité peut réduire la chaleur d'hydratation du ciment.

En ce qui concerne l'état frais, jusqu'à 20 % de substitution, toutes les fonctionnalités se situent dans la plage d'auto compatibilité recommandée. Pour les performances de l'état durci, il montre une résistance à la compression considérable et une résistance à la traction acceptable. La méthode utilisée pour optimiser la compacité est également un facteur clé pour un BAP compact et efficace. Des études environnementales sur la migration des métaux lourds ont montré que toutes les concentrations dans les poudres broyées des trois BAP sont inférieures à la limite de lixiviation des déchets inertes.

4.3.9. Travaux de Belas et al.2011

Belas et al.2011 ont valorisé le sédiment issu du barrage de Fergoug (Algérie) en tant que matériau de construction entrant dans la composition des bétons en l'utilisant, après calcination pour le rendre active, en dosages définis substituables au ciment (10, 15 et 20% de sédiment par rapport au dosage en masse du ciment). Les bétons ainsi confectionnés sont testés vis-à-vis du comportement mécanique en compression et du retrait. Les résultats de cette étude ont montré que la présence de la vase contribue au déclenchement rapide du début de prise ce qui peut être utile en cas de bétonnage par temps froid (Figure 4.17).

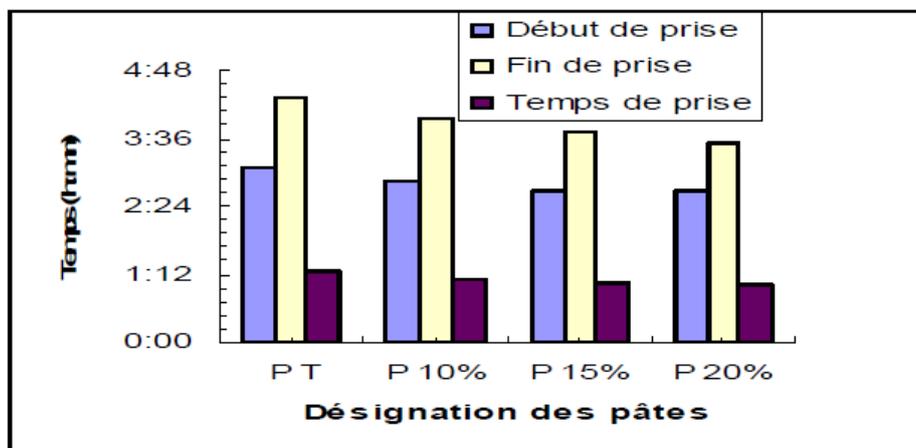


Figure 4.17. Variation du temps de prise des pâtes avec la substitution des sédiments (Belas et al.2011).

Les résistances mécaniques des bétons à base de 0, 10 et 15 % de sédiment restent très proches. Quant au béton contenant 20 % de sédiments, ses résistances évoluent de manière ascendante à moyen terme, et probablement il continuera son ascension à long terme (Figure 4.18).

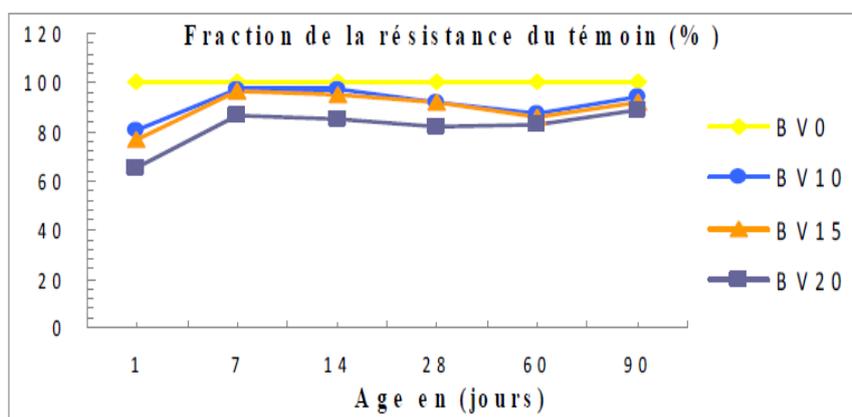


Figure 4.18. Evolution de la fraction des résistances en compression des bétons à base de vase par rapport au béton témoin (sans vase) (Belas et al.2011).

Conclusion :

Les opérations de dragage constituent une nécessité vitale au maintien et au développement des milieux fluvial et maritime. La pratique du dragage engendre des volumes importants de sédiments qui, dans certains cas, peuvent contenir des éléments polluants.

Ces dragages peuvent également engendrer des modifications hydromorphologiques et hydrographiques des zones draguées et avoir un impact global sur les sites d'immersion ou de gestion à terre. Par ailleurs, les dragages peuvent avoir des effets et des externalités positifs en matière d'environnement. En effet, les matériaux dragués peuvent être intégrés sous certaines conditions dans des filières de traitement permettant leur exploitation, notamment dans des matériaux de construction.

Ce chapitre a été consacré à une synthèse bibliographique succincte d'études faites sur le traitement des sédiments de dragage pour objectif de les exploiter en domaine de la construction. L'utilisation de ces sédiments traités a abouti à certaines conclusions qui sont :

1. L'ajout de sédiments traités dans les mortiers a permis d'approcher la résistance mécanique du mortier témoin et d'améliorer leurs performances aux attaques chimiques ;

2. La présence des sédiments traités dans la composition des bétons contribue au déclenchement rapide du début de prise ce qui peut être utile en cas de bétonnage par temps froid ;
3. L'introduction des sédiments marins jusqu'à 15% dans la barbotine de brique donne une contrainte seuil comparable avec la barbotine de brique ;
4. Les résistances à la flexion et à la compression des mortiers diminuent lorsque le taux de remplacement du ciment par les sédiments augmente. En conséquence, la résistance mécanique diminue linéairement avec le taux de substitutions en sédiment.
5. Les sédiments ont un effet bénéfique sur l'hydratation du ciment ;
6. Les propriétés aux états frais et durci de bétons contenant des sédiments en remplacement du ciment ont démontré qu'il est possible de réaliser un béton de type C30 contenant moins de 20% de ciment substitué par des sédiments non pollués et séchés sans avoir recours à des adjuvants.
7. L'ajout de 30% de sédiments à E/S de 0,45 et en absence de silicates, permet de maintenir des résistances mécaniques et des cinétiques comparables à celles obtenues sans sédiments sauf que les temps de prises sont ralentis. En présence de silicates, l'ajout de sédiments permet de maintenir une bonne ouvrabilité mais réduit les performances mécaniques. En raison de la forte demande en eau des sédiments, la maniabilité des pâtes n'est pas constante ;
8. À faible rapport E/S, l'ajout de sédiments est la cause de la réduction des résistances mécaniques. En revanche, à E/S élevé, c'est l'apport d'eau qui est responsable majoritairement de la diminution des résistances ;
9. La résistance à la flexion pour les carreaux préparés par les sédiments est proche à celle de l'argile, pour différentes températures de cuisson. Plus la température de cuisson augmente plus le carreau produit résiste bien à la flexion, où une température de 1000°C est suffisante pour avoir un carreau répondant aux normes et exigences internationales.

CONCLUSION GENERALE

La problématique relative à la gestion durable des déchets de sédiments est récente et a suscité de nombreuses réflexions au sein de la communauté scientifique mais également chez les gestionnaires. Cet intérêt s'est notamment traduit par l'émergence de nombreux projets de recherche.

Les connaissances et retours d'expérience acquis ces dernières années ont permis une avancée considérable en matière de gestion et de valorisation des sédiments de dragage. Depuis quelques années, les applications sédimentaires dans le Génie Civil sont de plus en plus étudiées. La composition principale du sédiment est le sable, l'argile et le calcaire. Le pourcentage de ces derniers peut varier selon l'origine du sédiment.

La variation dans la composition permet aux sédiments d'avoir un potentiel de valorisation très variable dans le Génie civil : soit dans la construction routière, comme granulat dans le béton, ou comme matière première dans la fabrication des matériaux de construction.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'étude de la gestion des déchets de sédiments dans le domaine de construction. Avant de commencer à traiter la problématique nous avons exposé une présentation qui encadre notre travail qui a été mené dans le but d'atteindre trois objectifs principaux. Nous avons dans un premier temps présenté des généralités sur la définition des sédiments de dragage, ainsi qu'une caractérisation approfondie des sédiments qui est exigée afin de connaître leurs propriétés physico-chimiques, minéralogiques, mécaniques et environnementales. Le deuxième objectif est d'exposer les principales directives des réglementations pour la gestion des sédiments dans le domaine de construction à l'échelle internationale et européenne.

Le troisième objectif visait la mise en évidence de la valorisation des sédiments de dragage dans les différents domaines de matériaux de construction en particulier ciments, bétons et briques. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons exposés une liste exhaustive des principales techniques de traitement disponibles.

Sur la base des états de connaissances recensés dans cette étude, on peut conclure ce qui suit :

1. L'ajout de sédiments traités dans les mortiers a permis d'approcher la résistance mécanique du mortier témoin et d'améliorer leurs performances aux attaques chimiques ;
2. La présence des sédiments traités dans la composition des bétons contribue au déclenchement rapide du début de prise ce qui peut être utile en cas de bétonnage par temps froid ;

3. L'introduction des sédiments marins jusqu'à 15% dans la barbotine de brique donne une contrainte seuil comparable avec la barbotine de brique ;
4. Les résistances à la flexion et à la compression des mortiers diminuent lorsque le taux de remplacement du ciment par les sédiments augmente. En conséquence, la résistance mécanique diminue linéairement avec le taux de substitutions en sédiment.
5. Les sédiments ont un effet bénéfique sur l'hydratation du ciment ;
6. Les propriétés aux états frais et durci de bétons contenant des sédiments en remplacement du ciment ont démontré qu'il est possible de réaliser un béton de type C30 contenant moins de 20% de ciment substitué par des sédiments non pollués et séchés sans avoir recours à des adjuvants.
7. L'ajout de 30% de sédiments à E/S de 0,45 et en absence de silicates, permet de maintenir des résistances mécaniques et des cinétiques comparables à celles obtenues sans sédiments sauf que les temps de prises sont ralentis. En présence de silicates, l'ajout de sédiments permet de maintenir une bonne ouvrabilité mais réduit les performances mécaniques. En raison de la forte demande en eau des sédiments, la maniabilité des pâtes n'est pas constante ;
8. À faible rapport E/S, l'ajout de sédiments est la cause de la réduction des résistances mécaniques. En revanche, à E/S élevé, c'est l'apport d'eau qui est responsable majoritairement de la diminution des résistances ;
9. La résistance à la flexion pour les carreaux préparés par les sédiments est proche à celle de l'argile, pour différentes températures de cuisson. Plus la température de cuisson augmente plus le carreau produit résiste bien à la flexion, où une température de 1000°C est suffisante pour avoir un carreau répondant aux normes et exigences internationales.

Sources bibliographiques :

- **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.

- **ACHOUR, R (2013).** Valorisation et Caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke, Canada.

- ADEME (2006)** Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation. Rapp d'étude 92.

- **AGOSTINI F. (2006).** Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2006.

- Aloui-Labioud Z.,** Etude de l'amélioration des caractéristiques Physico-chimiques de la Sebkhha d'Oran en vue d'arrêter son étendue, Thèse Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2014.

- **ALVISET L. (1994).** Matériaux de Terre Cuite "Techniques de l'Ingénieur" 1994.

- Alzieu C (1999)** Dragages et environnement marin. Etat de connaissances .

- Augustin 2006 F. Agostini.** "Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins". Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, 2006.

- Behmanesh J (2008)** Etude de la durabilité d'un sédiment, traité au ciment et additifs.

Thèse Dr Univ Caen 216.

- **BELAS N., BELARIBI O., MEBROUKI A., BOUHAMOU N. (2011).** Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons, INVACO2 : Séminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de Construction, Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011.

- **BEN ABDELJELIL, J. (2020).** Potentiel des carapaces de crustacés pour la fabrication des bétons à base de sédiments de dragage. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke, Canada.

- **BENALLAL L. AMMARI M., FRAR I., AZMANI A., BELMOKHTAR N. (2011).** Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc). Revue PARALIA, Volume 4 pp 5.1-5.13, 2011.

- Benasla 2015** M. Benasla. ‘’ Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l’Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction’’. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed BOUDIAF, Algérie, 2015.
- **BENASLA, M., BENAMARA, L., HADJEL, M. (2015)**. Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l’Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction. J. Mater. Environ. Sci. 6 (2) 546-558
- **BENYEROU, D., BOUDJENANE, N., BELHADRI, M. (2016)**. Caractérisation et valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques. J.Mater.Environ.Sci.7(4), 1317-1327
- Boopathy R (2000)** Bioremediation of explosives contaminated soil. Int Biodeterior Biodegradation 46:29-36. doi: 10.1016/S0964-8305(00)00051-2
- **BOURABAH M.A. (2012)**. Comportement mécanique des sols fins. Application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière. Thèse de Doctorat en Génie-Civil, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Boutin, R., 2000:** « Dragage et rejets en mer- les produits de type vase », Presses de l’école nationale des ponts et chaussées. 2000 ; 307p.
- **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
- Bucheli-Witschel M, Egli T (2001)** Environmental fate and microbial degradation of aminopolycarboxylic acids. FEMS Microbiol Rev 25:69-106. doi: 10.1016/S0168-6445(00)00055-3
- Dia, M., 2013:** «Traitement et valorisation de sédiments de dragage en technique routière », Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Douai, 169 pages.
- Egli T (2001)** Biodegradation of metal-complexing aminopolycarboxylic acids. J Biosci Bioeng 92:89-97. doi: 10.1263/jbb.92.89
- Gabet S (2004)** Remobilisation d’Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) présents dans les sols contaminés à l’aide d’un tensioactif d’origine biologique. Thèse Dr Univ LIMOGES 177.
- GÉODE (2012)** Suivis environnementaux des opérations de dragage et d’immersion Guide méthodologique. France 133.
- Gidakos E, Giannis A (2006)** Chelate agents enhanced electrokinetic remediation for removal cadmium and zinc by conditioning catholyte pH. Water Air Soil Pollut 172:295-312. doi: 10.1007/s11270-006-9080-7

-Hamdoun H (2013) Valorisation de sédiments de dragage en techniques routières et acceptabilité environnementale : caractérisation globale et études de mobilités d'éléments métalliques par extractions simples, séquentielles et cinétiques. Thèse Dr Univ Caen 307.

-Hamer K. et Karius V., Brick production with dredged harbour sediments. An industrialscale experiment. Waste Management, Volume 22, Issue 5, PP 521-530, 2002.

- HAYET, A., DERAM, A., BOHAIN, D. (2017). Contexte et cadre réglementaire de la gestion des sédiments de dragage. Impacts écologiques de sédiments pollués extraits et déposés en milieux terrestres. p. 49.

-Hlavackova P (2005) Evaluation du comportement du cuivre et du zinc dans une matrice de type sol à l'aide de différentes méthodologies. Thèse Dr Insa 207.

-Joner EJ, Leyval C (2003) Phytoremediation of organic pollutants using mycorrhizal plants: a new aspect of rhizosphere interactions. Agronomie 23:495-502. doi: 10.1051/agro:2003021

- KARAM, R., DENELEE, D., BULTEEL, D. (2018). Développement d'un nouveau liant alcali-activé incorporant des sédiments de dragage. Conférence Internationale Francophone NoMaD 2018, Liège Université, Liège, Belgique

- KAZI AOUAL-BENSLAFA, F., MAAROUF, H., SEMCHA, A., MEKERTA, B. (2011). Durabilité des mortiers à base de sédiments de dragage du port d'Oran. In Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime. Ed. 2, Tanger, Maroc, pp. 195-98

-KHATIB 2005 J.M. Khatib. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. Cement and Concrete Research, n°35 (2005), pp. 763-769.

-Kribi, S., *Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage.* 2005, INSA Lyon. p. 220

- KRIBI, S. (2005). Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage. Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

-Lafhaj, Z., et al., 2007: « Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks », Construction and Building Materials, 2007, volume 148 pages 606-612.

-Lafhaj, Z., et al., *Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol® process and valorization in clay bricks.* Construction and Building Materials, 2008.

-Lafhaj Z, Samara M, Agostini F, et al (2008) Polluted river sediments from the North

region of France: Treatment with Novosol® process and valorization in clay bricks. Constr Build Mater 22:755-762. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.023

-Le Guyader C (2013) Enquête « dragage 2010». Margny Lès compiègne

22(5): p. 755-762.

-Liang Y (2012) Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres. Thèse Dr Univ Caen 194.

-Manap N, Voulvoulis N (2015) Environmental management for dredging sediments – The requirement of developing nations. J Environ Manage 147:338-348. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.09.024

-Marot, F., *Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques.* 1998, Paris BRGM.

-Meers E, Ruttens a, Hopgood MJ, et al (2005) Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendements for enhanced phytoextraction of heavy metals. Chemosphere 58:1011-22. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.09.047

- MOUGIN, C., CHAPLAIN, V., GAILLARDON, P., SOHIER, L., MERCIER, R., SIGOILLOT, J. C., LAUGERO, C., ASTHER, M. (1996). Le traitement biologique des sols pollués par des composés organiques l'intérêt des champignons filamenteux. Courrier de l'Environnement de l'INRA n°28.

-Mulligan CN, Yong RN, Gibbs BF (2001b) An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments. J Hazard Mater 85:145-163. doi: 10.1016/S0304-3894(01)00226-6

-OIKONOMOU 2004] Nik. D. Oikonomou. Recycled concrete aggregates. Cement & Concrete Composites, Volume 27, Issue 2, February 2005, pp. 315-318

-Otto M, Bajpai S, Martha Otto SB (2007) Treatment technologies for mercury in soil, waste, and water. Remediat J 18:21-28. doi: 10.1002/rem.20150

-Pazos M, Rosales E, Alcántara T, et al (2010) Decontamination of soils containing PAHs by electroremediation: A review. J. Hazard. Mater. 177:1-11.

-Perchet G-T (2008) Etude de bioremédiation de sédiments contaminés par des composés organiques nitres persistants. Thèse Dr Inst Natl Polytech TOULOUSE 201.

-Ramade, F., *Science de l'eau* 1998, Ediscience: Paris. p. 785.

- **RAMAROSON, J. (2008).** Calcination des sédiments de dragage contaminés. Études des propriétés physico-chimiques. Thèse de Doctorat. INSA Lyon, France.

- **REMINI B (2006).** Valorisation de la vase des barrages quelques exemples Algériens, Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface Chercheur au laboratoire LARHYSS, Biskra, Algérie, 2006.
- **REMINI, B. (2017).** Une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages. Larhyss Journal, 31, 51-81.
- REMINI B., HALLOUCHE W. (2004).** La sédimentation dans les barrages Algériens. La Houille Blanche, N°01.

- **RUBAN, V., ARNAUD, G., CONIL, P., PETAVY, F., VIAU, J. (2010).** Traitement et valorisation des sédiments de l'assainissement pluvial routier et urbain: Apport des tris physiques. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées-série: génie urbain.

- **SAFHI, AEM (2020).** Valorisation des sédiments de dragage dans des bétons autoplaçants : optimisation de la formulation et étude de la durabilité. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Mines-Télécom Lille Douai (France); Université de Sherbrooke (Québec, Canada).
- Samara, M., et al., 2009:** « Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment », Journal of Hazardous Materials, Volume 163 pages 701-710.

- Schneider G (2001)** Le curage des sédiments des cours d'eau.

- SEMCHA A. (2006).** Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, Cas du barrage

- **SONG, Y. (2016).** Traitement électrocinétique des sédiments de dragage et valorisation par solidification/stabilisation. Thèse de Doctorat. Université de Normandie, France.

- **TABIOU, G. (2015).** Humidités caractéristiques et réserve utile des sols du dispositif expérimental crop-news de kamboinse (burkina faso). Mémoire de Master. Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement. BURKINA FASO
- Thomé 2018** Thomé, A.; Reginatto, C.; Vanzetto, G.; Braun, A.B. Remediation technologies applied in polluted soils: Newperspectives in this field. InThe International Congress on - Environmental Geotechnics; Springer: Singapore,2018; pp. 186–203.

-Trifault-Bouchet, G., *Effet sur les écosystèmes aquatiques lentiques des émissions de polluants provenant de différents modes de valorisations/élimination de déchets - Application à des mâchefers d'UIOM et à des boues de dragage de canaux.* 2004, Université de Savoie. p. 309.

-USEPA (1993) Selecting remediation techniques for contaminated sediment. 226.

-Yeung AT (2009) Remediation Technologies for contaminated sites. Proc Int Symp Geoenvironmental Eng 328-369. doi: 10.1007/978-3-642-04460-1_25

-Zakaria, M., 1996: « Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay», Waste mangement, Volume, Issues 1-3, Pages 151-158.

- ZHAO Z., BENZERZOUR M., ABRIAK N-E., DAMIDOT D. (2015). Valorisation des sédiments marins dragués en substitution partielle du ciment dans la fabrication de mortiers et de bétons. Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015, Mines Douai, France

Webographie :

[1] : <https://www.ipgp.fr/fr/sediments-carottes>

[2] : <https://le-jardin-des-medicinales.com/analyse-du-sol/>

[1] : <https://www.milieumarinfrance.fr/Nos-rubriques/Cadre-reglementaire/Conventions-des-mers-regionales/Convention-OSPAR>

[2] : <https://oap.ospar.org/fr/evaluations-ospar/evaluation-intermediare-2017/messages-cles-et-points-saillants/la-cooperation-permet-de-progresser/>

[3] : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/89/London_Convention_signatories.png/1024px-London_Convention_signatories.png

[4] : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128084>

[5] : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1b/Mittelmeeranrainer.png/1280px-Mittelmeeranrainer.png>

[6] : <https://www.milieumarinfrance.fr/Portails-de-donnees/Directive-Cadre-sur-l-Eau>

[a] : <https://www.selecdepol.fr/techniques-de-depollution>

[B] : <https://www.aquaportail.com/definition-5036-biolixiviation.html>

[c] : <https://doi.org/10.1051/lhb:200405012>