



THÈSE

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat

Présentée par : *Mme BENYEROU Djamila*

*Caractérisation et valorisation des sédiments marins dans
la fabrication des briques*

<i>Faculté</i>	<i>Faculté d'Architecture et de Génie civil</i>
<i>Département</i>	<i>Hydraulique</i>
<i>Spécialité</i>	<i>Hydraulique</i>
<i>Option</i>	<i>Technique des eaux et environnement</i>

Soutenue le 28/06/2017 devant le Jury Composé de :

<i>Membres de Jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Domiciliation</i>
<i>BELHADRI Mamour</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>	<i>USTO (M.B)</i>
<i>BOUDJENANE Nass Eddine</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadreur</i>	<i>USTO (M.B)</i>
<i>KHARROUBI Benali</i>	<i>Pr</i>	<i>Examinateur</i>	<i>USTO (M.B)</i>
<i>BENRAHOU Kouider Halim</i>	<i>Pr</i>	<i>Examinateur</i>	<i>UNIV- Sidi Bel Abbès</i>
<i>MERJEM BENZIANE Madjid</i>	<i>MCA</i>	<i>Examinateur</i>	<i>UNIV- Chlef</i>
<i>SEMCHA Abdelaziz</i>	<i>MCA</i>	<i>Invité</i>	<i>UNIV-Adrar</i>

Année Universitaire : 2016 / 2017

Remerciements

Ma profonde gratitude s'adresse tout d'abord à mon Directeur de thèse, monsieur **Boudjenane Nasr-Eddine**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Mohammed Boudiaf d'Oran USTO-MB qui m'a orientée, encouragée et m'accordée sa confiance. Je tiens à le remercier également de m'avoir confié ce travail et pour ses précieux conseils qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce manuscrit et sa patience.

J'adresse mes remerciements aussi à monsieur **Belhadri Mansour**, Professeur d'USTO-MB pour son soutien et pour tout ce que j'ai appris avec lui durant ce travail, pour son aide, ses conseils et ses encouragements.

Je tiens à remercier Mr **Benamara Lakhdar** et Mr **Ouahba Kamel** de m'avoir autorisé à travailler au laboratoire de (MDS), je les remercie pour leur aide, leurs conseils et leurs confiances. Je remercie également Mr **Mekerta Belkacem** Professeurs à l'Université d'Adrar pour ses conseils et son soutien. Je remercie aussi Mme **Bellahcene Naima** de m'avoir aidé et donner ses précieux conseils qui m'ont permis d'améliorer la qualité de mon travail.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à Mlle **Touafek Aicha, mokhtaria et houaria**, Mr **Hammadi larbi**, Mr **Sirat abdelkader**, Mr **Mekkaoui**, Mr **Benkhalfa**, Mr **Bousoultane**, Mr **Rahmani** et Mr **Mekaddem** qui m'ont aidé dans des phases difficiles de ce travail.

Je remercie vivement Monsieur **Belhadri Mansour** Professeur d'USTO-MB pour son aide et d'avoir accepté de présider ce travail. Je remercie aussi Monsieur **Kharroubi Benali** Professeur d'USTO-MB pour son aide et d'avoir accepté d'examiner cette thèse. Je remercie monsieur **BENRAHOU Kouider Halim** Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbés d'avoir accepté d'examiner ce travail. J'adresse aussi mes sincères remerciements à monsieur **SEMCHA Abdelaziz** Maître de Conférences (A) à l'Université d'Adrar qui me fait l'honneur d'examiner mon travail et je remercie aussi monsieur **MERIEM BENZIANE Madjid** Maître de Conférences (A) à l'Université de Chlef d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'adresse mes remerciements à toute l'équipe du Département et à tous mes amis et collègues de laboratoire de (**LRTTFC**) et le laboratoire de (**MDS**) à USTO-MB et à l'extérieur d'USTO-MB les laboratoires de (**CTH, LAFARGE et Saffesc**) pour la bonne ambiance de travail. Je remercie encore tous les enseignants - chercheurs, les techniciens et mes collègues doctorants (**Merabet Faiza, Mahi Sahra, Nedloussi, Hathout, Mami,**

Sahnine, Hadj djeloul et Kara Omar) pour tous les échanges techniques, scientifiques et pour leur sympathie, leur accueil chaleureux pendant ces cinq ans de thèse.

Merci à tous mes amis pour leur amitié (**Fatiha et Asma**) avec qui, j'ai partagé des bons et mauvais moments. Pour le meilleur, c'est surtout une profonde pensée pour ma mère (**AICHE FATIMA ZOHRA**) décédée et qui aurait été fière de moi. Merci également mon père, mon mari (**Amri Mohammed**) qui n'ont jamais cessé de m'encourager, me soutenir, m'aider physiquement, moralement et financièrement et me procurer des conditions favorables pour le travail et qui a un grand rôle pour achevé ma thèse. Je tiens à exprimer mes plus tendres sentiments à mes enfants (**Adem et Zakaria**), pour leur patience durant mes longues absences. Merci enfin ma famille et ma belle famille pour leur amour, leur soutien sans faille et à tout ce qu'ils ont pu m'apporter pour franchir les obstacles les plus difficiles.

ملخص

هذا العمل هو جزء من تطوير حلول بديلة لإدارة أفضل للجرف الرواسب أو التنظيف. إن العمل الذي تقلوم كجزء من هذا التركيز العمل على تطوير الرواسب البحرية في صناعة الطوب. السعي لفهم الآليات التي تشارك في مقدمة له من الرواسب استبدال الرمل والطين المستخدم في صناعة الطوب

توصيف المعنية تحديد وتحليل، المعدني، والكيميائية، والرواسب البيئية والانسيابية البدني. سمحت هذه الدراسة إلى رسم دراسة شاملة إلى حد ما الرواسب بطاقات هوية خصائص ميناء بطيوة. بعد تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية، والترخيص، البيئي، والمجهرية والرواسب الخام الانسيابية، يتم تقييم إمكانية استخدام هذه المواد في صناعة الطوب. وتستند الدراسة صياغة المواد للاستخدام في لبنة على طريقتين. دراسة الانسيابية على تقييم للسهم ودراسة أداء الميكانيكية من هذا التقييم الثاني.

تظهر خصائص الانسيابية والميكانيكية أن إدخال 15٪ من الرواسب البحرية في زلة لبنة يعطي إجهاد الخضوع للمقارنة مع الطوب الطين وسقوط إجهاد الخضوع لإضافة 20٪ الرواسب. إجهاد الخضوع أعلى لإضافة 5 و 10٪ في الرواسب. تبديل الرواسب مع هذا تركيز الرواسب يزيد من قوة الضغط مع انخفاض درجة الحرارة وانخفاض وقت الطهي. استخدام الرواسب مع إضافة 5٪ يزيد من إنتاج الطوب أربعة أضعاف المبلغ الحالي للمصنع مع عملية التصنيع نفسها واستعادت قوة الطبخ 300 درجة مئوية.

وأخيرا، يمكننا أن نستنتج أن الطوب إنتاجها مع اضافات من الرواسب البحرية لها والكيميائية والمعدنية، ومعايير التصنيع المشاركين الانسيابية والميكانيكية الطوب مرضية للغاية المادية.

كلمات البحث: توصيف الرواسب البحرية، التقييم، زلة لبنة، التجريف، الطوب

Résumé

Ce travail de thèse entre dans le cadre du développement de solutions alternatives pour une meilleure gestion des sédiments de dragage ou de curage. Les travaux menés dans le cadre de ce travail portent principalement sur la valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques. On cherche à comprendre les mécanismes mis en jeu lors de l'introduction de ses sédiments en substitution du sable et de l'argile utilisés dans la production des briques.

La caractérisation a concerné la détermination et l'analyse des propriétés physiques, minéralogiques, chimiques, environnementales et rhéologique des sédiments. Cette étude a permis de dresser des fiches d'identité assez complètes des propriétés des sédiments du port de Bethioua. Après une identification physico-chimique, minéralogique, environnementale, microscopique et rhéologique des sédiments bruts, le potentiel d'utilisation de ces matériaux dans la fabrication des briques est évalué.

L'étude de formulation de matériaux pour une utilisation dans la brique s'est basée sur deux méthodes. L'étude rhéologique sur la valorisation d'une part et l'étude de la performance mécanique de cette valorisation d'autre part.

Les caractéristiques rhéologiques et mécaniques montrent que l'introduction de 15% des sédiments marins dans la barbotine de brique donne une contrainte seuil comparable avec la barbotine de brique et chute de la contrainte seuil pour un ajout de 20% en sédiments. La contrainte seuil est plus élevée pour un ajout de 5 et 10% en sédiments. La substitution des sédiments avec cette concentration par des sédiments augmente la résistance à la compression avec une faible température et une faible durée de cuisson.

L'utilisation des sédiments avec un ajout de 5% augmente la production des briques de quatre fois la quantité actuelle de l'usine avec les même processus de fabrication et on récupère une énergie de cuisson de 300°C.

Finalement, on peut conclure que les barbotines avec ajouts de sédiments marins possèdent des propriétés physiques, chimiques, minéralogiques, rhéologiques et mécaniques très satisfaisantes répondants aux normes de fabrication des briques.

Mots clés : sédiments marins, caractérisation, valorisation, barbotine de brique, dragage, brique.

Abstract

This work of this thesis work falls within the alternative solutions development framework for better management of sediment dredging or cleaning. The work carried out as part of this work focus on the development of marine sediments in the manufacture of bricks. It seeks to understand the mechanisms involved in the introduction of its replacement sand sediment and clay to use in brick production.

The characterization involved the determination and analysis of the physical, mineralogical, chemical, environmental and rheological properties of the sediments. This study resulted in fairly comprehensive identification records of the sediment of Bethioua port properties. After a physicochemical, mineralogical, environmental, microscopic and rheological identification of the raw sediments, the potential for use of these materials in the manufacture of the bricks is evaluated.

The study of formulation of materials for using in brick was based on two methods. The rheological study on valorization on the one hand and the study of the mechanical performance of this valuation on the other hand.

The rheological and mechanical characteristics show that the introduction of 15% of the marine sediments into the brick slip gives a comparable threshold stress with the brick slip and threshold stress reduction for a 20% addition of sediment. The threshold stress is higher for an addition of 5 and 10% in sediments. Substitution of sediment with this concentration by sediment increases the compressive strength with low temperature and low cooking time.

The using of sediment with an addition of 5% increases the brick production by four times the current quantity of the plant with the same manufacturing processes and a cooking energy of 300 ° C is recovered. Finally, it can be concluded that the bricks produced with the additions of marine sediments possess very satisfactory properties. The physical, chemical, mineralogical, rheological and mechanical properties meeting the brick manufacturing standards.

Keywords: marine sediments, characterization, valorization, brick slip, dredging, brick.

Sommaire

Titre	N° de page
Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaire	
Listes de tableaux	1
Liste des figures.....	3
Liste des annexes.....	6
Nomenclature	7
Introduction Générale.....	8
Chapitre I : Causes et origines de l’envasement des ports et dragage des sédiments	13
Introduction	13
I.1 Causes et origines des sédiments marins	13
I.2 Composition des sédiments marins.....	14
I.3 Gestion des sédiments marins	15
I.4 Nécessité des opérations de dragage	16
I.5 Technique de dragage et de transport.....	17
I.5.1 Dragues mécaniques	17
I.5.2 Dragues hydrauliques.....	18
1. Drague aspiratrice refouleuse stationnaire	19
2. Drague aspiratrice à désagréateur.....	19
3. Drague aspiratrice en marche	20
4. Autres types de dragues hydrauliques	21
I.5.3. Dragues pneumatiques	22
I.5.4. Techniques de transport et de rejet.....	22
1. Dépôt à terre	22
2. Rejet par émissaire ou par conduite.....	22
3. Clapage ou immersion.....	22
I.6 Modalités du dragage	22
I.6.1. Dragage d’entretien.....	23

I.6.2. Dragage d'approfondissement et aménagement de nouvelles aires portuaires	24
I.7 Risques créé par les opérations de dragage	24
Conclusion.....	25
Chapitre II : Caractérisation physico-chimique, minéralogique et rhéologique des matériaux..	27
Introduction	27
II.1 Caractéristiques physiques.....	27
II.1.1 Teneur en eau initiale.....	28
II.1.2 Masse volumique des particules solides	29
1. Masse volumique apparente	29
2. Masse volumique absolue.....	30
II.1.3 Analyse granulométrique	30
1. Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.....	31
2. Analyse granulométrique par laser	32
II.1.4 Limites d'Atterberg	33
II.1.5 Equivalent de sable	36
II.2 Caractéristiques chimiques	37
II.2.1 Analyse chimique par fluorescence des rayons X	37
II.2.2 Analyse environnementale.....	38
II.2.3 Valeurs au bleu de méthylène (VBS)	39
II.2.4 Potentiel hydrogène (pH).....	40
II.2.5 Conductivité.....	41
II.2.6 Matières organiques.....	41
II.2.7 Détermination du taux de carbonates de calcium	41
II.3 Caractéristiques minéralogiques	42
II.3.1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	42
II.3.2 Analyse par spectroscopie infrarouge.....	44
II.4 Caractéristiques microscopiques.....	44
• Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)	45
II.5 Caractéristiques rhéologiques	45
Conclusion.....	46
Chapitre III : Travaux antérieurs dans le domaine de la valorisation des sédiments marins.....	48
Introduction	48
III.1 Valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques.....	49
III.2 Valorisation des sédiments marins en techniques routières	55
III.3 Valorisation des sédiments marins dans le mortier et dans la fabrication du ciment	62

Conclusion.....	68
Chapitre IV : Présentation du port de Bethioua et de la briqueterie de Hassi Ben Okba et processus de fabrication de brique	69
Introduction	69
IV. 1 Présentation du port et prélèvement des échantillons à partir du port de Bethioua.....	69
IV.1.1 Présentation du port de Bethioua	69
IV.1.2 Prélèvement des échantillons à partir du port de Bethioua	70
IV.2 Présentation de la briqueterie de Hassi Ben Okba et processus de fabrication de brique	71
IV.2.1 Présentation de la briqueterie de Hassi Ben Okba	71
IV.2.2 Processus de fabrication de brique et matériaux utilisés dans la briqueterie de Hassi Ben Okba	72
IV.3 Techniques de fabrication des briques	74
IV.4 Préparation de la pate	75
IV.5 Influence de la température sur les constituants.....	78
Conclusion.....	79
Chapitre V : Caractérisation des sédiments marins et de l'argile utilisée pour la fabrication des briques	80
Introduction	80
V.1 Caractéristiques physiques	80
V.1.1 Teneur en eau initiale	81
V.1.2 Masses volumiques.....	81
1. Masse volumique absolue.....	81
2. Masse volumique apparente	82
V.1.3 Analyse granulométrique.....	82
1. Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.....	83
2. Analyse granulométrique par laser	86
V.1.4 Limites d'Atterberg	87
V.1.5 Equivalent de sable.....	89
V.2 Caractéristiques chimiques	90
V.2.1 Analyse chimique par fluorescence des rayons x	90
V.2.2 Détermination du taux de carbonates de calcium	91
V.2.3 Analyse Environnementale.....	92
V.2.4 Valeur au bleu de méthylène	93
V.2.5 Potentiel hydrogène (pH)	94
V.2.6 Conductivité	94
V.2.7 Matières organiques.....	94

V.3 Caractéristiques minéralogiques.....	95
V.3.1 Analyse par diffraction des rayons x (DRX).....	95
V.3.2 Analyse par spectroscopie infrarouge.....	97
V.4 Caractéristiques microscopiques.....	99
• Analyse par microscope électronique à balayage (MEB).....	99
V.5 Caractéristiques rhéologiques.....	100
V.5.1 Matériels et méthode.....	101
Conclusion.....	104
Chapitre VI : Valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques	107
Introduction.....	107
VI.1 Préparation des barbotines sans et avec des sédiments marins.....	107
VI.2 Caractéristiques physiques des barbotines sans et avec des sédiments marins.....	108
VI.2.1 Etude granulométrique des mélanges.....	108
VI.2.2 Etude de la plasticité des mélanges.....	110
VI.3 Caractéristiques chimiques des barbotines sans et avec des sédiments marins.....	110
VI.3.1 Analyse chimique par fluorescence des rayons x.....	111
VI.3.2 Etude de la conductivité des mélanges.....	112
VI.4 Caractéristiques rhéologique des barbotines sans et avec des sédiments marins.....	112
VI.4.1 Influence des sédiments marins sur les rhéogrammes.....	112
VI.4.2 Influence des sédiments marins sur la contrainte seuil.....	114
VI.4.3 Influence des sédiments marins sur la consistance et l'indice de fluidité.....	115
VI.5 Façonnage des éprouvettes des barbotines sans et avec des sédiments marins.....	115
VI.5.1 Méthode de compaction et conception des éprouvettes.....	116
VI.5.2 Séchage et cuisson des éprouvettes de brique.....	117
VI.6 Etude de la résistance et de la qualité de produit fini.....	118
VI.6.1 Résistance en compression.....	118
VI.6.2 Qualité du produit fini.....	122
VI.7 Etude économique.....	123
VI.7.1 Gain de la briqueterie de PROMAG.....	124
VI.7.2 Gain de la briqueterie de PROMAG en utilisant les sédiments marins du port de Bethioua.....	125
1. Transport de sédiments marins vers la briqueterie de PROMAG.....	125
2. Utilisation des sédiments marins avec une capacité de production de 24H/24H.....	126
3. Utilisation des sédiments marins avec une capacité de production de 6H.....	127
VI.7.3 Gain de l'agence nationale de dragage maritime.....	129
Conclusion.....	129

Conclusion générale et perspectives.....	131
Références bibliographiques	134
Annexe 1	
Annexe 2	
Annexe 3	
Annexe 4	

Listes de tableaux

N° et titre du tableau.

N° de page

Tableau II.1: Classes granulométriques des matériau	31
Tableau II.2: Degré de plasticité des sols	35
Tableau II.3: Indice de consistance Ic des limons et des argiles	36
Tableau II.4: Classification des matériaux suivants l'équivalent de sable.....	37
Tableau II.5: Principaux métaux lourds avec leurs sources de pollution	39
Tableau III.1: Composition chimique des mélanges des matières premières utilisées.....	49
Tableau III.2: Les polluants présents dans les sédiments et limites de recommandation en (mg/kg matière sèche).....	50
Tableau III.3: Les quatre mélanges adaptés pour la préparation des échantillons de brique (% de la matière sèche).....	51
Tableau III.4: Caractéristiques physiques des sédiments marins	57
Tableau III.5: Caractéristiques physiques des sédiments	60
Tableau III.6: La densité sèche, la teneur en eau et l'indice CBR pour le plus haut niveau de compactage.....	60
Tableau III.7: Compositions chimiques des sédiments, de ciment fabriqués à base des sédiments (CFPS) et de ciment commerciale l'OPC	64
Tableau III.8 : Distribution granulométrique des sédiments marins	66
Tableau III.9: Résistance en compression pour les différents mortiers.....	67
Tableau V.1: Norme utilisées pour la caractérisation des matériaux étudiés	81
Tableau V.2: Masse volumiques absolue des matériaux étudiés.....	82
Tableau V.3: Masse volumiques apparente des sédiments, de l'argile de briques et de la barbotine de brique.....	82
Tableau V.4: Répartition granulométrique en % des matériaux étudiés	85
Tableau V.5: Coefficients de courbure et d'uniformité des matériaux étudiés.....	86
Tableau V.6: Limites d'Atterberg, indice de consistance et plasticité des matériaux étudiés	88
Tableau V.7: Résultats d'équivalent de sable pour les sédiments marins et le sable utilisé pour la fabrication de brique.....	90
Tableau V.8: Normes et méthodes utilisées pour la caractérisation des matériaux étudiés	90
Tableau V.9: Composition chimique en éléments majeurs dans les matériaux utilisés (en % massique)	91

Tableau V.10: Détermination du taux de carbonates de calcium pour les sédiments marins, l'argile de brique et le sable.....	92
Tableau V.11: Niveau relatifs aux éléments traces (en mg/kg de matériaux étudiés sec analysé sur la fraction inférieur à 2 mm), GEODE (METL et MATE, 2000)	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V.12: Valeurs au bleu de méthylène des sédiments marins et de l'argile de brique	93
Tableau V.13: Détermination du pH des sédiments marins et de l'argile de brique.....	94
Tableau V.14: Détermination de la conductivité des sédiments marins et de l'argile de brique	94
Tableau V.15: Détermination de la matière organique des sédiments marins et de l'argile de brique ..	95
Tableau V.16: Paramètres rhéologiques des sédiments marins.....	102
Tableau V.17: Paramètre rhéologiques de l'argile de brique.....	103
Tableau V.18: Paramètres rhéologique de la barbotine de brique.....	104
Tableau VI.1: Formulations avec ajout de sédiments marins de 0 à 20%	108
Tableau VI.2: Répartition granulométrique en % des formulations.....	109
Tableau VI.3: Limites d'Atterberg et indice de plasticité des formulations.....	110
Tableau VI.4: Composition chimique en éléments majeurs dans les mélanges de barbotine	111
Tableau VI.5: Détermination de la conductivité des formulations.....	112
Tableau VI.6: Paramètres rhéologiques des formulations.....	114
Tableau VI.7: Résistance en compression en fonction de la température pour les barbotines sans et avec les sédiments marins pour une durée de cuisson de 6h	121
Tableau VI.8: Résistance en compression en fonction de la température pour les barbotines sans et avec les sédiments marins pour une durée de cuisson de 24h	122
Tableau VI.9: Quantités des matériaux utilisés dans la briqueterie de PROMAG et quantités des matériaux proposés dans la formulation F1 de l'étude	123
Tableau VI.10: Calcul le cout des matériaux utilisés pour la fabrication des briques.....	123
Tableau VI.11: Coûts et bénéfices de la briqueterie de PROMAG.....	124
Tableau VI.12: Calcul le cout de transport des sédiments marins du port de Bethioua vers la briqueterie de PROMAG.....	126
Tableau VI.13: Calcul du gain de l'usine en utilisant les sédiments marins du port de Bethioua avec une capacité de production de 16H/24H (La cuisson se fait 24h/24h)	126
Tableau VI.14: Calcul du gain de l'usine en utilisant les sédiments marins du port de Bethioua avec une capacité de production de 8H (La cuisson se fait 6h/24h)	128

Liste des figures

N° et titre de la figure	N° de page
Figure I.1: Formation des sédiments	15
Figure I.2: Objectifs de dragage des sédiments en France.	16
Figure I.3: Dragage mécanique	18
Figure I.4: Dragage hydraulique	19
Figure I.5: Dragage aspiratrice en marche	20
Figure I.6: Opérations de relargage en mer	24
Figure I.7: Différents modes de rejet en mer.....	25
Figure II.1: Notation utilisée pour les masses volumiques.....	29
Figure II.2: Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins.....	32
Figure II.3: Etat physique des sols	33
Figure II.4: Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande	35
Figure II.5: Principe de l'étude minéralogique	43
Figure II.6: Schéma de la diffraction des rayons X.....	44
Figure III.1: Le procédé Novosol	51
Figure III.2: Préparation en laboratoire des échantillons de brique.....	52
Figure III.3: Effet de la proportion des sédiments sur la résistance à la compression	52
Figure III.4: Production de briques à l'échelle de laboratoire: a) mélange des matières premières, b) extrusion d'une colonne de briques, c) brique séchée, d) briques cuites.	54
Figure III.5: Résistance à la compression pour des briques à base de 100% de sédiment dans les mélanges (1, 3, 5) et des briques à base de 50% de sédiments dont le mélange 7.	55
Figure III.6: Evolution de la perte de masse en fonction de la température	58
Figure III.7: Evolution de la densité absolue en fonction de la température	58
Figure III.8: Evolution du comportement mécanique du mélange 1 avec le temps	61
Figure III.9: Evolution du comportement mécanique du mélange 2 avec le temps	61
Figure III.10: Diagrammes de DRX du ciment fabriqués à base des sédiments (CFPS) et de ciment commerciale l'OPC.....	64
Figure III.11: Eprouvettes de mortier à base de sédiments	67
Figure IV.1: Site de prélèvement des sédiments (Port de BETHIOUA).....	70

Figure IV.2: Zone d'échantillonnage des sédiments à l'aide d'une drague mécanique	71
Figure IV.3: Organigramme de la briqueterie de PROMAG	72
Figure IV.4: Processus de fabrication des briques	74
Figure IV.5: Processus de fabrication des briques à Hassi Ben Okba.....	75
Figure IV.6: Préparation de la pate des briques à Hassi Ben Okba.....	76
Figure IV.7: La mise en forme de la pate des briques à Hassi Ben Okba	77
Figure IV.8: Processus de cuisson des briques à Hassi Ben Okba	78
Figure V.1: Sédiments du port de Bethioua	83
Figure V.2: Différentes étapes de préparation pour le tamisage	84
Figure V.3: Granulométrie des sédiments, de l'argile, de la barbotine de brique et du sable.....	85
Figure V.4: Granulomètre laser.....	86
Figure V.5: Granulométrie par laser des sédiments, de l'argile et de la barbotine de brique	87
Figure V.6: Distribution des tailles de particules pour les sédiments, l'argile et la barbotine de brique.....	87
Figure V.7: Classification des sédiments du port de Bethioua sur l'abaque de Casagrande	88
Figure V.8: Classification de l'argile de brique sur le diagramme de Casagrande.....	89
Figure V.9: Analyse minéralogique qualitative par diffraction des rayons X des sédiments marins....	96
Figure V.10: Analyse minéralogique qualitative par diffraction des rayons X de l'argile de brique	96
Figure V.11: Analyse minéralogique qualitative par diffraction des rayons X de la barbotine de brique	97
Figure V.12: Spectromètre IRTF BRUKER ALPHA avec module ATR Diamond	98
Figure V.13: Spectres IR de sédiments marins et de l'argile de brique	98
Figure V.14: MEB des sédiments marins.....	99
Figure V.15: MEB de l'argile de brique	100
Figure V.16: MEB de la barbotine de brique	100
Figure V.17: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des sédiments marins	102
Figure V.18: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement de l'argile de brique	103
Figure V.19: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement de la barbotine de brique.....	104
Figure VI.1: Courbes granulométrique de la barbotine de brique et de la barbotine à base des sédiments marins	109
Figure VI.2: Courbe d'écoulement de la barbotine de brique et les barbotines avec ajout des sédiments marins	113
Figure VI.3: Evolution de la contrainte seuil en fonction de concentration massique	114

Figure VI.4: Evolution de la consistance et de l'indice de fluidité des barbotines en fonction des concentrations en ajout des sédiments marins.....	115
Figure VI.5: Préparation en laboratoire des éprouvettes de brique	117
Figure VI.6: Courbe de cuisson, variation de la température en fonction du temps	118
Figure VI.7: Eprouvettes de brique après le test de compression	120
Figure VI.8: Résistance en compression en fonction de la température pour la brique de référence et les briques à base des sédiments marins avec une durée de cuisson de 6h	120
Figure VI.9: Résistance en compression en fonction de la température pour la brique de référence et les briques à base des sédiments marins avec une durée de cuisson de 24h	121
Figure VI.10: Qualité de différentes éprouvettes après cuisson	122

Liste des annexes

N° et titre de l'annexe

Annexe N°1: Physicochemical characteristics of port dredging sediments and of the brick slip used in the manufacture of bricks: a comparative study.

Annexe N°2: Etude de la pollution des vases marines des ports algériens par les hydrocarbures.

Annexe N°3 : Caractérisation et valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques (Characterization and Valorization of marine sediments in the manufacture of bricks).

Annexe N°4: physicochemical characteristics of marine sediments and dams sediments: a comparative study.

Nomenclature

HAP: Les hydrocarbures aromatiques polycycliques

ω : Teneur en eau (en %)

VBS: La valeur au bleu de méthylène

I_C: Indice de consistance

γ_s : La masse volumique absolue des grains solides (g/cm³)

W_L: Limite de liquidité (%)

W_P: Limite de plasticité (%)

I_P: Indice de plasticité

Es : Equivalent de sable (%)

γ : Vitesse de cisaillement en s⁻¹

τ : Contrainte de cisaillement en Pa

K : Indice de consistance en Pa.s_n

n : Indice d'écoulement (-)

PAF : Perte au feu

Ca CO₃ : Carbonates de calcium (%)

MEB: Microscope électronique à balayage

DRX : Diffraction des rayons X

Introduction Générale

Au fil des années, l'accumulation de particules sédimentaires au fond et sur les bords de cours d'eaux et de voies de navigation ainsi que dans les ports maritimes entravent la circulation des navires qui traversent chaque jour des sites portuaires. Pour les cours d'eau navigables, cela ralentit l'écoulement et empêche les activités de transport qui s'y pratiquent. Cette accumulation augmente le risque de crues. Afin de maintenir et de restituer ces accès, il est nécessaire de draguer ou de curer régulièrement. Des opérations de dragage ont toujours été indispensables afin d'entretenir, approfondir ou aménager ces sites et assurer le bon fonctionnement du commerce par voies maritimes.

Ce projet de recherche est lancé dans le but de trouver une nouvelle alternative de gestion de sédiments dragués des ports Algérien, à savoir leur valorisation dans un matériau en génie civil. Le port de Bethioua a été choisit pour cette étude, car il présente le plus grand volume des sédiments marins dragués et qui se consacre aujourd'hui exclusivement aux activités pétrolières et il semble nécessaire d'étudier l'impact environnemental de ce dernier. Cette zone est classée comme zone pétrolière qui favorise la pollution de ses sédiments marins par les hydrocarbures. En outre, une nouvelle étude s'intéresse à l'impact environnemental de la pollution des sédiments marins des ports algérien par les hydrocarbures (Benyerou et al, 2015, *Krachai et al*, 2016, *Atroune. F*, 2015). Il est prouvé que le port de Bethioua présente un taux faible en hydrocarbures par rapport aux autres ports algériens et une absence de pollution métallique. En faite, plusieurs chercheurs se sont intéressés à la valorisation des sédiments pollués ou non dans le domaine du génie civil : fabrication de briques (*Weng et al*, 2003 ; *Lafhaj et al*, 2008), en granulats artificiels (*Achour*, 2013), en construction routière (*Maher et al*, 2006; *Kamali et al.*, 2008 ; *Zentar et al*, 2008 ; *Scordia et al*, 2008 ; *Dubois et al*, 2009) et en matériaux cimentaires (*Agostini et al*, 2007 ; *Wang*, 2009 ; *Limeira et al*, 2011).

La première étape de ce travail concerne la caractérisation, aussi complète que possible de ce matériau hétérogène et complexe afin de comprendre son comportement. Les sédiments de ports de Bethioua sont concernés par cette étude. La deuxième partie de ce projet concerne l'étude de faisabilité de la valorisation des sédiments du port de Bethioua dans le domaine de génie civil et plus spécifiquement la fabrication des briques. On cherche à comprendre les mécanismes mis en jeu lors de l'introduction de ces sédiments en substitution du sable et de l'argile utilisés dans la production des briques. L'étude menée dans le cadre de

cette thèse par le département d'hydraulique, le laboratoire de rhéologie, transport et traitement des fluides complexes (LRTTFC) et le laboratoire de mécanique des sols (MDS). Ce mémoire est divisé en six chapitres :

Le premier chapitre présente la problématique et l'origine de l'envasement des ports ainsi que les techniques de dragage et le transport des sédiments. Il est consacré essentiellement sur les notions générales de sédiments (origine et constitution des sédiments) et présente les risques causés par les opérations de dragage ainsi que les modalités de dragage.

Le deuxième chapitre concerne la description et l'étude bibliographique détaillée des protocoles expérimentaux de tous les essais réalisés. Cette étude a pour but de déterminer les caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, microscopique, environnementales et rhéologiques des sédiments. L'intérêt de chaque paramètre permis d'évaluer les performances de ces matériaux en relation avec le domaine de valorisation envisagé.

Le troisième chapitre cite les travaux antérieurs et les différents domaines de valorisation des sédiments marins. Ces travaux traitent la valorisation des sédiments de dragage dans le domaine de la fabrication des briques, en technique routier et dans les mortiers et dans la fabrication du ciment.

Le quatrième chapitre est consacré au processus de fabrication de brique et aux principales techniques de fabrication de briques. Les principaux matériaux utilisés pour la préparation des échantillons de brique ainsi que la présentation de la briqueterie et de port.

Le cinquième chapitre porte sur la présentation et l'interprétation des résultats des essais de caractérisation physique, chimique, minéralogique microscopique, environnementales et rhéologiques des sédiments du port de Bethioua et de l'argile de brique utilisé dans la fabrication des briques de Hassi ben okba. Cette reconnaissance est nécessaire pour comprendre le comportement physique et mécanique des sédiments et évaluer leurs taux de pollution.

Enfin, le sixième chapitre concerne l'étude de la faisabilité de l'incorporation des sédiments du port de Bethioua dans les briques. Plusieurs formulations avec différents taux de substitution d'argile par des sédiments sont comparées et évaluées à l'échelle industrielle et à la norme française. Une étude économique a été effectuée pour avoir le gain de la briqueterie de PROMAG sans et avec l'utilisant des sédiments marins du port de Bethioua.

Le travail se termine par des conclusions résumant les principaux résultats et des perspectives.

Chapitre I : Causes et origines de l'envasement des ports et dragage des sédiments

Introduction

Ce chapitre présente la problématique et l'origine de l'envasement des ports ainsi que les techniques de dragage et le transport des sédiments. Il est consacré essentiellement sur les notions générales de sédiments (Origine et constitution des sédiments) et présente les risques causés par les opérations de dragage ainsi que les modalités de dragage.

I.1 Causes et origines des sédiments marins

Un sédiment est un ensemble constitué par l'assemblage de particules plus ou moins grosses qui ont subi un certain transport ou de matières ayant précipité au fonds des cours d'eau et des océans. Les sédiments sont donc variés et leurs structures sont complexes et hétérogènes. On distingue dans les sédiments, la phase solide, la phase liquide, la faune et la flore.

- La phase solide est constituée de particules de tailles très variées. Elle est composée par des sables, des argiles, des oxydes, des sulfures, des phosphates ou des sulfates insolubles mais également par des substances organiques ainsi que des débris et des déchets de natures diverses.
- La phase liquide, ou l'eau interstitielle assure les échanges entre le sédiment et la colonne d'eau, c'est également un vecteur de transferts des polluants vers les aquifères.
- Le sédiment comporte également une faune et une flore qui vit au sein ou à la surface des sédiments. Ces organismes font intervenir des réactions d'échanges nutritionnelles et énergétiques entre le sédiment et la colonne d'eau (*Julie. L, 2004*).

I.2 Composition des sédiments marins

Les sédiments sont les dépôts meubles qui s'accumulent au fond des lacs, des cours d'eau et des océans (NGUYEN. T, 2008). On distingue deux origines aux sédiments.

- Origine endogène : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux.
- Origine exogène : il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micro-polluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques (DUBOIS. V, 2006).

Les sédiments marins sont constitués de phases minérale, organique et liquide .La composition minérale des sédiments diffère selon leur provenance (Schneider, 2001) :

- Les blocs, les cailloux, les graviers et les sables sont des sédiments terrigènes c'est-à-dire, issus de l'érosion des sols. leur nature chimique dépend principalement des terrains érodés. Les sables sont essentiellement quartzeux (Silice SiO_2) ou silicatés (mica, feldspath), souvent accompagnés de minéraux lourds (amphiboles, grenats, disthène...) qui dépendent de la nature des sols érodés. On trouve aussi des sables calcaires (ex : les sables de la Seine).
- Enfin, les particules les plus fines, limons, boues et vases, sont composées de minéraux argileux d'origine terrigène, et aussi des squelettes d'organismes d'origine endogène (Fig.I.1)

La nature de l'eau contenue dans les sédiments ou vases (appelée eau interstitielle) peut être répartie en quatre catégories afin de la différencier de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus.

- L'eau libre qui n'est pas liée aux fines
- L'eau capillaire, liée aux fines par des forces de capillarité
- L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes
- L'eau adsorbée qui est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles (SCORDIA. P, 2008).

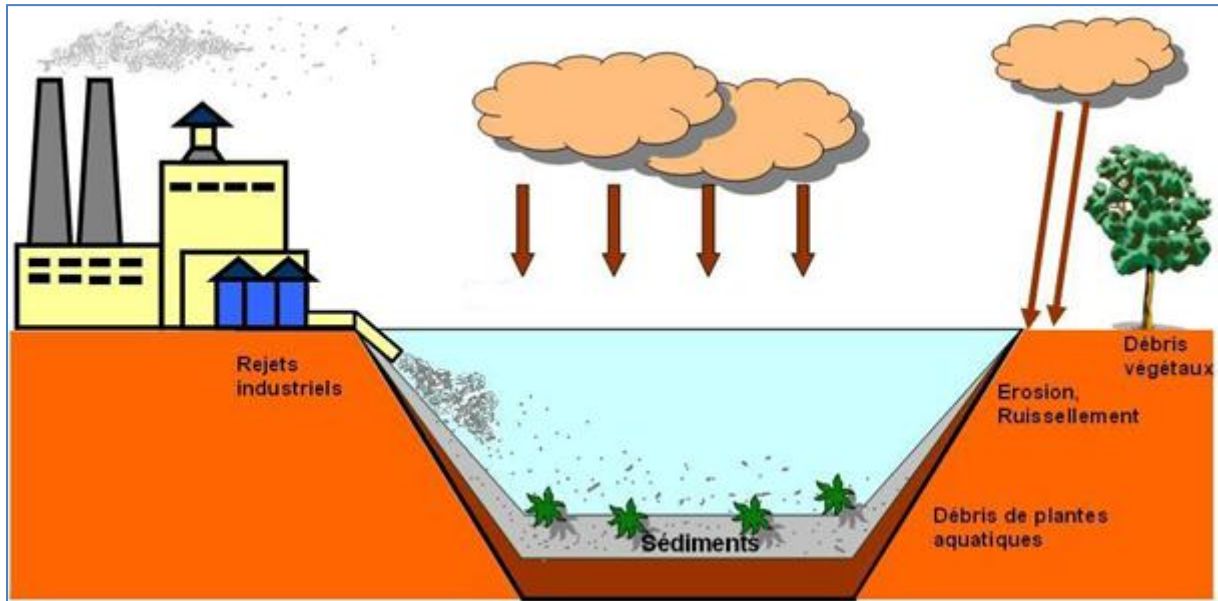


Figure I.1: Formation des sédiments (Source : SAMARA. M, 2007).

I.3 Gestion des sédiments marins

Les structures portuaires sont le plus souvent établies dans des zones où la profondeur d'eau est relativement faible, telles que les estuaires. Il est alors indispensable de réaliser des dragages pour permettre aux bateaux d'accéder aux quais. Ces dragages sont effectués au moment de la construction du port, mais également de façon périodique pour enlever les sédiments qui se sont accumulés dans les chenaux et les darses (dragages d'entretien).

En effet, il est reconnu que les immersions sont une voie de transfert des contaminants vers le milieu marin, il convient donc de prendre les dispositions limitant les impacts sur les écosystèmes (Mechaymech. A, 2002).

Le dragage est donc une activité vitale permettant l'entretien des bassins portuaires, des estuaires et des chenaux d'accès aux ports. Pour cela, il doit être répété de façon régulière afin de faciliter la navigation des bateaux et d'éviter qu'ils talonnent le fond de la mer. Néanmoins, la gestion des sédiments doit se faire de façon rationnelle et mesurée en intégrant les coûts économiques, sociaux et environnementaux liés à de telles pratiques (Marie loustaut. C, 2012).

Les critères d'évaluation se basent essentiellement sur des tests de lixiviation pour déterminer les seuils de contamination. En conséquence, pour éliminer ou neutraliser la pollution, il est apparu nécessaire d'explorer toutes les voies de valorisation des sédiments.

Elles sont relativement nombreuses mais peu ont débouché sur des applications réelles (Liang, Y, 2006).

I.4 Nécessité des opérations de dragage

Les facteurs qui poussent à envisager le curage d'un cours d'eau sont liés à des considérations hydrauliques, à l'entretien et à la restauration du milieu (Schneider, 2001).

Les principaux signes de dysfonctionnement sont :

- Des inondations dues à l'envasement et à l'encombrement du lit.
- La navigation gênée ou rendue impossible par l'envasement.
- L'envahissement du lit d'un cours d'eau par la végétation des berges.
- La prolifération d'algues et de plantes aquatiques.
- L'encombrement du lit par des dépôts divers (flottants, encombrants, vase affleurante...).
- La divagation du cours d'eau.
- L'effondrement des berges (Dubois, V, 2006).

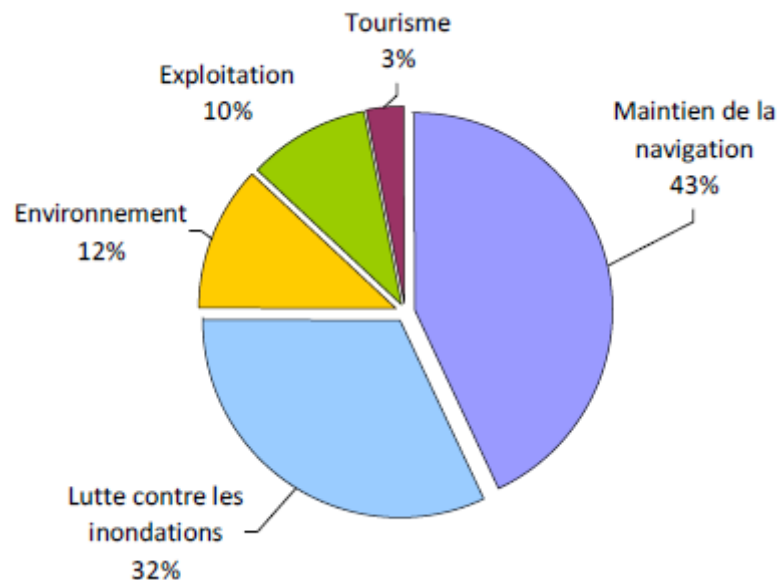


Figure I.2: Objectifs de dragage des sédiments en France (Source : Tributou. C, 2010).

Les principales raisons qui obligent à draguer les sédiments sont le maintien de la navigation (43 %) et la lutte contre les inondations (32 %). En effet, le dragage des voies navigables est une nécessité économique importante (Cf. fig I.2). L'augmentation des préoccupations environnementales, le développement durable et les problèmes de congestion

des réseaux routiers incitent les entreprises à trouver d'autres moyens d'acheminement des marchandises. Ainsi les opérations de dragage d'entretien permettent de rétablir un tirant d'eau minimum pour les voies navigables de façon à garantir le transport fluvial (*Tribout. C, 2010*).

I.5 Technique de dragage et de transport

I.5.1 Dragues mécaniques

La caractéristique commune des équipements excavateurs mécaniques est qu'ils sont dotés de godets ou de bennes, dont les dimensions et les formes varient. Les dragages mécaniques impliquent un contact physique direct entre ces godets ou bennes et les matériaux à draguer. Le plus souvent, les dragues mécaniques font appel à des chalands pour récupérer et transporter les matériaux dragués (Cf. fig I.3).

Les pertes de matériaux par remise en suspension ou par mauvaise fermeture de la benne sont notables dans le cas de dragage de sédiments fins non cohésifs. Le rendement de ces dragues s'améliore pour des sédiments cohésifs, les matériaux récoltés étant généralement assez compacts (formation de blocs) et peu chargés en eau.

Ces navires sont utilisés dans des zones difficiles d'accès (bordures de quais, bassins étroits) et peuvent travailler jusqu'à des profondeurs de 25 m (drague à godets) à 30 m (drague à benne).

Il existe différents types de dragues mécaniques :

- La drague à godets qui fonctionne comme un élévateur.
- La drague à pelles ou à cuillères qui est fondamentalement une pelle mécanique montée sur un ponton.
- La drague rétro caveuse et la drague excavatrice sur ponton à chargement frontal. Ces dragues sont de simples excavateurs qui peuvent être installés sur le pont renforcé d'un chaland ponté.
- La drague à benne preneuse qui fait descendre, fermer et remonter une benne ou un godet unique au moyen de câbles (*Foucher. J, 2005*).



Figure I.3: Dragage mécanique (Source : Tribout. C, 2010).

I.5.2 Dragues hydrauliques

Les dragues hydrauliques sont basées sur le principe de la pompe à eau centrifuge et opèrent par création d'un vide à l'entrée de la pompe. La pression atmosphérique dans l'eau oblige la mixture (mélange d'eau et de matières solides) à suivre la conduite d'aspiration, seule trajectoire disponible.

L'efficacité du dragage peut être accrue par l'adjonction d'un désagregateur (sorte de fraise ou de roue à pelle) au niveau du bec d'élinde. Ce désagregateur entraîne une augmentation des remises en suspension au fond lors des opérations de dragage. Son utilisation est indispensable dans le cas de matériaux cohésifs (Cf. fig I.4). Les matériaux de dragage sont soit refoulés de manière hydraulique au travers une conduite flottante vers le site de dépôt, soit déversés dans des chalands qui le transportent vers le site de dépôt. Parmi les dragues hydrauliques, on distingue les catégories suivantes :

- drague aspiratrice refouleuse stationnaire ou aspiratrice simple.
- drague aspiratrice à désagregateur.
- drague aspiratrice porteuse à élinde traînante ou plus communément nommée drague aspiratrice en marche.
- drague à balayage.
- drague coupeuse à disque.
- drague à vis sans fin (Foucher. J, 2005).



Figure I.4: Dragage hydraulique (Source : Tribout. C, 2010)

1. Dragage aspiratrice refouleuse stationnaire

Sous sa forme la plus simple, ce type de navire est une drague hydraulique généralement stationnaire, équipée d'un ponton et utilisée en premier lieu pour l'excavation et l'élimination de matériaux sans cohésion, et des sables peu compacts. Les engins les plus évolués peuvent également draguer le limon. Le principal avantage réside dans leur rendement (jusqu'à 7 000 m³/h) supérieur à toute drague de puissance comparable. Le principal inconvénient est l'irrégularité du fond qu'elle laisse après travail en raison de son mode opératoire. De plus, le dragage n'est pas d'une grande précision et ne permet pas de sélectionner différentes couches de sédiments. L'entraînement des sédiments nécessite le pompage d'une quantité importante d'eau (10 à 12 fois en volume, 8 fois environ en poids). La mixture peut être refoulée dans des chalands mais aussi par des conduites flottantes (Foucher. J, 2005).

2. Dragage aspiratrice à désagregateur

Ce type de drague aspiratrice est particulièrement répandu aux États-Unis et au Canada. Les dragues aspiratrices à désagregateur sont moins utilisées en Europe à des fins de dragage d'entretien en raison essentiellement des longues distances sur lesquelles les matériaux de dragage doivent être transportés. Elle est équipée, au point d'attaque, d'un désagregateur rotatif qui déstructure les matériaux à draguer, y mélange de l'eau, avant d'absorber la mixture obtenue dans la conduite aspiratrice. En général, le matériau est

transporté par conduite jusqu'au lieu de dépôt. L'adjonction du désagrégateur aux équipements d'aspiration a fait considérablement augmenter les possibilités de dragage de cette drague. Elle peut être aussi bien utilisée pour les travaux neufs que pour les dragages d'entretien, et pour une série de sols différents. Les dimensions des dragues aspiratrices à désagrégateur vont des petites unités standardisées ou démontables jusqu'aux grandes unités capables de travailler dans des zones exposées et par une profondeur maximale de 30 m. La précision du dragage est bonne (de 10 à 25 cm) d'autant plus que le matériel tend à être équipé d'un système de positionnement GPS. Le rendement est en général élevé et varie entre (50 et 5 000 m³/h) selon la drague et le matériau. Elles peuvent uniquement refouler à terre sur une distance limitée (entre 500 m et 2 000 m) suivant la puissance des pompes. La concentration massique du mélange varie de 10 à 40 % selon les caractéristiques des produits dragués (Foucher. J, 2005).

3. Drague aspiratrice en marche

La drague aspiratrice en marche est utilisée dans le monde entier à des fins de dragage d'entretien des entrées et des chenaux d'accès portuaires (Figure I.5).

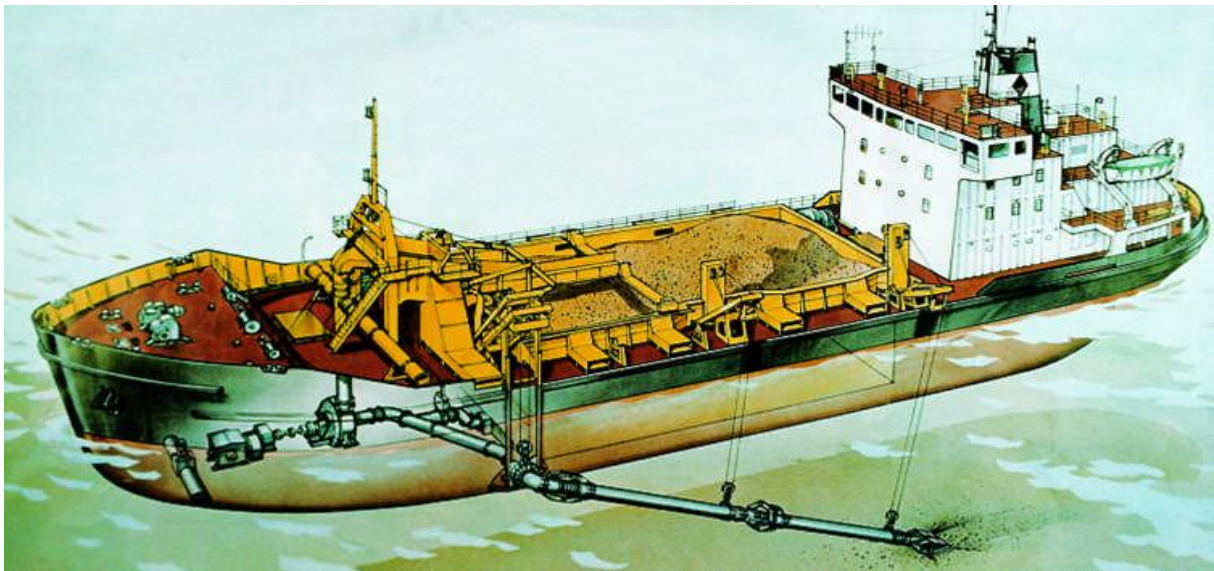


Figure I.5: Drague aspiratrice en marche (Source : Foucher. J, 2005).

C'est un engin automoteur et autoporteur. Le dragage se fait en marche à une vitesse réduite de 1 à 3 nœuds. Une dépression produite par une pompe centrifuge permet d'aspirer une mixture de matériaux solides et d'eau au moyen d'une élinde traînante prolongée par un

bec descendu sur le fond. La mixture est ensuite refoulée dans le puit à déblais de l'engin où elle décante jusqu'à un remplissage convenable. Pratiquement toutes les dragues aspiratrices en marche comportent des clapets de fond. Le principal inconvénient de l'utilisation de ce type de drague réside dans la nature cyclique intermittente de l'activité de dragage, dont une partie majeure du cycle consiste quelques fois dans le transport non productif des matériaux de dragage vers un site de dépôt éloigné. De plus, la position de l'élinde étant difficile à contrôler, il est malaisé d'atteindre précisément la cible et la profondeur de dragage souhaitée. La précision habituelle est autour de 50 cm à 1 m. Les rendements varient de 200 à 10 000 m³/h selon la taille de la drague, la nature du matériau dragué et le temps de trajet entre la zone de dragage et le site d'immersion. Ces dragues étant automotrices, elles gênent peu la navigation (Foucher. J, 2005).

4. Autres types de dragues hydrauliques

➤ Drague à balayage

Elle est basée sur le principe d'une drague aspiratrice stationnaire classique équipée d'une tête balayante similaire à une tête d'élinde de drague aspiratrice en marche. Sa visière mobile permet d'opérer dans deux directions opposées. La hauteur de coupe est adaptable de (20 à 60 cm). La drague à balayage est un puissant outil pour l'exécution des projets de dragage en milieu sensible. Cet équipement a passé le stade expérimental et son évolution se poursuit.

➤ Drague coupeuse à disque

Cette drague aspiratrice stationnaire est équipée en tête d'élinde d'un désagrégateur de forme cylindrique, à axe vertical et disposant d'un fond plat fermé. Le rendement de 500 m³/h est quelque peu réduit comparé à une drague traditionnelle, car l'objectif n'a pas été d'optimiser le rendement mais de réduire les effets néfastes sur l'environnement.

➤ Drague environnementale à vis sans fin

Elles ont été utilisées, depuis quelques années, principalement dans les projets de restauration des lacs. Ces dragues spécialement conçues pour le prélèvement de fines couches de sédiments contaminés, sont à la base des dragues stationnaires classiques équipées d'une vis sans fin qui coupe le matériau en couche d'une épaisseur allant de quelques centimètres à un mètre (Foucher. J, 2005).

I.5.3. Dragues pneumatiques

Le principe de fonctionnement de ces pompes à air comprimé est basé sur la différence de pression entre l'air dans les compartiments de réception des matériaux dragués et l'eau au-dessus de la pompe. Cet équipement est particulièrement adapté au dragage des sédiments contaminés. Les matériaux sont ensuite évacués par chaland ou par conduite flottante (Foucher. J, 2005).

I.5.4. Techniques de transport et de rejet

1. Dépôt à terre

Dans le cas de volumes limités, les dépôts à terre des sédiments à faible teneur en eau peuvent se faire directement à la benne. Les sédiments peuvent être placés dans des chambres de dépôt qui permettent leur consolidation et facilitent par exemple la réalisation de terre-pleins portuaires.

2. Rejet par émissaire ou par conduite

Les conduites métalliques ou plastiques sont utilisées pour le transport des matériaux de dragage en mélange aqueux. Ces conduites peuvent être flottantes, immergées ou déposées à terre. Le rejet par émissaire en mer se fait généralement à la suite d'un dragage par aspiration. Les sédiments sont alors refoulés par une conduite, soit en surface, soit au fond. Lorsque la puissance de la drague refouleuse n'est pas suffisante pour la totalité du transport, des relais de pompage peuvent être installés.

3. Clapage ou immersion

Les sédiments extraits soit par des moyens mécaniques, soit par aspiration, peuvent donner lieu à des opérations de clapage sur des zones d'immersion bien localisées.

I.6 Modalités du dragage

Les ports, qu'ils soient d'estuaire ou ouverts sur la mer, sont souvent constitués par un chenal d'accès, un avant-port ou un port à marée et/ou des bassins à flot. Les modalités du dragage diffèrent selon ces zones, par la nature des sédiments à draguer et par le type de

travaux à réaliser. Classiquement, on distingue trois types de dragage : entretien, approfondissement, aménagement de nouvelles aires portuaires.

I.6.1. Dragage d'entretien

Les opérations de dragage d'entretien concernent la majeure partie des travaux réalisés dans les ports. Ces opérations répétitives visent à extraire les sédiments qui se sont déposés et gênent la navigation. Elles sont quasi permanentes dans les estuaires et périodiques dans les ports ouverts sur la mer. Il faut distinguer les opérations d'entretien selon qu'elles sont réalisées dans :

- Les chenaux d'accès estuariens où la nature du fond varie en granulométrie de particules fines pour la Loire et la Gironde à un mélange de sable et de vase pour la Seine où la nature des matériaux est marquée par les apports telluriques pouvant être une source de contamination.
- Les chenaux d'accès des ports maritimes où la sédimentation est la plupart du temps à dominante sableuse et potentiellement non contaminée.
- Les bassins à flots où la sédimentation à dominante vaseuse est liée à la décantation des matières en suspension dans la colonne d'eau et où le fond marin est caractérisé par une contamination partielle par les activités humaines environnantes (carénage, industrie, ...).

Différentes méthodes de travail sont mises en œuvre pour optimiser les dragages. Dans les chenaux d'accès et près des quais l'extraction des dépôts excédentaires est réalisée par des dragues mécaniques ou aspiratrices en marche. En fonction de leur nature les déblais sont alors déposés à terre ou stockés dans des cuves ou des puits de drague et ensuite clapés en mer dans des zones délimitées et réservées à cet effet.

Dans les bassins portuaires les courants généralement faibles et l'agitation réduite favorisent la sédimentation vaseuse. Le taux de sédimentation étant connu la périodicité des dragages peut être prévisible et programmable. La concentration en contaminants de ces sédiments peut être élevée. Elle est représentative de l'activité historique de la zone confinée. Les techniques de dragage doivent tenir compte de ces conditions et être les moins polluantes

possibles pour l'environnement. Les navires utilisés pourront être les dragues à balayage, les dragues coupeuses à disque ou les dragues environnementales à vis sans fin.

I.6.2. Dragage d'approfondissement et aménagement de nouvelles aires portuaires

L'évolution de la taille des navires suppose une modernisation des ports et en particulier l'adaptation du seuil de navigation pour les chenaux d'accès et les bassins. Ces travaux nécessitent de déplacer d'importants volumes de sédiment et demandent des moyens de dragage importants. La nature de ces sédiments est d'autant plus marquée par les activités humaines historiques environnantes résultant en une contamination potentielle variable que le dragage s'effectue en profondeur dans le sous-sol (*Foucher. J, 2005*).

I.7 Risques créé par les opérations de dragage

En 1977 J. Clark caractérisait le dragage comme la menace la plus sérieuse pour les écosystèmes littoraux. Les opérations de dragage posent un problème environnemental car elles favorisent la dispersion des contaminants et donc la bio accumulation. En effet la solution la plus communément employée pour se débarrasser des sédiments dragués était le relargage en mer (Cf. fig. I.6) (*UNESCO, 2003*).



Figure I.6: Opérations de relargage en mer (*Source : Tribout. C, 2010*).

Selon Pinet (Pinet, 1999) cité dans un rapport de l'UNESCO (UNESCO, 2003), actuellement les sédiments dragués représentent de 80 à 90% (en volume) de tous les matériaux d'origine anthropique immergés dans les océans du globe. Plusieurs centaines de millions de mètre cubes de sédiments côtiers sont dragués et immergés chaque année dans le monde. La figure I.7 illustre différents modes de rejet en mer. La contamination se fait essentiellement par la dispersion des contaminants dans la colonne d'eau et par la mise en contact des matériaux pollués avec des organismes benthiques (UNESCO, 2003).

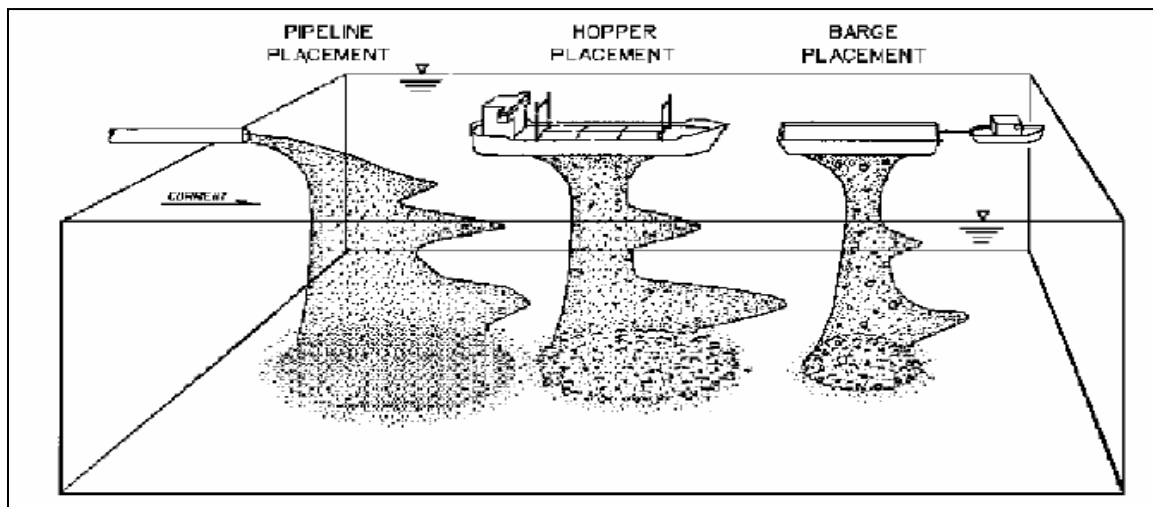


Figure I.1: Différents modes de rejet en mer (Source : UNESCO, 2003).

Conclusion

Le dragage régulier des cours d'eau est indispensable pour maintenir des activités normales maritimes et fluviales. Le stockage dans des installations confinées est une opération coûteuse qui exige des grands espaces et une surveillance à long terme et la mise en décharge n'est plus acceptée par l'opinion publique. Cependant les chercheurs ont commencé à étudier plusieurs alternatives pour incorporer des grandes quantités de sédiments dans les matériaux de construction où les sédiments bruts peuvent être valorisés (Samara. M, 2007).

Dans un contexte législatif de plus en plus sévère, la gestion des sédiments est complexe et au stade de la recherche, de nombreuses voies restent à explorer dans la dépollution des sédiments et dans la gestion des quantités importantes de matières. La complexité du matériau nécessite une caractérisation systématique des sédiments pour mieux

appréhender leurs comportements physico-chimique, environnemental et mécanique, pour trouver et obtenir une valorisation à moindre coût et avec des performances adéquates (*Scordia. P, 2008*).

Cependant il faut garder à l'esprit que le but des opérations de dragage n'est pas de commercialiser des matériaux mais d'assurer des seuils dans les ports et les chenaux pour le maintien de la navigation. Un contrôle des profondeurs draguées sera nécessaire afin que les opérations de dragage ne deviennent pas des opérations de commercialisation. La notion du développement durable s'applique à la gestion des matériaux de dragage portuaire de type sableux non contaminés. Dans les zones où le déficit sédimentaire est négatif, les déblais de dragage portuaire doivent être en priorité immergés ou utilisés pour le rechargement de plage (*Foucher. J, 2005*).

Chapitre II : Caractérisation physico-chimique, minéralogique et rhéologique des matériaux

Introduction

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur les caractéristiques physiques (Teneurs en eau, masse volumique absolue et apparente, distributions granulaires, limite d'Atterberg, Valeur au bleu de méthylène), chimique (Analyse chimique par fluorescence des rayons X, pH, conductivité, teneurs en matières organiques et analyse environnementale), minéralogiques (diffraction des rayons x et spectroscopie infrarouge), caractéristiques microscopiques (analyse par microscope électronique à balayage), caractéristiques rhéologiques (essai d'écoulement). Les méthodes et matériels de détermination de ces grandeurs sont décrits. La gestion globale des sédiments de dragage portuaire nécessite la connaissance de leur fiche d'identité avant leur valorisation. (Benyerou et al, 2015, Ben allal et al, 2011, Levachier et al, 2011). Cette fiche d'identité permettra de connaître l'impact de ces sédiments sur l'environnement et la proposition de méthodes de valorisation adéquates.

II.1 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques permettent de connaître le comportement et la classification des matériaux dans le but d'étudier ses propriétés mécaniques. Les principaux paramètres qui caractérisent les matériaux sont : le poids et le volume des trois phases (l'air, l'eau et les particules solides) (Cf. fig II.1) (Meskine. A, 2012).

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_T} \quad \text{Masse volumique sèche en } g/cm^3.$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad \text{Masse volumique des grains solides.}$$

$$\rho_h = \frac{M_T}{V_T} \quad \text{Masse volumique humide.}$$

$$\omega = \frac{M_s}{M_W} \quad \text{Teneur en eau en \%}.$$

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad \text{Indice des vides.}$$

$$n = \frac{V_V}{V_T} \quad \text{Porosité.}$$

$$S_r = \frac{V_W}{V_V} \times 100 \quad \text{Degré de saturation.}$$

- Relations de passage entre ces paramètres:

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\omega = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1-n)(1-\omega)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$S_r = \frac{\omega \times \gamma_s}{e \times \gamma_w} \quad \dots\dots\dots (6)$$

II.1.1 Teneur en eau initiale

La mesure de la teneur en eau est un paramètre important et l'un des paramètres fondamentaux. La teneur en eau définit l'état hydrique du matériau et elle est désignée par w et exprimée en % par le rapport de la masse sèche et de la masse humide du matériau. La relation entre ces deux paramètres est donnée dans la formule II.1. La mesure de la teneur en eau doit être évaluée par étuvage à 105°C jusqu'à masse constante en respectant un temps de séchage de 24h selon la norme NF P 94-050.

La valeur de la teneur en eau s'obtient alors grâce à la formule suivante. Il s'agit de l'équation citée par (Bel-hadj. I, 2013):

$$\omega = \frac{W - W_d}{W_d} \cdot 100 \quad \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec ω = teneur en eau (en %)

W = poids de l'échantillon humide

W_d = poids de l'échantillon sec

II.1.2 Masse volumique des particules solides

La mesure des masses volumiques est un paramètre important

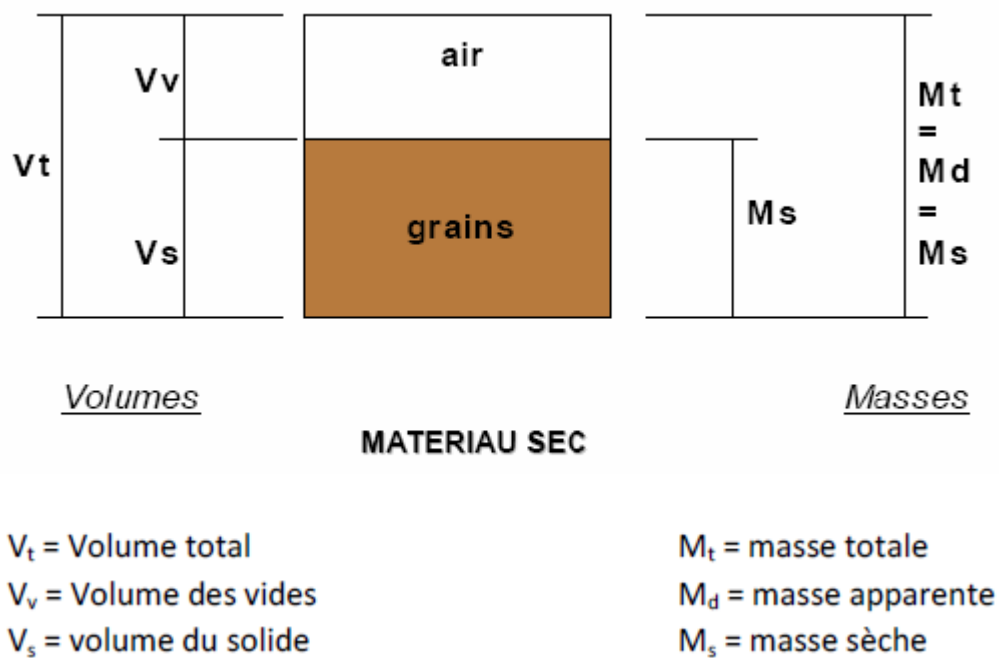


Figure II.1: Notation utilisée pour les masses volumiques (Source : Tran. N, 2009).

1. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un échantillon correspond à la masse volumique d'un mètre cube de matériau compris tous les vides. Elle peut se mesurer sur un matériau sec ou humide.

La valeur de la masse volumique apparente s'obtient alors sur un matériau sec sans aucun compactage grâce à la formule II.2. Il s'agit de l'équation citée par (Bel-hadj, I, 2013):

:

$$\rho_d = \frac{Md}{V_t} = \frac{Md}{V_s + V_v} \dots\dots\dots \text{II.2}$$

2. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un échantillon est déterminée selon la norme NF P94-054 et elle correspond au rapport de la masse du solide sur le volume de la matière solide compris les vides fermés contenus à l'intérieur des grains. Pour la mesurer on utilise un pycnomètre connaissant la masse et le volume du pycnomètre vide. Les pycnomètres les plus souvent utilisés sont le pycnomètre à liquide et à gaz. γ_s est calculé suivant la formule II.3. Il s'agit de l'équation citée par (Meskine, I, 2012):

$$\rho_r = \frac{Ms}{V_s + (V_{\text{porosité fermée}})}$$

$$\gamma_s = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 - m_3 + m_2} \dots\dots\dots \text{(II.3)}$$

m_1 : Poids du pycnomètre vide,

m_2 : Poids du pycnomètre + échantillon,

m_3 : Poids du pycnomètre + échantillon + eau,

m_4 : Poids du pycnomètre + eau.

II.1.3 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une caractéristique nécessaire pour la définition du matériau et pour caractériser la distribution de taille des particules d'un solide. Elle permet

d'identifier les différentes familles granulométriques (sable, limon, argile) afin de les associer à une texture. Les différentes classes granulométriques sont présentées dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Classes granulométriques des matériaux (*Source : Tran. N, 2009*).

Diamètre	Dénomination
> 20 mm	Cailloux
2 mm à 20 mm	Graviers
63 μm à 2 mm	Sables (grossiers et fins)
2 μm à 63 μm	Limons (ou silt)
< 2 μm	Argiles

1. Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol afin de le classer selon la norme XP P 94-041. On superpose les tamis par maille décroissante du haut vers le bas et l'on mesure le poids de sols retenus sur chaque tamis. Cette opération peut se réaliser à sec ou sous l'eau en vibrant l'ensemble de la colonne de tamis.

Le tamisage s'effectue pour les grains de diamètre supérieur à 80 μm et la sédimentométrie s'effectue pour les grains les plus fins. La courbe granulométrique est le résultat de cette analyse, elle représente le poids des tamisats cumulés à l'échelle arithmétique en fonction du diamètre des particules solides à l'échelle logarithmique. Dans le cas des sols argileux, le tamisage se fait sous l'eau pour faciliter la séparation entre les grains de différentes tailles. Les particules passant par le tamis le plus bas (80 μm) sont traitées par la sédimentométrie. Le principe est de mesurer au bout de certains intervalles de temps la densité de la solution à une profondeur donnée et on déduit le diamètre équivalent des plus gros grains présents à cette profondeur.

La sédimentométrie est basée sur la loi de Stokes qui permet de calculer la vitesse de chute d'un corps dans un fluide en fonction de la grosseur des grains du corps qui tombe, des

masses volumiques du fluide et du corps, de la viscosité dynamique du fluide et de l'accélération de la pesanteur (*Bel-hadj. I, 2013*).

2. Analyse granulométrique par laser

La granulométrie laser permet de déterminer la répartition granulaire des particules de diamètre inférieur à 80 μm , et pour certains échantillons par sédimentométrie selon la norme NF P 94-057.

Un granulomètre laser est l'outil le plus approprié et le plus rapide. Les particules en suspension des matériaux doit être introduit dans une cuve d'analyse grâce à une pompe de circulation. L'analyse se fait simultanément sur l'ensemble des particules circulant devant le faisceau laser. La distribution peut calculer soit en assimilant les particules à des sphères (distribution en volume) soit en considérant les particules plates (distribution surfacique).

Pour classer les matériaux fins dont la taille des particules est inférieure à 2 mm, les géotechniciens utilisent le diagramme triangulaire des sols fins de la figure II.2. Ce type de diagramme est particulièrement adapté aux sédiments. (*Bonnet, 2000*).

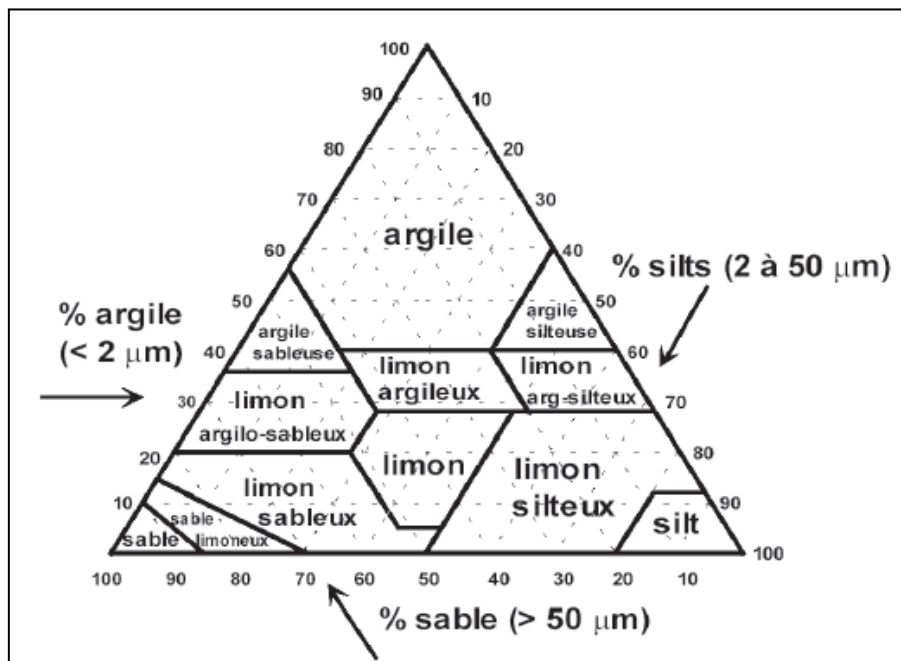


Figure II.2: Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins (*Source : Tran. N, 2009*).

II.1.4 Limites d'Atterberg

Limites d'Atterberg a pour but de déterminer les teneurs en eau de référence liées au changement d'état du matériau. Ce sont des constantes physiques conventionnelles qui indiquent les seuils entre le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique pour limite de liquidité (W_L) et le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide pour limite de plasticité (W_P). Ces limites s'expriment en pourcentage et permettent de classer les sols (*Bel-hadj. I, 2013*).

La consistance d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de la teneur en eau. Ceci est lié à l'importance des couches d'eau adsorbées autour des grains et plus généralement aux propriétés colloïdales des argiles et à leur proportion dans le sol considéré. Il existe trois états physiques (cf. figure II.3) :

- Quand la teneur en eau est élevée, les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir en place les particules de sol. C'est similaire à l'écoulement d'un fluide, c'est l'état liquide.
- Quand la teneur en eau diminue, le sol peut être modelé. Les particules sont rapprochées car l'eau adsorbée est mise en commun. Les grains sont reliés entre eux par des molécules d'eau. Le sol est alors à l'état plastique.

Quand la teneur en eau diminue encore, les grains deviennent très rapprochés et le sol ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue, c'est l'état solide. (*Meskine. A, 2012*).

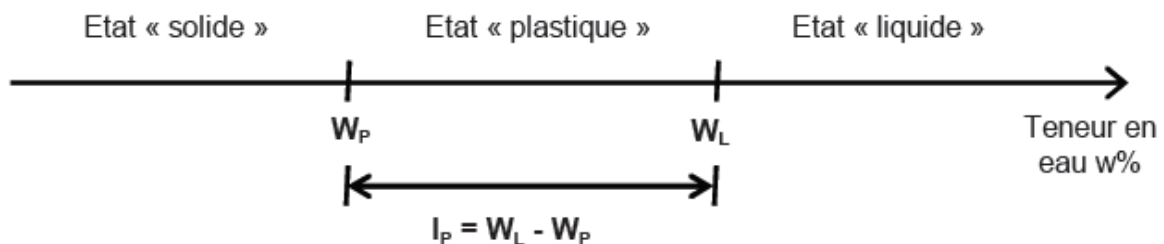


Figure II.3: Etat physique des sols.

La détermination des limites d'Atterberg effectue en deux phases :

- 1) Calcul de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande :

Limite de liquidité (W_L) c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique. Elle est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande selon la

norme [NF P 94 051]. L'essai consiste de mettre l'échantillon de façon bien homogène et à l'aide d'une rainure, il faut creuser dans le sol contenue dans la coupelle puis tourner la manivelle afin de provoquer le choc de celle-ci sur le bloc de bois dur. Par définition cet essai détermine la relation entre la teneur en eau et le nombre de chocs imposés à une coupelle, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs. La limite de liquidité est calculée suivant la formule II.4. Il s'agit de l'équation cité par (Meskine. I, 2012):

$$W_L = W \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \dots\dots\dots (II.4)$$

W_L : limite de liquidité.

W : teneur en eau du mortier au moment de l'essai.

N : nombre de coups correspondant à la fermeture du mortier sur 1 cm dans la coupelle.

2) Calcul de la limite de plasticité avec la méthode du rouleau :

Limite de plasticité est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état plastique et solide. Elle est déterminée par la méthode du rouleau selon la norme NF P 94 051. Pour déterminer la limite de plasticité, on fait une boulette de sol grosse comme une noisette (environ 12 mm de diamètre) et ensuite on fait un cylindre en le roulant sur la plaque plane par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde. L'essai consiste à définir la teneur en eau d'un rouleau de sol qui se fissure en 2 ou 3 morceaux au moment où son diamètre atteint 3.0 mm.

3) Indice de plasticité (I_p):

C'est le domaine situé entre les états de liquidité et de plasticité. Il est déterminé par la différence entre les deux limites de liquidité et de plasticité, noté I_p , exprimé en pourcentage et est donné par la formule suivante : $I_p = W_L - W_p$. Classification des sols selon l'indice de plasticité I_p selon (Tran. N, 2009) (Tableau II.2).

Tableau II.2: Degré de plasticité des sols (Source : Tran. N, 2009).

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Sol non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 30$	Sol peu plastique
$30 < I_p < 50$	Sol plastique
$I_p > 50$	Sol très plastique

Pour classifier les sols fins, il est d'usage de reporter les valeurs d' I_p et W_L sur un diagramme ayant I_p en ordonnée et W_L en abscisse. Ce diagramme est appelé diagramme de Casagrande (Cf. Figure II.4).

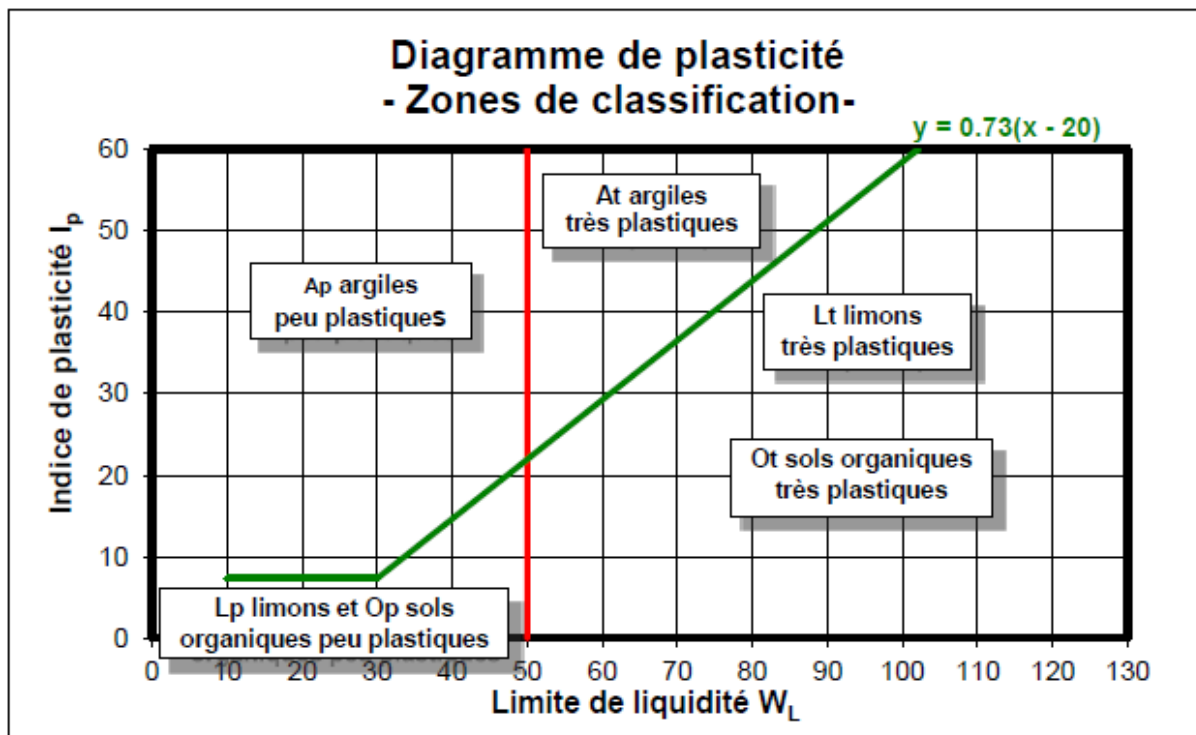


Figure II.4: Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Source : Tran. N, 2009).

4) Indice de consistance

$$I_c = \frac{W_L - W}{W_p}$$

Tel que W est la teneur en eau du sol à son état naturel qualifie la consistance du sol de « très molle » à « dure » comme indiqué dans le tableau II.3. La position de la teneur en eau in situ par rapport aux limites d'Atterberg permet de prévoir la consistance du sol.

Tableau II.3: Indice de consistance I_c des limons et des argiles (Source : Bel-hadj. I, 2013).

I_c	< 0,25	0,25 à 0,5	0,5 à 0,75	0,75 à 1	> 1
Consistance	Très molle	Molle	Ferme	Très ferme	dure

II.1.5 Equivalent de sable

L'équivalent de sable permet d'apprécier la qualité et la quantité des fines suivant la norme NF P 18-598. L'équivalent de sable mesure la propreté (E_s) de la fraction d'un sable inférieure à 2 mm sur un échantillon de 120g. On a tout d'abord introduit de la solution lavante dans l'éprouvette jusqu'au trait puis on ajoute 120g de sol sec. Après avoir attendu 10 minutes, on agite l'éprouvette horizontalement pendant 30 secondes, soit 90 allé/retour. Enfin après avoir lavé avec le tube laveur en rinçant le bouchon et lavant les parois intérieures de l'éprouvette. Laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube pour que les fines remontent en surface puis on laisse reposer 20 minutes en évitant toute vibration. Finalement on mesure à vue les hauteurs h_1 et h_2 . Pour effectuer la mesure de façon plus précise, on introduit le piston taré à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette et on l'immobilise au contact du sable pour mesurer $h' 2$. Après avoir faire cette analyse, le Tableau II.4 présente la classification des matériaux suivant l'équivalent de sable.

Tableau II.4: Classification des matériaux suivants l'équivalent de sable.

PS	Nature et qualité du sable
< 60	"Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq PS < 70$	"Sable légèrement argileux" de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS < 80$	"Sable propre" à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 80$	"Sable très propre" l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.2 Caractéristiques chimiques

La caractérisation chimique des sédiments marins est très importante avant leur valorisation. Cette caractérisation est essentielles pour dresser leur fiche d'identité, permettre de dévoiler leur composition chimique et surtout avoir une idée sur la présence de pollution. Cette analyse est essentiel pour connaitre si les sédiments marins sont pollué ou pas. Il s'agit notamment des paramètres chimiques tels que (Analyse chimique par fluorescence des rayons X, pH, conductivité, teneurs en matières organiques et hydrocarbures et l'analyse environnementale) (Pascal. G, 2004).

II.2.1 Analyse chimique par fluorescence des rayons X

La fluorescence X c'est une technique permettant l'analyse et la détection de différentes proportions des éléments chimiques présents dans un matériau et la détermination de leur quantité respective. Cette analyse permet de donner les répartitions totales, massiques ou atomiques des différents atomes et permettre éventuellement d'évaluer la composition chimique du sédiment.

L'analyse par fluorescence des rayons X des matériaux permet de quantifier en pourcentage massique les principaux composants chimiques élémentaires. A partir de cette

analyse on peut avoir les pourcentages en oxydes suivants (SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O et K_2O).

II.2.2 Analyse environnementale

Le développement des activités humaines est devenu aujourd'hui une menace pour l'environnement marin qui subit depuis plusieurs décennies des agressions majeures (*Albakjaji, 2011*). Les polluants présents dans l'environnement peuvent être d'origine anthropique : métaux lourds (Cu , Pb , Cr ...) issus des industries minières et métallurgiques, fabrication de peinture et de colorant, combustion du charbon.

- 1. Les éléments nutritifs :** Sont notamment le phosphore et des composés azotés comme l'ammoniaque. Ils proviennent des rejets d'eaux usées urbaines et d'effluents agricoles et industriels.
- 2. Les micropolluants organiques :** Sont les hydrocarbures polycycliques aromatiques, pesticides et solvants chlorés. Ces éléments sont souvent très toxiques, solubles ou adsorbés sur les matières en suspension.
- 3. Les métaux lourds :** Le but de cette analyse est de mesurer la concentration totale des éléments traces considérés comme polluants tels que le Pb , Zn , Co , Cd , Cr , Cu ...etc. Une fois ils dépassent un seuil de tolérance, les métaux sont considérés comme toxiques. Ils peuvent être fixés sur les particules minérales et les matières organiques des sédiments. Ils permettent de classer les sédiments bruts par rapport aux valeurs de référence GEODE et de justifier le traitement. Les principaux métaux lourds avec leurs sources sont classés dans le tableau II.5.

Tableau II.5: Principaux métaux lourds avec leurs sources de pollution (Source : Nougat.B, 2009).

métaux	sources
Cadmium	Engrais phosphatés ; industries de traitement de surface des métaux ; industrie de stabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs d'automobiles ; fabrication de caoutchouc ; colorants ; eaux de ruissellement des voies de circulation.
Cuivre	Canalisation d'eau ; fils électriques ; radiateurs d'automobiles ; appareils de chauffage ; traitement de surface.
Zinc	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; conduites d'eau ; peintures ; piles ; galvanisation ; traitement de surface
Nickel	Fabrication d'aciers et d'alliages spéciaux ; recouvrement de surface par électrolyse ; hydrogénation des huiles et substances organiques ; fabrication de peintures, de laque et de produits cosmétiques.
Mercure	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; production et utilisation d'antifongiques ; appareils électriques ; produits électrolytiques du chlore et de la soude ; peintures, pâte à papier ; fabrication de chlorure de vinyle et d'uréthane.
chrome	Tannerie ; fabrication d'alliages spéciaux ; industries de traitement de surface.
Plomb	Canalisations d'eau ; bacs de batteries ; peintures ; additifs pour l'essence ; eaux de ruissellement des voies de circulation, industries pharmaceutiques et sidérurgiques ; ateliers photographiques, télévisions.
Sélénium	Fabrication de peintures et colorants, verre, semi-conducteurs, insecticides, alliages.
Arsenic	Pesticides, herbicides, fongicides, insecticides, raticides, défoliants, conservateurs du bois ; cellules solaires ; semi-conducteurs ; électrophotographie ; catalyse ; pyrotechniques, céramiques, produits pharmaceutiques, épilage des peaux en tannerie et mégisserie ; durcissement du cuivre et du plomb, fabrication des batteries

II.2.3 Valeurs au bleu de méthylène (VBS)

Cet essai permet d'évaluer l'activité argileuse selon la norme NF P 94 068. Plus la quantité de bleu de méthylène adsorbée sera importante, plus l'activité argileuse sera importante.

Valeur au bleu de méthylène des sols est désignée par (VBS) et exprimée en %. Elle exprime la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée pour 100g de sol. Après avoir tamisé l'échantillon à 5 mm, L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation. On prélève périodiquement à l'aide d'une baguette de verre une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre qui doit être maintenu horizontalement et le diamètre de dépôt compris

entre 8 et 12 mm. Une tache formée se compose d'un dépôt central du matériau en observant le comportement de cette goutte de suspension déposée sur une feuille de papier filtre. L'excès de bleu clair persistant autour du dépôt central et montre une auréole bleutée apparaît autour de la tâche, on considère que l'absorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée. (Silitonga. E, 2010). Après avoir effectué cet essai Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif.
- La goutte centrale est entourée d'une zone humide teintée de bleu : le test est positif.

A partir du volume de bleu de méthylène absorbé et de la quantité de matériau utilisé, la valeur du bleu de méthylène « VBS » est définie par la formule II.5. Il s'agit de l'équation citée par (Bel-hadj. I, 2013).

$$VBS = \frac{\text{volume de bleu de méthylène (cm}^3\text{)} \times 0,01}{\text{masse sèche de la prise d'essai (g)}} \times 100 \dots\dots\dots (II.5)$$

Selon la norme française FN P 94-064, on distingue les valeurs suivantes:

$VBS \leq 0.2$	: Sols sableux (sol insensible à l'eau)
$0.2 < VBS \leq 2.5$	: Sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
$2.5 < VBS \leq 6$	: Sols limono-argileux, (sol de plasticité moyenne)
$6 < VBS \leq 8$	: Sols argileux
$VBS > 8$	: Sols très argileux

II.2.4 Potentiel hydrogène (pH)

Le pH est une donnée essentielle se fait le plus fréquemment dans une suspension aqueuse. Pour effectuer ce test il faut prendre une quantité de (10 g) d'échantillon dans un bêcher, puis on ajoute 25ml d'eau distillée, on agite ensuite avec un agitateur magnétique pendant 60 min dans une pièce dont la température ambiante est de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Cela permet de mettre en suspension la totalité de l'échantillon et d'obtenir ainsi un équilibre entre la phase solide et la phase liquide. La suspension est ensuite laissée au repos 2 heures à l'air libre puis

on mesure le pH de la suspension. Cette mesure est décrite par la norme NF X 31-103. (Kribi. S, 2005)

II.2.5 Conductivité

La conductivité électrique est une mesure qui donne une approximation de la concentration des sels solubles présents dans l'échantillon. Pour effectuer ce test il faut prendre une quantité de 10g d'échantillon de sédiment et la mettre dans un flacon en polyéthylène, puis on ajoute 50 ml d'eau distillée, on ferme le flacon et on le place dans un agitateur mécanique à mouvement horizontal pendant 30min. Après filtration, on mesure la conductivité de la solution obtenue. L'analyse est faite dans une enceinte où la température a été contrôlée et maintenue à $20 \pm 1^\circ$. Cette mesure est décrite par la norme NF X 31-113.

II.2.6 Matières organiques

La détermination de la matière organique est une méthode qui permet de donner le dosage de la matière organique dans les sédiments. Elle consiste à calciner l'échantillon à 450°C pendant 3h, la perte de masse observée est attribuée à la matière organique et représente donc le pourcentage massique de matière organique. Pour effectuer ce test il faut prendre une quantité de 0.25 g d'échantillon et le mettre dans une capsule en quartz, puis on le calcine à 450°C dans un four pendant 3h, ensuite on retire la capsule et on laisse refroidir. Le pourcentage de perte de masse engendrée par la calcination représente le pourcentage en matière organique. Cette mesure est décrite par la norme XP P 94-047 (Bel-hadj. I, 2013).

II.2.7 Détermination du taux de carbonates de calcium

Pour déterminer le taux de carbonates dans le sol, on utilise le calcimètre qui permet de mesurer le volume de CO_2 dégagé par l'action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO_3) d'un échantillon de sol ou de roche. Pour effectuer cet essai il faut Placer l'échantillon dans l'erlen meyer puis coller une boulette de pâte à modeler sous le petit tube. A l'aide d'une pipette, verser dans le tube de l'HCl assez concentré et a l'aide d'une grosse pince, mettre en place le tube dans l'erlen meyer. La hauteur de l'ampoule doit être de manière que l'eau salée soit au même niveau dans l'ampoule et le tube gradué. Le contenu de

l'ermen meyer sera alors à la pression atmosphérique et notant le niveau. La pression dans le tube gradué est alors supérieure à la pression atmosphérique donc il convient de rétablir la pression atmosphérique en descendant l'ampoule jusqu'à obtenir le même niveau dans l'ampoule et le tube.

Ainsi, la teneur en carbonate est déduite à partir du volume de dioxyde de carbone CO₂ selon la norme XP P 94-048. Il s'agit de l'équation II.6 (cité par. *Bel-hadj. I, 2013*):

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{1,2 \times V_b \times p}{m \times (\theta_b + 273)} \dots\dots\dots (II.6)$$

Tels que

V_b : le volume du gaz dégagé lors de l'essai exprimé en cm³ ;

p : la pression atmosphérique de la salle d'essai en kPa, p = 100 kPa ;

m : la masse de l'échantillon en g, m = 1 g ;

θ_b : la température de la salle en degrés Celsius, θ_b = 20°C.

II.3 Caractéristiques minéralogiques

La composition minéralogique est le complément nécessaire à l'analyse chimique. Elle permet d'identifier les minéraux primaires présents dans un échantillon. Une bonne connaissance de la composition minéralogique des matériaux est indispensable pour anticiper les difficultés qui pourraient apparaître dans le processus de valorisation des sédiments de dragage.

II.3.1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction des rayons X permet de préciser les phases minéralogiques présentes dans le matériau. Elle est utilisée pour identifier les espèces minérales d'une matrice solide. L'analyse par diffraction des rayons X est la technique la plus courante pour l'étude minéralogique en sédimentologie. (Figure II.5) (*Tran. N, 2009*).

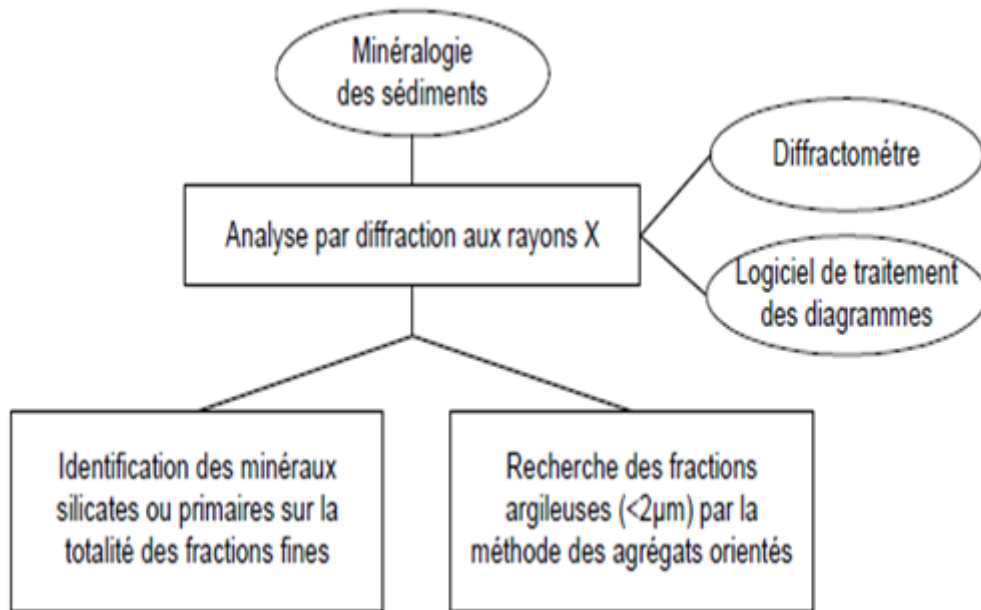


Figure II.5: Principe de l'étude minéralogique (Source : Tran. N, 2009).

Les minéraux cristallins possèdent une structure atomique régulière et périodique dans les trois dimensions. Chaque espèce cristalline donne un diagramme de diffraction caractéristique c'est-à-dire un ensemble de raies dont la disposition et l'intensité sont propres à sa structure. Cette méthode est utilisée pour détecter les structures cristallines présentes dans le produit analysé.

Un échantillon de poudre est constitué d'un grand nombre de petits cristaux orientés au hasard. Il se trouvera donc toujours une famille de plans recevant les rayons x sous un angle θ qui vérifie la relation de Bragg. Si les petits cristaux correspondant à cette famille sont assez nombreux et répartis au hasard, on obtiendra un cône de révolution particulièrement homogène que l'on caractérise par 2θ . Chaque espèce cristalline donne un diagramme de diffraction caractéristique, c'est-à-dire un ensemble de raies de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure.

$$n\lambda = 2d \sin(\theta)$$

Avec:

n : Ordre de la diffraction.

λ : Longueur d'onde.

d : Distance de deux plans réticulaire en Å°.

θ : Complément de l'angle d'incidence.

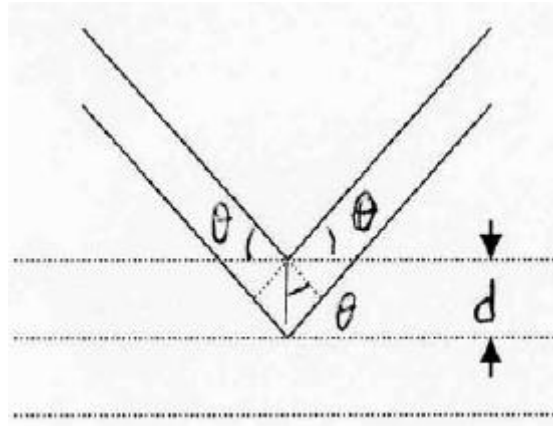


Figure II.6: Shéma de la diffraction des rayons X (Source : Semcha. A, 2006).

Cette relation montre qu'il suffit de mesurer les angles de Bragg (θ) pour déterminer les dimensions et la forme de la maille élémentaire du cristal (Figure. II.6). Les amplitudes des ondes réfléchies permettent de déterminer la structure atomique du motif et donc de connaître l'identité et la proportion des composants cristallisés de l'échantillon étudié.

II.3.2 Analyse par spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge est un moyen de diagnostic permettant de déterminer la nature des liaisons chimiques présentes dans une molécule. La spectroscopie IR est basée sur l'interaction de la lumière IR avec le nuage électronique des liaisons chimiques. Généralement dans la majorité des spectroscopies optiques comme la spectroscopie de fluorescence, l'absorption d'énergie permet à un électron d'une liaison chimique de passer d'un état fondamental à un état excité. Les allures des spectres d'IR confirment les informations fournies par la DRX (Khenifi. A, 2010).

II.4 Caractéristiques microscopiques

La caractérisation par microscope électronique permet de visualiser la microstructure des matériaux. La technique de la microscopie électronique à balayage donne des images spectaculaires proche d'une image en trois dimensions. Il est donc possible par cette méthode

de différencier les matières minérales des matières organiques. Le résultat donc est une représentation de la surface de l'objet observé.

- **Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)**

Le microscope électronique à balayage est un appareil voué à l'imagerie haute résolution. Le faisceau d'électrons est focalisé via un jeu de lentilles sur la surface de l'échantillon en un spot très fin. Un jeu de bobines permet de déplacer le faisceau de façon à balayer toute la surface de l'échantillon. Pour faire de l'imagerie électronique, l'échantillon est balayé ligne par ligne selon une matrice rectangulaire. L'interaction entre le faisceau d'électrons et la surface de l'échantillon produit trois types de signaux secondaires : des électrons secondaires, des électrons rétrodiffusés et des rayons X. La détection des deux types d'électrons permet de reconstituer simultanément des images électroniques différentes. La détection des électrons secondaires permettra d'obtenir des informations sur la topographie (relief) de l'échantillon.

II.5 Caractéristiques rhéologiques

La rhéologie est une science qui traite de l'écoulement, des déformations, et plus généralement de la viscosité des matériaux sous l'action de contraintes. La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elle soit liquides ou solides. La rhéologie a été utilisée pour caractériser les sédiments marins et fluviaux à travers le monde. (*Sépouv et al, 2010, Benamar et al, 2012*)

La rhéologie comporte trois axes d'études:

- La rhéologie expérimentale: détermination expérimentale des relations de comportement entre contraintes et déformations.
- La rhéologie structurale: explication du comportement rhéologique des matériaux à partir de leur structure.
- La rhéologie théorique: la modélisation mathématique du comportement des matériaux.

L'écoulement d'un fluide comme l'eau s'effectue instantanément sous l'effet de la pesanteur. Dans certains cas, il faudra attendre quelques heures, pour observer un début d'écoulement significatif. Cependant, malgré ces différences d'échelle de temps, ce sont les mêmes lois de comportement et les mêmes grandeurs qui régissent les écoulements.

- **Difficultés expérimentales**

Les études précédentes ont montré que la valeur du seuil de contrainte dépendait de la méthode de mesure et les précautions prises lors de la préparation des échantillons étudiés, en plus la rhéométrie en cisaillement des fluides à seuil se heurte à des difficultés expérimentales dues principalement aux effets perturbateurs tels que le glissement aux parois, la fracturation, l'évaporation et le creusement.

Le phénomène de glissement qui est le problème le plus fréquent qu'on peut rencontrer, il sera éliminé en utilisant des surfaces rugueuses striées par usinage ou en collant sur les surfaces de mesures de la toile émeri.

L'évaporation sera maîtrisée en utilisant une boîte en plexiglas qui nous a permis de travailler dans une atmosphère saturée en vapeur d'eau. Concernant les phénomènes de fracturation est du probablement à l'existence d'une inhomogénéité au sein de l'échantillon du matériau utilisé lors des essais. Le creusement apparaît au niveau de la surface libre du fluide qui se creuse de plus en plus, que certaines parties au niveau du contour ne sont plus cisailées. Ce phénomène se produit dans la plupart des cas de manière rapide au démarrage puis évolue lentement au cours de l'expérience. (*Belhadri, M, 1996*)

Conclusion

Les essais et les analyses décrits dans ce chapitre visent la définition des propriétés physiques, chimiques, minéralogiques, microscopiques et rhéologiques.

La caractérisation physique permet de connaître le comportement et la classification des matériaux dans le but d'étudier ses propriétés mécaniques. La caractérisation chimique est essentielle pour dresser la fiche d'identité des matériaux et permettre de dévoiler leur composition chimique et surtout avoir une idée sur la présence de pollution.

La composition minéralogique est le complément nécessaire à l'analyse chimique. Elle permet d'identifier les minéraux primaires présents dans un échantillon. Une bonne connaissance de la composition minéralogique des matériaux est indispensable pour anticiper les difficultés qui pourraient apparaître dans le processus de valorisation des sédiments de dragage.

La caractérisation par microscope électronique permet de visualiser la microstructure des matériaux. Il est donc possible par cette méthode de différencier les matières minérales des matières organiques. Le résultat donc est une représentation de la surface de l'objet observé.

La caractérisation rhéologique permet d'expliquer le comportement rhéologique des matériaux à partir de leur structure et donner l'équation rhéologique d'un fluide par la mesure des paramètres rhéologique.

Cette étude de caractérisation doit être aussi complète que possible afin de dresser une fiche d'identité des sédiments pour déterminer le rôle à leur donner en tant que matière première ou secondaire.

Chapitre III : Travaux antérieurs dans le domaine de la valorisation des sédiments marins

Introduction

Dans le monde entier, le dragage des ports, canaux, chenaux et autres lacs naturels et artificiels revêt une importance primordiale pour la vie des affaires autant que les activités de loisirs.

Le plus grand problème que pose le dragage est sans doute le sort à réserver aux produits dragués. Les multiples études réalisées un peu partout dans le monde ont démontré que la majeure partie de ces produits ne présente pas une dangerosité pour l'environnement. Parmi beaucoup d'autres produits, les matériaux dragués peuvent être utilisés pour les rechargements des plages, la protection des côtes, la constitution de terre végétale à usage agricole et l'amélioration de l'environnement. (*Mechaymech, 2002*).

Ces produits constituent donc une ressource précieuse et ne devraient pas être considérés en tant que simples dépôts. Plusieurs centaines de millions de mètres cubes de produits sont dragués chaque année dans le monde. La réutilisation de ces sédiments s'est avérée indispensable. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la valorisation des sédiments pollués ou non dans le domaine du génie civil (fabrication de briques) (*Yang et al, 2014, Weng et al, 2003, Benyerou et al, 2016, Frar. I, 2014*), en granulats artificiels (*Brakni et al, 2009*), en construction routière (*Dubois et al, 2009*) et en matériaux cimentaires (*Agostini et al, 2007, Kazi et al, 2011*).

Le présent chapitre s'attache à décrire divers modes de valorisation possibles de ce matériau ainsi qu'une procédure générale d'évaluation susceptible d'éclairer le choix du mode de valorisation le plus adéquat.

Les différents articles et thèse que nous avons pu étudier :

III.1 Valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques

III.1.1 Hamer et Karius. Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment. Journal of Waste Management. (Production de briques avec sédiments de dragage. Une expérience à l'échelle industrielle).

1. Matériels et méthodes

Les sédiments portuaires provenant du bassin du port de Brême ont été utilisés comme une matière première appropriée pour la production de briques. Les auteurs ont fait une expérience à une pleine échelle dans une briqueterie industrielle. Dans le processus de production de briques près de 10% des briques représentant la casse et celles comportant des défauts sont broyées, tamisées et mélangées avec les sédiments du port et les argiles. Un mélange constitué de 50% de sédiments portuaires, 10% des briques concassées et 40% des deux argiles a été utilisé à l'échelle industrielle. (Tableau III.1).

Tableau III.1: Composition chimique des mélanges des matières premières utilisées.

Wt. %	Harbour sediment ^a 50%	Clay 1 ^b 27%	Clay 2 ^b 13%	Crushed bricks 10%
SiO ₂	63	67	70	66
Al ₂ O ₃	11	22	19	16
Fe ₂ O ₃	8.3	6.1	6.4	7.7
TiO ₂	nv ^c	1.3	1.0	0.64
CaO	1.8	0.19	0.44	1.2
MgO	0.9	0.40	0.80	0.84
Na ₂ O	1.9	0.20	0.18	1.0
K ₂ O	1.6	2.5	2.0	1.6
S	0.3	nd ^d	nv ^c	nv ^c
MnO	nv ^c	0.01	nv ^c	nv ^c
LOI	10	6.3	5.5	nd ^d

La distribution granulométrique a montré que le matériau est un sol argileux limoneux légèrement sableux. L'analyse par diffraction des rayons X a montré que les sédiments du port indiquent une présence de minéraux argileux (28%), soit (2.6% smectite, 4.3% chlorite, 17% illite et 3.5% kaolinite), 42% de quartz, soit (8.6% de feldspath, 2.7% de calcite, 4.9% de l'hématite et de 14% composants amorphes). Selon les valeurs des paramètres de pollution présents dans les sédiments du port de Brême et les limites de recommandation de recyclage des matériaux, on distingue que ces sédiments peuvent être utilisés comme matière première pour la production de briques (Tableau III.2).

Tableau III.2: Les polluants présents dans les sédiments et limites de recommandation en (mg/kg matière sèche).

Parameter	Recommended limit (LAGA, 1996)	Dredged harbour sediment
EOX	15	0.33
Hydrocarbons	1000	340
Sum BTEX	5	< 0.01
Sum LHKW	5	< 0.015
Sum PAH acc. EPA	20	3
Sum PCB congenere (DIN 51527)	1	0.22
As	150	15
Pb	1000	122
Cd	10	6
Cr (ges.)	600	131
Cu	600	87
Ni	600	60
Hg	10	0.3
Tl	10	0.6
Zn	1500	790
Cyanide	100	nv ^a

2. Discussion des résultats et conclusion

Les auteurs ont conclu que la fabrication des briques à l'échelle industrielle avec l'ajout d'une grande quantité de sédiments portuaires a un avenir prometteur et que ces sédiments n'ont pas d'impact sur l'environnement.

III.1.2 Samara, Lafhaj, Chapiseau. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment. Journal of Hazardous Materials. (Valorisation des sédiments fluviaux stabilisés dans des briques d'argile cuite: Essai à l'échelle industrielle)

1. Matériel et méthodes

La présente étude porte sur la valorisation des sédiments fluviaux pollués, après traitement avec le procédé Novosol dans la brique cuite. Les sédiments bruts ont été prélevés à partir du canal de La Marque au bord d'une ancienne usine métallurgique en France. Cette zone de prélèvement est restée une zone industrielle encore très active ce qui explique les fortes teneurs en métaux lourds dans ces sédiments.

Le procédé Novosol a été développé par la société Solvay pour le traitement des sols pollués, des résidus de broyage automobile et des sédiments de dragage. Ce procédé comporte trois étapes : le traitement chimique à l'acide phosphorique (phosphatation), le séchage convectif à l'air et la calcination des sédiments en conditions oxydantes (Fig.III.1).

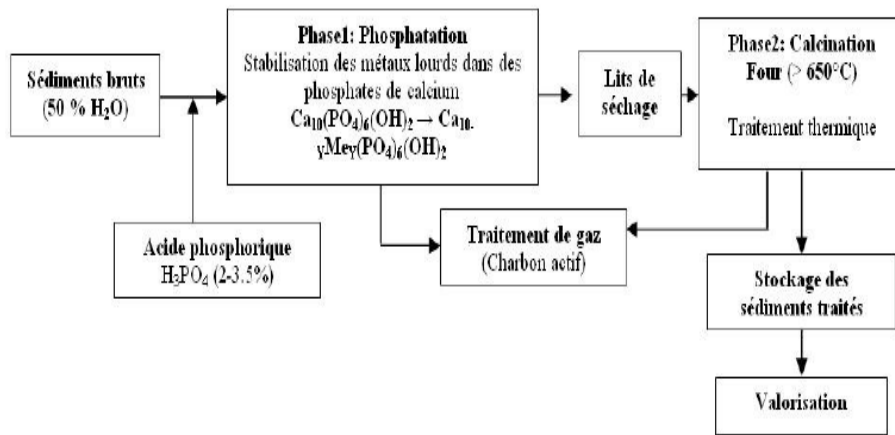


Figure III.1: Le procédé Novosol.

• Préparation des échantillons

L'objectif des auteurs était de caractériser le comportement des briques produites à base de sédiment fluvial traité en fonction du taux de substitution. Pour cela, quatre mélanges ont été préparés. Les compositions à base de masse sèche, sont données dans le (Tableau III.3) ainsi que leurs codes d'identification. Ils ont fixé la quantité de sable à 20 % pour tous les mélanges, tandis que la proportion des sédiments fluviaux change de 0 à 45 %. Après séchage à 60°C, l'argile a été broyée afin de pouvoir la mélanger avec les sédiments et le sable (Fig III.2).

Tableau III.3: Les quatre mélanges adaptés pour la préparation des échantillons de brique (% de la matière sèche).

Mélange	Sable	Sédiments traités	Argile
F ₀	20%	0%	80%
F ₂₅	20%	25%	55%
F ₃₅	20%	35%	45%
F ₄₅	20%	45%	35%



Figure III.2: Préparation en laboratoire des échantillons de brique.

2. Résultats et interprétations

Les valeurs moyennes de la résistance à la compression sont données sur la (Figure III.3)

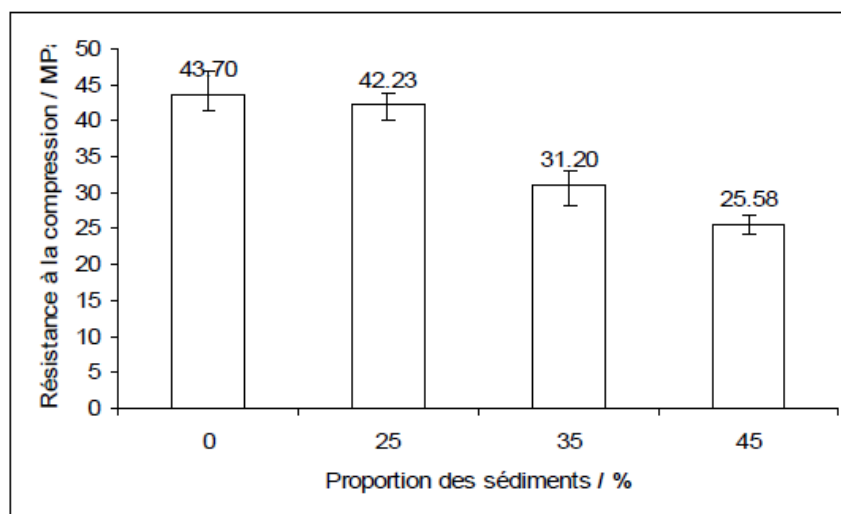


Figure III.3: Effet de la proportion des sédiments sur la résistance à la compression.

On peut noter que la résistance mécanique est influencée par la quantité de sédiment incorporée dans la brique. L'augmentation de la proportion des sédiments a pour conséquence une diminution de la résistance mécanique liée à la porosité et une détérioration des propriétés plastiques de la pâte ce qui la rend moins cohésive et plus poreuse. La granulométrie a une tendance à être plus grossière avec l'ajout de sédiments, ce qui influence le frittage et rend la brique plus poreuse, moins dense et par conséquent moins résistante.

3. Conclusion

Les auteurs ont conclu que l'étude expérimentale réalisée au laboratoire a consisté à évaluer la faisabilité pratique de la mise en œuvre et à étudier le comportement des sédiments traités dans la brique cuite et d'en évaluer un optimum de substitution. L'indice de plasticité est inversement proportionnel à la quantité des sédiments introduite dans le mélange. L'ajout de 25% de sédiments calcinés diminue la plasticité du mélange de 7.3% par rapport au mélange standard de l'usine de Templeuve, alors que l'ajout de 35% et 45% de sédiments fait baisser l'indice de plasticité de 33 % et 42 % respectivement. Ainsi que l'ajout des sédiments traités affaiblit les propriétés plastiques du mélange et diminue ainsi sa cohésion.

III.1.3 Andrea, Nortey, Susan, Lawrence, Kimberly. Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick. Journal of Environmental Management. (Utilisation des sédiments fluviaux de Savannah comme matière première dans la production de briques cuites)

1. Matériel et méthodes

Une étude en laboratoire a été réalisée pour évaluer la faisabilité de la production de briques avec les sédiments dragués du port de Savannah. Les auteurs ont étudiés deux formulations, la première avec 100% de sédiments de dragage comme matière première et la deuxième été de faire un remplacement de 50% d'argile utilisée pour la fabrication de briques par les sédiments.

Des échantillons de briques ont été formés en utilisant l'extrusion de boue rigide (Figure III.4). D'autres additifs ont été ajoutés tels que l'huile de soja pour améliorer le mélange et BaCO_3 pour empêcher la formation d'écume ont été ajoutés aux mélanges bruts. Les mélanges ont été broyés et passés à travers un tamis de 2 mm, mélangés avec de l'eau et d'autres additifs et traités en laboratoire pour produire un mélange homogène. L'humidité des formulations extrudées varie de 30 à 47% en poids et l'humidité des briques de référence était de l'ordre de 25%. Les colonnes de briques humides extrudées ont été découpées en petits blocs de briques de forme cubique de 5,4 cm et traités thermiquement.

Les échantillons ont été séchés dans un four à température de 25 ° C à 110 ° C jusqu'à ce qu'aucun changement de masse n'ait été observé. Ensuite les éprouvettes ont été cuites à différentes températures de 900 ° C à 1000 ° C dans un four électrique.



Figure III.4: Production de briques à l'échelle de laboratoire: a) mélange des matières premières, b) extrusion d'une colonne de briques, c) brique séchée, d) briques cuites.

2. Interprétations des résultats et conclusion

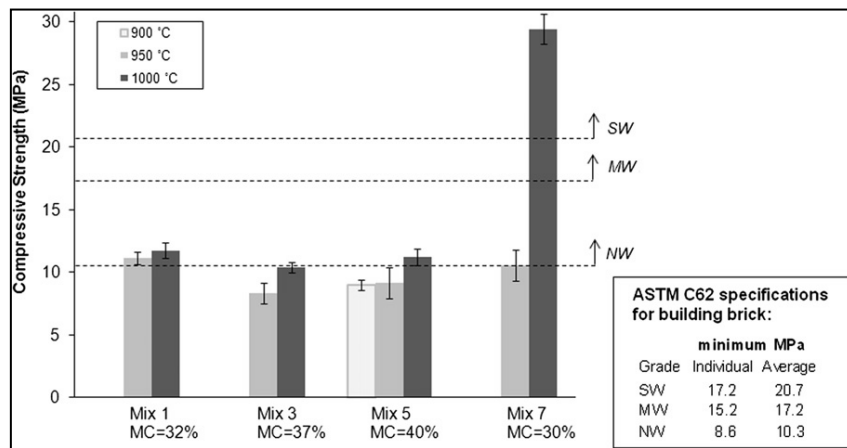


Figure III.5: Résistance à la compression pour des briques à base de 100% de sédiment dans les mélanges (1, 3, 5) et des briques à base de 50% de sédiments dont le mélange 7.

Les auteurs ont conclu que les propriétés physiques et mécaniques des briques à base de sédiments de dragage sont conformes aux critères ASTM pour la fabrication de briques.

La résistance à la compression des briques à base de 100% de sédiments donne des valeurs varie de 8,3 à 11,7 MPa pour une température de cuisson de 1000°C. Les brique à base de 50% de sédiments atteindre une augmentation de la résistance à la compression avec une valeur de 29,4 MPa avec la même température de cuisson (Cf. fig III.5).

Les sédiments du port de Savannah peuvent être une ressource précieuse des matières premières dans la production de brique même si les sédiments de dragage utilisé comme matière première à 100%. La valorisation des sédiments améliore la durabilité et aura un impact positif sur l'environnement en empêchant l'épuisement des ressources naturelles en argile.

III.2 Valorisation des sédiments marins en techniques routières

III.2.1 Abriak, Damido, Zentar, Wang. Characterization of Dredged Marine Sediments for Road Construction. Proceeding de conférence. (Caractérisation des sédiments marins dragués pour la construction de routes)

1. Matériel et méthodes

Un programme de test a été effectué par les auteurs sur les sédiments marins dragués prélevés du port à l'est de Dunkerque France en Juin 2008.

Premièrement, un grand nombre de caractéristiques physiques sont mesurés et examiné pour une meilleure identification du sédiment étudié. La teneur en eau initiale, la densité, la teneur en matière organique ont été mesurées ainsi que la distribution granulométrique, la limite de liquidité et la limite de plasticité. Enfin la valorisation des sédiments marins dans la construction de routes a été examinée sur la base des propriétés physiques des sédiments.

2. Résultats et interprétations

Les caractéristiques physiques sont rapportées dans le (Tableau III.4). La teneur en eau initiale est d'environ de 106% en utilisant la méthode de l'étuve à 40°C et à 105°C. La teneur en matières organiques est mesurée dans un four à 450 °C et à 550 °C selon la norme française XP P94-047 (1998) et NF EN 12879 (2000). La technique laser a été utilisée pour déterminer la répartition granulométrique. Les sédiments sont composé de fraction limoneuse de l'ordre de (57.5%), de fraction d'argile et de fraction sableuse respectivement de l'ordre de 14.6% et 27.9%.

Tableau III.4: Caractéristiques physiques des sédiments marins.

Parameters		Values
Initial water content (%)	40°C	106.5
	105°C	106.8
Specific density (kg/m ³)		2580
Methylene blue value (VBS)		2.2
Organic content (%)	450°C	4.4
	550°C	7.6
Particle size distribution (%)	Grain size < 2µm	14.6
	2µm < Grain size < 63µm	57.5
	Grain size > 63µm	27.9
Liquid limit (%)		53.8
Plastic limit (%)		23.1
Liquidity index (%)		30.7

A partir des résultats expérimentaux les auteurs ont constaté que la teneur en matières organiques mesurée est de l'ordre de 4.41% à 450°C et de 7.59% à 550°C (Figure III.6). Les pertes de masse par calcination à 350°C, 750°C et 900°C ont également été mesurées pour explorer la stabilité thermique des sédiments de dragage. On distingue que la perte de masse est généralement due à la perte d'eau liée et à la perte de matière organique lorsque la température est inférieure à 600°C. Lorsque la température dépasse 600°C, la décomposition du carbonate de calcium pourrait également contribuer à la perte de masse.

Pour étudier l'influence de la matière organique et de la décomposition de minéraux, les masses volumiques des échantillons calcinés à 350°C, 450°C, 550°C, 750°C et 900°C ont été mesurées pendant 3 heures. Selon la figure III.7, les auteurs peuvent constater que la perte de masse est due à l'augmentation de la température.

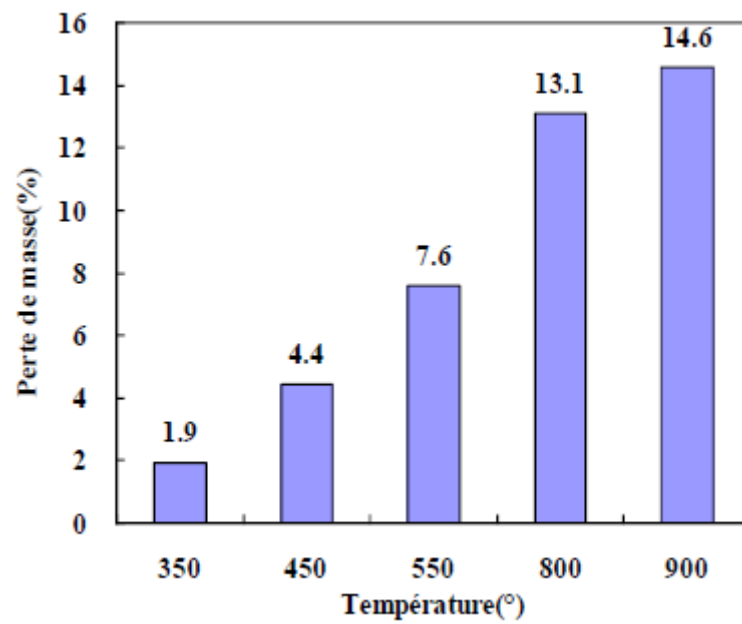


Figure III.6: Evolution de la perte de masse en fonction de la température.

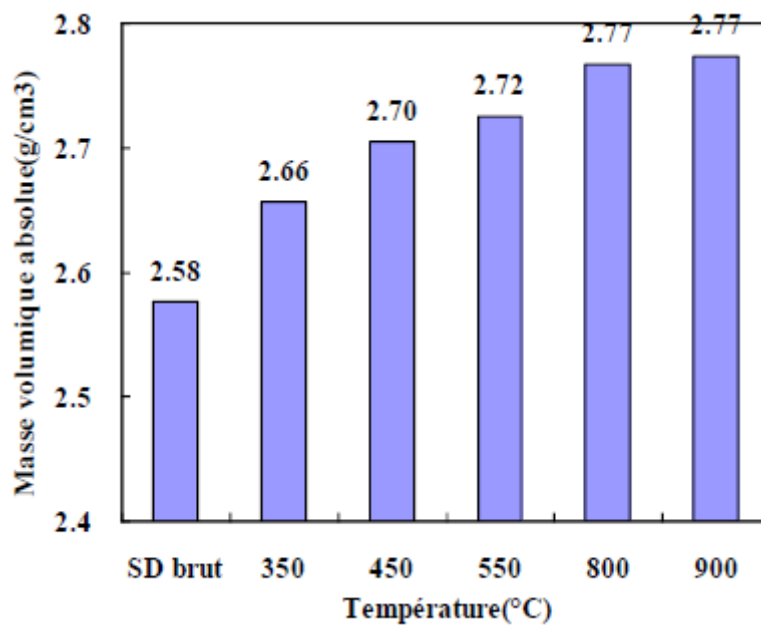


Figure III.7: Evolution de la densité absolue en fonction de la température.

3. Conclusion

Avant d'appliquer les matériaux de dragage à la construction, les auteurs ont fait une étude approfondie sur les propriétés physiques qui a été mis en œuvre pour vérifier la faisabilité d'un matériau cible. Dans cette étude, la teneur en eau initiale, la densité absolue,

la teneur en matière organique à des températures différentes, les limites d'Atterberg et la distribution granulométrique ont été effectués.

Après une identification et évaluation des sédiments naturels, les auteurs ont trouvé que le potentiel en tant que matière première dans la construction routière pourrait être principalement défini. Les sédiments traités pourraient être utilisés principalement en tant qu'un matériau de couche de base. En général, les deux types d'additifs ajoutés sont des matériaux comme le sable et des liants hydrauliques comme (Ciment et chaux). L'ajout de ces matériaux pourrait être choisi pour améliorer les propriétés des sédiments bruts afin d'utiliser ces sédiments dans génie routier (*Zentar et al, 2008; Dubois, 2006*)

III.2.2 Dubois, Abriak, Zentar, Ballivy. The use of marine sediments as a pavement base material. Journal of Waste Management. (L'utilisation de sédiments marins comme matériau de base pour les chaussées).

1. Matériel et méthodes

Les sédiments marins utilisés dans cette étude ont été dragués à partir du Port de Dunkerque en nord de la France. Ce port est bien connu pour ses activités industrielles à forte intensité par exemple (Du pétrole, du gaz, et de l'acier). Des études antérieures ont montré, selon la législation française que le niveau de pollution dans la zone de prélèvement est faible et que les déblais de dragage sont composés principalement de limon.

Les principales caractéristiques physiques mesurées dans les sédiments dragués sont présentés dans le (Tableau III.5). La distribution granulométrique a été effectuée à l'aide d'un granulomètre laser. Les résultats montrent que les sédiments sont composés principalement de limon, la proportion de sable fin est d'environ de 37% et la proportion de l'argile est environ de 5%.

La préparation des échantillons consiste de préparer deux types de mélange, le premier mélange est composé de 33% de sédiment de dragage, 61.3% de sable de dragage, 5.7% de ciment et une quantité de chaux est ajoutée. Le deuxième mélange est basé sur les mêmes proportions des sédiments de dragage, le sable de dragage et le ciment. L'essai de Proctor (CBR) est utilisé pour mesurer le palier et la capacité d'un matériau compacté. Ce test consiste à appliquer une charge statique à un piston et à suivre la pénétration de ce piston dans un matériau.

Tableau III.5: Caractéristiques physiques des sédiments.

Parameters	Value
Water content (%)	156
Grain sizes	
(%) < 2 μm (clay)	5.4
2 μm < % < 63 μm (silt)	57.8
63 μm < (%) (sand)	36.8
ρ_s (kg/m ³)	2530
Methylene blue	3.1
w_L (%)	97.4
w_P (%)	45.0
IP (%)	52.4

2. Résultats et interprétations

Le pH mesuré atteint une valeur maximale pour une addition de chaux d'environ de 3% de la masse sèche de sédiments. Afin d'assurer des effets bénéfiques de chaux dans le terme d'amélioration de la résistance mécanique, la chaux a été fixée à environ de 2% de la masse sèche. Cette quantité de chaux associé avec le ciment et utilisé pour les sols fins sur les sites de construction. Le (Tableau III.6) montre que la teneur en eau optimale et la densité sèche optimale est similaire pour les deux mélanges. Par ailleurs, les résultats obtenus démontrent l'efficacité de la chaux dans les mélanges.

Tableau III.6: La densité sèche, la teneur en eau et l'indice CBR pour le plus haut niveau de compactage.

Mix	1	2
ρ_d (kg/m ³)	1960	1960
Water content (%)	11.5	11.6
CBR index	82	50

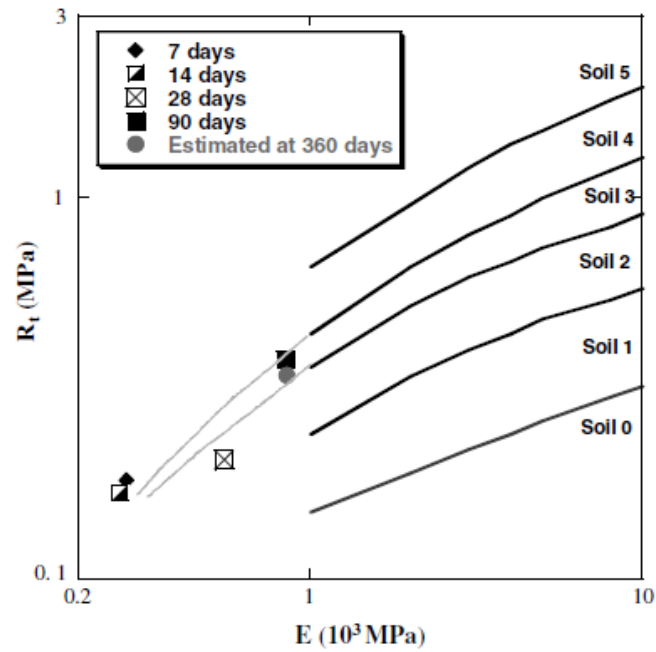


Figure III.8: Evolution du comportement mécanique du mélange 1 avec le temps.

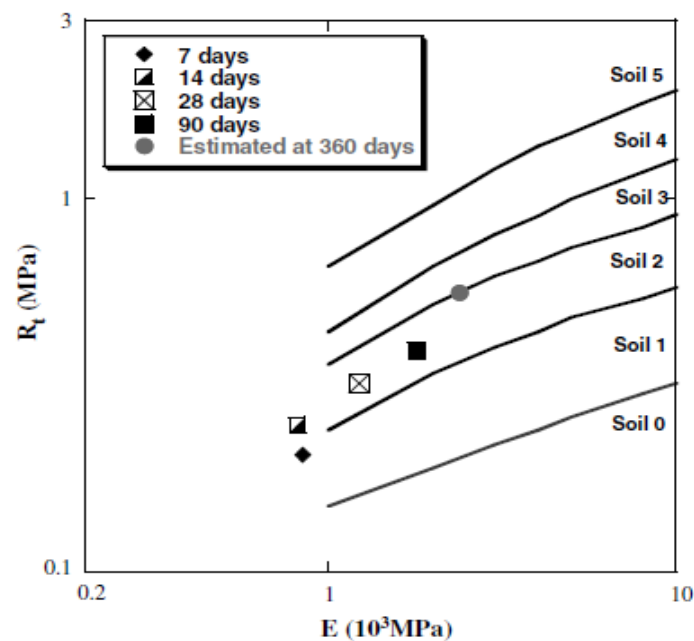


Figure III.9: Evolution du comportement mécanique du mélange 2 avec le temps.

L'augmentation de résistance mécanique pour les deux mélanges est similaire. Cependant, l'ajout de chaux dans le deuxième mélange améliore le développement des liaisons en réduisant les effets de la matière organique sur l'hydratation du ciment à travers l'augmentation des ions de calcium dans la phase aqueuse.

3. Conclusion

Dans cette étude, les auteurs ont fait une étude sur la valorisation des sédiments de dragage (sédiments fins de dragage et du sable de dragage) en technique routier. En outre, le sable de dragage est ajouté pour améliorer la distribution granulaire et pour renforcer le squelette granulaire.

Le mélange 2 est à la limite entre les classes 2 et 3, alors que les résultats du mélange 1 sont hétérogènes et varient entre les classes 1 et 2 et entre les classes 3 et 4 (Figures III.8 et III.9). Les valeurs minimales de E et Rt à 360 jours pour les sols traités sont à l'intervalle de 4,6 à 5,3 MPa et de 0,49 à 0,56 MPa. Sur la base de ces résultats, la méthodologie proposée pourrait constituer un point de départ bénéfique d'utiliser ces sédiments pollués en techniques routiers.

III.3 Valorisation des sédiments marins dans le mortier et dans la fabrication du ciment

III.3.1 Aouad, Laboudigue, Gineys, Abriak. Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker. Journal of Cement & Concrete Composites. (Sédiments de dragage utilisés comme nouveaux approvisionnements en matières premières pour produire du clinker de ciment Portland)

1. Matériel et méthodes

Les sédiments fluviaux utilisés dans cette étude ont été dragués à partir du canal de Scarpe, le bassin industriel du Nord de la France. Les auteurs ont fait une valorisation des sédiments fluviaux pour remplacer une partie des matières premières de Clinker de ciment Portland. L'analyse chimique des sédiments a montré que la majeure partie de l'oxyde de calcium manquait pour produire un ciment Portland. Alors que le clinker doit être riche en C_3A et C_4AF pour minimiser la chaux libre.

Pour produire 1 kg de clinker à base des sédiments pollués, le mélange brut a été composé de 0.391 kg de sédiments, 1.103 kg de $CaCO_3$, 0,01 kg de Fe_2O_3 et 0,015 kg d' Al_2O_3 . Les mélanges bruts ont été homogénéisés et pressés à 5 KN en granulats (hauteur = 30 mm,

diamètre = 40 mm) afin d'obtenir un processus de clinkérisation. Les quantités de ciment produites dans le laboratoire sont limitées par la taille du four disponible. Le ciment à base de sédiments pollués était produit par le mélange de gypse pur et le clinker pour atteindre 3% de SO_3 puis on fait le broyage pour atteindre des tailles de particules plus petites que 60 μm .

En raison de la faible quantité de clinker produit dans le laboratoire, la résistance à la compression a été déterminée sur des petits cylindres (Hauteur = 12 mm, diamètre = 6 mm). Ciment et l'eau étaient mélangés manuellement pendant 3 min. Le remplissage des moules est effectuée en deux étapes sur une table vibrante. Les moules ont été conservés pendant 24 heures à une humidité relative de 100% à 20° C. Les cylindres de pâte ont été démoulés au bout de 24 h, et le durcissement a été poursuivi à 100% d'humidité relative à 20° C. La résistance à la compression a été mesurée sur 10 échantillons à 1, 2, 4, 7, 14, 28 et 56 jours. Les essais ont été réalisés à une température constante. La contrainte était de 0,3 MPa / s en utilisant une presse uniaxiale. Ainsi, les valeurs de la résistance à la compression obtenue pour les cylindres de pâte ne sont pas comparables à mortiers réalisés selon la norme EN-206.

2. Résultats et interprétations

Le (Tableau III.7) présente les compositions chimiques du sédiment, de ciment fabriqués à base des sédiments (CFPS) et de ciment commerciale l'OPC. Les résultats montrent que la composition chimique de ciment fabriqué à base des sédiments est comparable à celle du ciment commercial.

Analyse de diffraction des rayons X des sédiments a indiqué que la plupart des minéraux cristallins étaient abondantes (quartz, illite et de calcite). Le diagramme de diffraction des rayons X de ciment et de ciment fabriqué à base des sédiments présente sur la (Figure. III.10) et montre que tous les principales phases cristallines en OPC, sont présents dans le CFPS.

Tableau III.7: Compositions chimiques des sédiments, de ciment fabriqués à base des sédiments (CFPS) et de ciment commerciale l'OPC.

Chemical composition (%)	Sediment	CFPS	OPC
CaO	5.77	65.28	62.05
SiO ₂	55.51	21.96	20.80
Al ₂ O ₃	6.52	4.21	3.91
Fe ₂ O ₃	3.29	2.25	2.16
Na ₂ O	0.59	0.13	0.32
MgO	0.63	0.27	1.99
K ₂ O	1.81	0.05	0.88
P	0.31	0.10	0.13
S	0.77	1.76	1.68
Ni	0.01	ND	ND
Cu	0.02	0.016	ND
Zn	0.41	0.158	ND
Ba	0.13	ND	ND
Cd	0.01	ND	ND
Pb	0.05	ND	ND
ND < 0.01%			

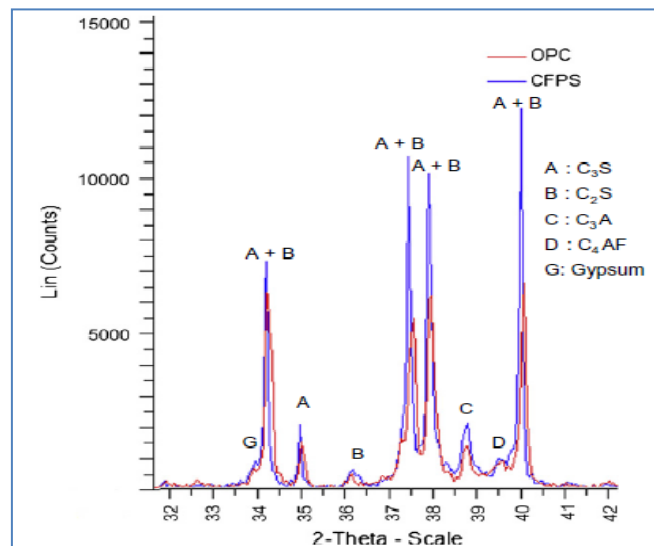


Figure III.10: Diagrammes de DRX du ciment fabriqué à base des sédiments (CFPS) et de ciment commerciale l'OPC.

3. Conclusion

Les auteurs ont fait une étude sur l'utilisation des sédiments fluviaux contaminés pour remplacer une partie des matières premières de ciment. Le but de cette étude était de produire un produit à valeur ajoutée (ciment) à base de (sédiments) et réduire la demande de l'industrie du ciment pour les matériaux premiers. Les trois principales conclusions de cette étude sont les suivants:

- 1) Pour chaque tonne de ciment Portland produite, 390 kg de sédiments fluviaux pollués peut être recyclé. Ce montant n'était jamais atteint dans les études antérieures sur la substitution de matières premières cimenté.
- 2) Le ciment à base des sédiments CFPS était au moins aussi réactif que le produit commercialement OPC.
- 3) Les résultats montrent que la résistance à compression appliquée à CFPS équivalentes à celles d'OPC au début d'âges et supérieur jusqu'à 20% à 56 jours. D'après les diagrammes de DRX de la pâte de ciment, les auteurs ont conclu que les silicates sont plus réactifs dans CFPS que dans OPC.

Enfin, Les résultats ont montré que le ciment Portland clinker peut être synthétisé avec succès en utilisant jusqu'à 39% de sédiment.

III.3.2 F. Moukhchan, Ammari, Ben Allal. Caractérisation Physico-Chimique Des Sédiments Marins Du Littoral De Tanger Et Perspectives De Valorisation. Journal de Dechets Sciences Et Techniques

1. Matériel et méthodes

L'étude expérimentale a été réalisée sur des sédiments marins issus du littoral de Tanger en vue d'une caractérisation physico-chimique. Le but de cette analyse est de mesurer la concentration globale des éléments considérés comme polluants tels que le Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb. Ces données permettent de déterminer les quantités initiales de ces éléments dans le sédiment. Après avoir étudié les caractéristiques des sédiments marins peu pollués, les auteurs ont fait une valorisation pour voir le comportement des mortiers à base de sédiments. Le sable normalisé du mortier est remplacé par les sédiments S1, S2, S3 et S4 qui ont été substitués.

Un mortier normal (1/3 de liant, 2/3 de sable normal et un rapport Eau/Liant = 0.5) a été conçu à base du ciment marocain CPJ 45 (usine de Tanger). La résistance à la compression a été mesurée au bout de 28 jours.

2. Résultats et interprétations

L'analyse granulométrique des quatre sédiments montre que le sédiment S1 est le plus fin alors que S2 et S3 sont plus grossiers et possèdent presque la même granulométrie. S4 reste le sédiment intermédiaire.

Les mesures des résistances mécaniques ont été préparées sur des éprouvettes de mortiers normalisées (4*4*16) cm (Cf. fig III.11). La résistance à la compression de chaque mortier a été mesurée à l'aide d'une presse. Les éprouvettes après démoulage à 24 heures ont été conservées dans l'eau à 20°C pour une durée de 28 jours. L'objectif est de mettre en évidence l'influence des sédiments non traités qui ont été incorporés dans les mortiers.

Les résistances obtenues sont comparées avec les valeurs de références données comme témoins par le mortier normal. Les résultats sont présentés sur le (Tableau III.8) Les faibles valeurs de résistance obtenues en comparaison avec le mortier normal CPJ 45 sont dues à plusieurs facteurs :

- Augmentation du rapport E/L = 0.6 (E=eau, L=ciment).
- Préparation non normalisée du mortier.
- presse inadéquate.

Tableau III.8 : Distribution granulométrique des sédiments marins.

Sédiment	S1	S2	S3	S4
Fraction de sable (en %)	36.6	76.7	78.5	54.7
Fraction de limon (en %)	50.8	19	19	40.3
Fraction d'argile (en %)	12.6	4.3	2.5	5



Figure III.11: Eprouvettes de mortier à base de sédiments.

Tableau III.9: Résistance en compression pour les différents mortiers.

Référence	Mortier normal CPJ 45	Mortier S 1	Mortier S 2	Mortier S 3	Mortier S 4
Rc (28j) MPa	45.5	17.8	24.1	22.7	28.8

3. Conclusion

Les auteurs ont constaté que les sédiments marins issus du littoral de Tanger sont peu pollués et peuvent être utilisés comme une source alternative de granulats dans le domaine de génie civil. La caractérisation chimique des sédiments montre l'absence d'une pollution métallique.

Les résultats obtenus ont laissé une marge pour choisir le domaine adéquat pour une valorisation de ces sédiments (Tableau III.9). Les faibles valeurs des résistances en compression permettent aux auteurs de conclure que la valorisation de sédiments peut accepter pour des utilisations peu résistantes (mortiers d'enduits ou de maçonnerie) avec un remplacement partiel ou total du sable ordinaire par ces sédiments.

Conclusion

L'étude que nous avons réalisée dans le cadre de cette thèse comporte une synthèse bibliographique concernant la valorisation des sédiments de dragage qui peuvent être contaminés par divers types de polluants (métaux lourds, matières organiques,..) ou pas contaminés. Au lieu de rejeter ces sédiments marins dans le milieu naturel comme un déchet, on leur donne une valeur en les réutilisant comme matériau de construction dans le domaine de génie civil.

Les sédiments marins peuvent être utilisés aussi comme une matière première dans l'industrie des matériaux rouges. Plusieurs études sont élaborées dans ce domaine sur des échantillons de sédiments à travers le monde. A partir de cette étude, nous avons recherché les voies de valorisation des sédiments de dragage dans le domaine de la fabrication des briques, dans les mortiers de ciments et en technique routier.

La valorisation de sédiments marins vise deux objectifs: éviter les problèmes d'ordres écologiques posés par le rejet des sédiments dans la nature d'un côté et de faire l'économie par la vente de ces sédiments aux entreprises de réalisation des projets qui nécessitent les matériaux de construction et aux usines de fabrication de la brique qui nécessitent l'argile comme une matière première dans les briqueteries.

Chapitre IV : Présentation du port de Bethioua et de la briqueterie de Hassi Ben Okba et processus de fabrication de brique

Introduction

Les briques depuis longtemps sont considérées parmi les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des briques est passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite et enfin la brique industrielle stabilisée.

Dans ce chapitre, nous allons faire une présentation sur les échantillons de sédiments marins prélevés à partir du port de Bethioua ainsi que la présentation de la briqueterie de Hassi Ben Okba et le processus de fabrication de brique.

IV. 1 Présentation du port et prélèvement des échantillons à partir du port de Bethioua

IV.1.1 Présentation du port de Bethioua

Le Port de Bathioua (Figure IV.1) est le 3ème port d'Oran localisé sur les côtes de l'ouest d'Oran. Sa zone industrielle est spécialisée dans une source de pétrole environ 3,5 millions de m³ de matériaux sont dragués chaque année. Avec ce flux de matériaux et cette richesse industrielle, il représente un cas d'étude intéressant.



Figure IV.1: Site de prélèvement des sédiments (Port de BETHIOUA).

IV.1.2 Prélèvement des échantillons à partir du port de Bethioua

Les échantillons des sédiments étudiés ont été prélevés directement à partir du bassin le 20/05/2013 à 14:10 avec une température de 23 °C au niveau du port de Bathioua (Figure IV.2) qui se consacre aujourd'hui exclusivement aux activités pétrolières. Les sédiments étudiés ont été prélevés à l'aide d'une drague mécanique qui est fondamentalement une pelle mécanique montée sur un ponton dans la zone de « Bethioua ». Cette zone est classée comme zone pétrolière. Le matériau dragué a été conservé dans des sachets étanches propres et transféré le jour même du dragage vers les différents laboratoires pour y subir les différents tests et analyses.

Les échantillons ont été prélevés à 6.50 m de profondeur (par rapport à la surface de l'eau) et une distance de 6.55m par rapport au quai, le Temps était nuageux à très nuageux accompagné de pluie, la visibilité était moyenne avec un vent de l'est à l'ouest 10-20 NDS, l'activité sédimentaire induit par les courants de mer peu agité et la houle était du nord à nord est au tour de 1m.



Figure IV.2: Zone d'échantillonnage des sédiments à l'aide d'une drague mécanique.

IV.2 Présentation de la briqueterie de Hassi Ben Okba et processus de fabrication de brique

IV.2.1 Présentation de la briqueterie de Hassi Ben Okba

L'affaire créée en 1987 sous la forme d'une société à responsabilité limitée SARL PROMAG, au capital social de 490.000.000 DA, représentée par son gérant Monsieur AMRY Benaissa, professionnel du secteur des matériaux de construction.

PROMAG, structure nodal du groupe AMRY, se développe tant par des extensions que par des investissements dans d'autres secteurs. Cette volonté a pour vision de pérenniser un groupe à travers un ancrage plus important dans le marché. Sarl PROMAG, le fleuron du groupe, son chiffre d'affaire moyen pour ses trois derniers exercices est de 197 million de dinars avec un effectif de 154 emplois. L'organigramme de la briqueterie de PROMAG présente sur la figure IV.3 qui donne tout les services de la société. Sa clientèle est composée principalement d'entreprise opérant dans le secteur du bâtiment tel que l'OPGI, BAI OR, SEROR, CLCE, ZCIGC ainsi que des entreprises privées du même secteur. La capacité de production nominale de la SARL PROMAG de 100.000 tonnes/an soit 270 tonnes/jour de brique.

La société exploite un gisement sous forme de concession mitoyen du site de production et dont la durée de vie est estimée à 35 ans.

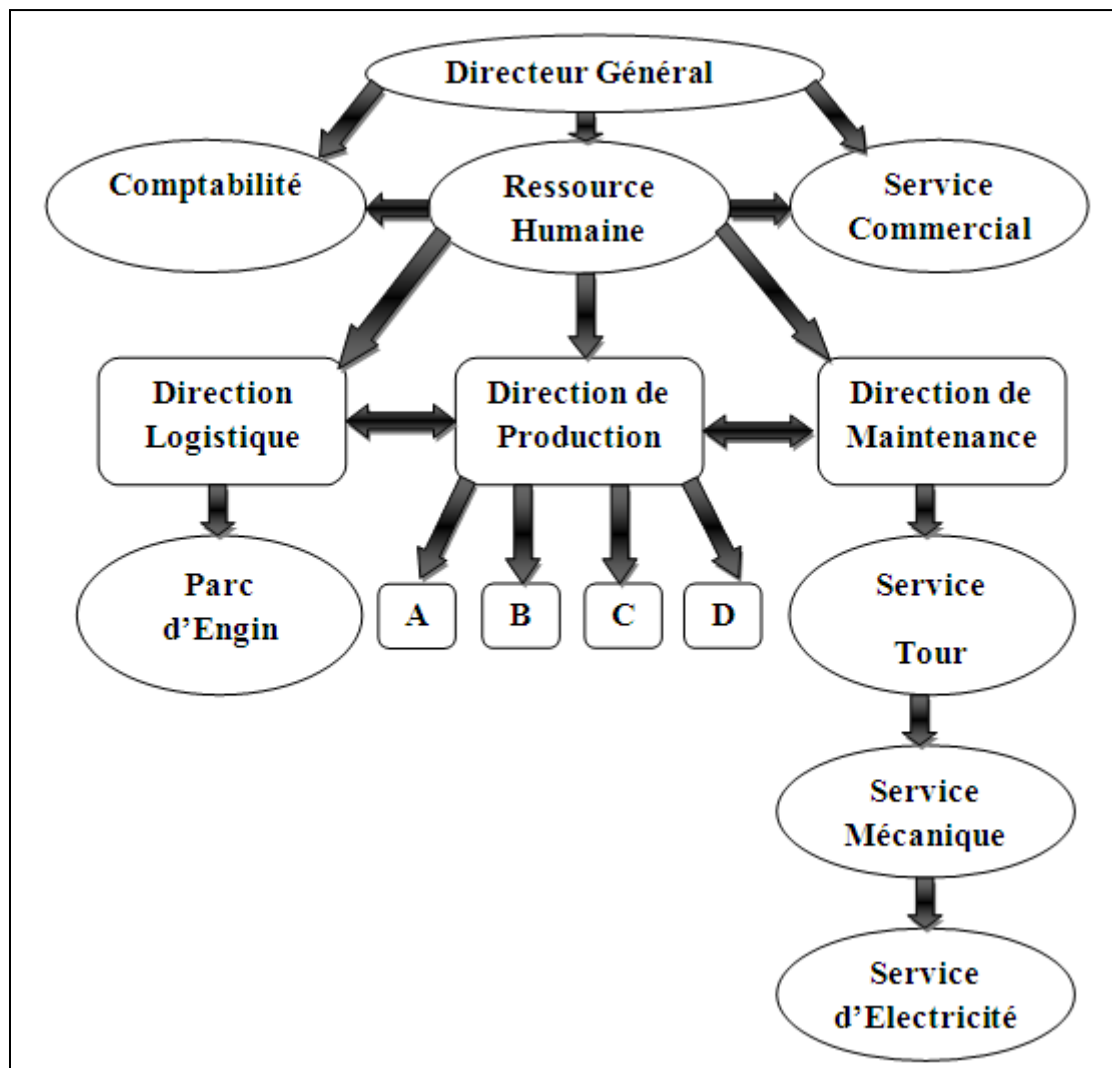


Figure IV.3: Organigramme de la briqueterie de PROMAG.

IV.2.2 Processus de fabrication de brique et matériaux utilisés dans la briqueterie de Hassi Ben Okba

Les matières premières utilisées dans la briqueterie de Hassi Ben Okba pour la fabrication des briques sont principalement :

- les terres argileuses contenant une forte proportion d'argile qui donne leur aptitude au façonnage et leurs propriétés mécaniques après cuisson.
- Les dégraissants (sables) pour fournir la structure à la brique (squelette), pour réduire la température de fusion lors de la cuisson (fondant) et réduire la plasticité de la pâte
- L'eau : pour adapter la plasticité de la pâte.

1. Argiles

Le mot (argile) englobe deux sens, l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre. Les minéraux argileux résultent soit de l'altération physique, c'est à dire de la désagrégation d'une roche préexistante (minéraux primaires), soit de l'altération chimique (minéraux secondaires). Dans ce cas, ils sont formés par transformation d'un minéral ou par précipitation à partir d'une solution. De façon générale l'argile augmente la résistance mécanique, donne la maniabilité et la forme de la pièce. On distingue les argiles grasses ou maigres suivant qu'elles sont très ou peu plastiques, les argiles grésantes ou réfractaires selon leur comportement à la cuisson, les argiles smectiques (absorbantes et dégraissantes).

Les principaux composants des argiles sont les minéraux argileux dominants (Phyllosilicates), le quartz, les oxydes et hydroxydes de fer (hématite, goethite), le sulfure de fer (pyrite), la gibbsite, les carbonates (calcite, dolomite) et la matière organique. Les minéraux argileux sont principalement des phyllosilicates, c.-à-d. qu'ils sont constitués par un empilement de feuillets.

2. Élément dégraissants

Les argiles naturelles peuvent entraîner des difficultés de fabrication (une forte humidité de façonnage, un séchage lent et un retrait de séchage important) à cause de leur forte plasticité. Pour réduire la plasticité de l'argile, donc il est nécessaire d'utiliser des éléments de nature non plastique (dégraissants) qui donnent aux produits une texture moins compacté. Cela facilite l'évacuation d'eau pendant le séchage et les dégagements gazeux pendant la cuisson et diminue la plasticité du mélange. Parmi les éléments dégraissants les plus utilisés, on peut citer :

- Le sable de granulométrie 0.2 à 1 mm, à des doses pouvant atteindre 30 %. Le sable est généralement constitué de silice, de feldspaths et de mica.

IV.3 Techniques de fabrication des briques

Les briques sont formées dans une extrudeuse à vis qui malaxe un mélange d'argile, de sable et de l'eau. (Figure IV.4) L'ébauche de la brique obtenue est découpée à longueur puis évacuer vers le four de séchage. Les briques crues sont stockées dans des chariots qui circulent à travers le séchoir. Les briques sèches sont transférées vers un poste de contrôle de planéité avant d'être cuites dans un four à la température maximale de 900 à 980°C. Les briques sont ensuite palettisées et stockées à l'extérieur de l'usine.

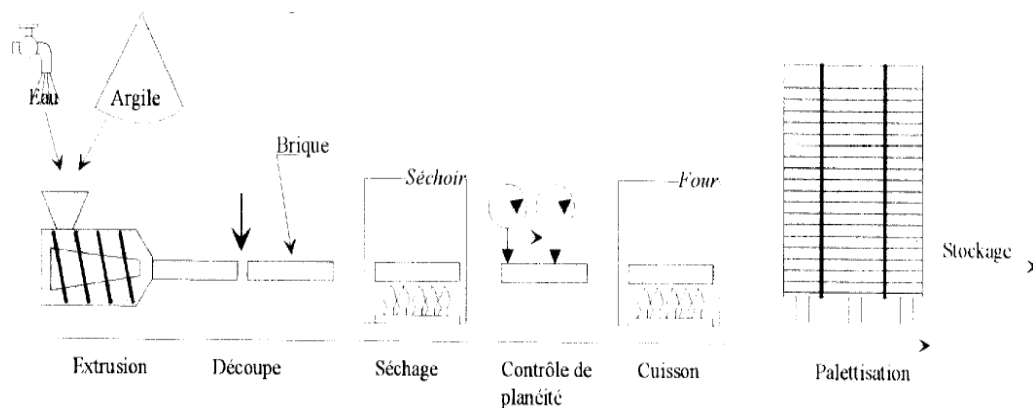


Figure IV.4: Processus de fabrication des briques.

La figure IV.5 présente le schéma principal de fabrication des briques à la briqueterie de Hassi Ben Okba.

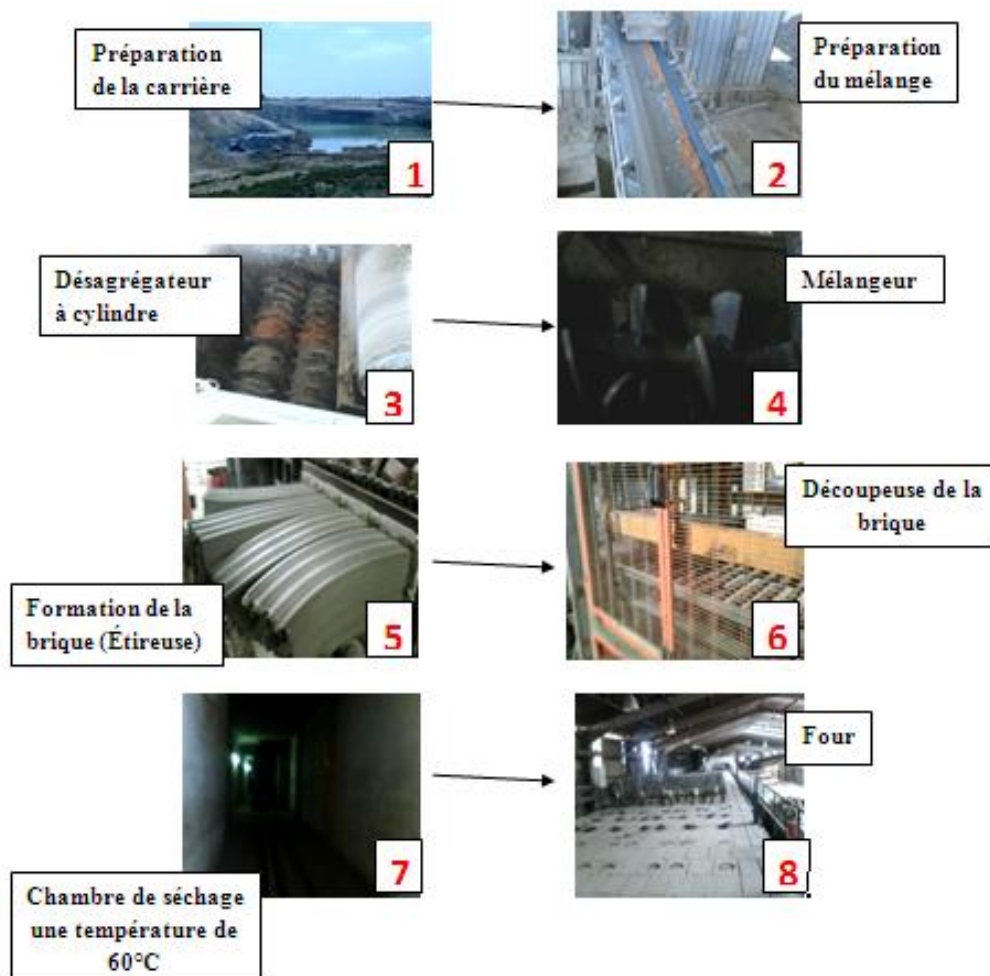


Figure IV.5: Processus de fabrication des briques à Hassi Ben Okba.

IV.4 Préparation de la pate

La préparation de la pate a pour but d'éliminer les cailloux et les impuretés, homogénéiser et humidifier le mélange pour obtenir la bonne plasticité de la pate. La préparation peut être sèche, semi-humide et humide selon l'humidité de l'argile de la carrière (Figure IV.6). Le procédé de mise en forme dépend de la qualité du mélange (particulièrement sa granulométrie). La préparation de la pate au niveau de la briqueterie de Hassi Ben Okba est composée principalement de 75% d'argile + 25% de sable + une teneur en eau autour de 12% d'eau. Le mélange passe par un tapis roulant à un broyeur.



Figure IV.6: Préparation de la pâte des briques à Hassi Ben Okba.

- **Préparation sèche**

La préparation sèche s'applique aux argiles ayant une humidité jusqu'à 10 %. Elle est développée dans les régions sèches, car à la sortie de la carrière, l'argile est pratiquement sèche. Elle se développe aussi dans les régions à climat humide, mais elle est plus coûteuse à cause des coûts de séchage. Industriellement la préparation sèche permet d'atteindre des granulométries maximales de 150 μm , soit cinq fois meilleures que celles obtenues par la préparation semi-humide.

1. Façonnage

Le façonnage donne à la pâte une cohésion suffisante, grâce à l'élimination de l'air fermé dans l'argile (désaération) et à l'amélioration de l'état plastique de la pâte, soit par mouillage additionnel, soit par une injection de vapeur d'eau.

Le procédé utilisé dans la briqueterie de Hassi Ben Okba est le pressage avec une pression de 100 bars avec une température de 59°C (Figure IV.7). Ce procédé de mise en forme est appliqué aux pâtes plastiques. Ce procédé permet d'obtenir un produit de forme définitive.



Figure IV.7: La mise en forme de la pate des briques à Hassi Ben Okba.

2. Séchage

Le séchage a pour but d'éliminer la plus grande partie de l'eau qui se trouve dans les produits après façonnage. C'est une phase délicate et importante de la fabrication qui doit être contrôlée pour éviter les fissurations de retrait différentiel des briques. Le séchage est réalisé progressivement dans une chambre de séchage avec une température de 60°C pendant 36 heures contrôlant deux paramètres: la température et l'humidité. On distingue deux phases:

- Le départ de l'eau colloïdale qui intervient dans la plasticité. Le volume de retrait correspond au volume de l'eau retiré.
- Le départ de l'eau d'interposition qui se trouve libre dans les pores de l'argile. Le départ de l'eau est totalement compensé par la création de la porosité (sans retrait). L'argile dans cette phase perd complètement sa plasticité.

Après leur passage au séchoir, les produits ne contiennent plus que 1 à 2 % d'eau résiduelle.

3. Cuisson

La cuisson donne aux produits secs leurs caractéristiques finales adaptées à leur utilisation pour la construction (Figure IV.8). Cette phase doit répondre à des impératifs techniques et économiques et doit être conduite de façon à obtenir des produits de caractéristiques fonctionnelles satisfaisantes. Il s'agit donc de contrôler plusieurs paramètres qui influencent la phase de cuisson tels que la température, la durée de cuisson et l'atmosphère à l'intérieur du four. La température de cuisson est environ de 900°C.



Figure IV.8: Processus de cuisson des briques à Hassi Ben Okba.

IV.5 Influence de la température sur les constituants

Différentes réactions chimiques et physiques complexes se produisent dans le mélange avec la montée de température pendant la cuisson ce qui provoque des modifications de porosité, de masse volumique, de dimensions et de propriétés mécaniques du produit final.

- Jusqu'à 200°C environ, dégagement de l'eau résiduelle de séchage et de l'eau d'hydratation.
- De 200 à 450°C, destruction des matières organiques en s'oxydant avec l'air qui diffuse dans les pores. Les hydroxydes de fer [goethite : $\text{FeO}(\text{OH})$] se transforment selon la possibilité d'oxydation soit en hématite (Fe_2O_3) avec la coloration rouge soit en magnétite (Fe_3O_4) avec une coloration bleu noire.
- De 400 à 680°C, destruction des minéraux argileux (kaolinite, illite 550°C). Des composés très fins (metakaolin) se forment et un début de retrait de cuisson est observé à ce stade. A 573°C le quartz change de forme cristallographique.
- De 750 à 850°C, décomposition du carbonate [CaCO_3] en chaux vive [CaO] accompagnée par le dégagement du CO_2 . Cette réaction est un équilibre dont les températures exactes dépendent de l'atmosphère gazeuse.
- Au-delà de 850°C, deux phénomènes sont observés selon la minéralogie du mélange : Les argiles non-calcaires développent un frittage liquide donnant aux produits finals une structure liée par une phase vitreuse. En revanche, les argiles calcaires (teneur élevée en calcite CaCO_3 et dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ne développent pratiquement pas de phase vitreuse et la cristallisation des produits céramique s'effectue en phase solide. Le CaO disparaît et nouvelles phases commencent à se former comme : les silicates de calcium et les aluminosilicates de calcium. La dolomite entraîne la

formation de silicates de calcium/magnésium. Le fer n'apparaît plus comme hématite mais se combine aux aluminosilicates.

Conclusion

Les matières premières utilisées dans la fabrication des briques sont principalement les terres argileuses, les dégraissants (sables) et l'eau. En conclusion, Les filières de valorisation des sédiments sont diverses. Le choix de type de valorisation est en fonction des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques plus que les paramètres environnementaux des sédiments marins.

L'étude menée dans ce chapitre vise d'étudier l'état de prélèvement des échantillons de sédiments marins à partir du port de Bethioua et d'étudier aussi les différents processus et techniques de fabrication des briques dans la briqueterie de Hassi Ben Okba.

Chapitre V : Caractérisation des sédiments marins et de l'argile utilisée pour la fabrication des briques

Introduction

L'utilisation des sédiments marins dans n'importe quel domaine nécessite une étude détaillée. Cette étude est basée sur les résultats de plusieurs analyses d'identification physique, chimique et minéralogique. La solution adoptée jusqu'ici qui est basée sur une étude de faisabilité grossière, est le largage des matières solides issues des dragages à quelques miles au large des côtes. Notre intérêt a été de nous occuper du devenir de ces matériaux en recherchant des voies de leur réutilisation dans le BTP (*Semcha et al, 2012*).

Le présent chapitre est consacré à la description des protocoles expérimentaux des différents essais et analyses réalisés pour caractériser les sédiments du port de Bethioua, argile de brique et la barbotine de brique. Les essais sont réalisés conformément aux normes françaises. Ces essais ont été réalisés dans plusieurs laboratoires internes de notre université USTO-MB (laboratoire de MDS, de microscopie et laboratoire de rhéologie) et externes (laboratoire de CTH, LAFARGE et laboratoire de chimie de polymère).

V.1 Caractéristiques physiques

Les propriétés physiques ont été déterminées pour caractériser les sédiments marins du port de Bethioua, l'argile, le sable et la barbotine utilisés pour la fabrication des briques de Hassi ben okba et la barbotine de brique. Les normes et les méthodes utilisées sont récapitulées dans le tableau V.1. Les paramètres physiques déterminés sont la teneur en eau, le poids volumique des grains solides, l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, et la valeur au bleu de méthylène. Ces caractéristiques sont déterminées dans le laboratoire de la mécanique des sols du département d'hydraulique de l'université et le laboratoire de CTH.

Tableau V.1: Norme utilisées pour la caractérisation des matériaux étudiés.

Propriétés	Norme et méthode
Teneur en eau	NF P 94-050
Masse volumique absolue	NF P 94-054
Granulométrie par tamisage	NF P 94-041
Granulométrie par sédimentométrie	NF P 94-057
Limite d'Atterberg	NF P 94-051
Valeur au bleu de méthylène	NF P 94-068
Equivalent de sable	NF P 18-598

V.1.1 Teneur en eau initiale

L'eau libre, capillaire ou adsorbée par les particules des sédiments, est assez importante dans certains cas au point d'augmenter le volume des matériaux dragués. Ainsi, la détermination de la teneur en eau est nécessaire pour évaluer la quantité de l'eau à éliminer pour pouvoir réutiliser les sédiments. La teneur en eau des sédiments dépend de leur capacité à absorber et adsorber l'eau et de la méthode de dragage utilisée. La teneur en eau est déterminée par étuvage à 105°C conformément à la norme **NF P 94-050**. Les sédiments marins ont une valeur moyenne de teneur en eau de l'ordre de 25%. Cette valeur peut résulter de la méthode de prélèvement (Type de dragage) mais aussi de la nature des matériaux, conditions climatiques (été, hiver) et aussi du site de prélèvement.

V.1.2 Masses volumiques

1. Masse volumique absolue

La masse volumique des particules solides (masse volumique absolue) des sédiments marins et de l'argile utilisée pour la fabrication des briques a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre suivant la norme **NF P94-054**. En connaissant la masse de l'échantillon, la masse volumique absolue est déterminée par le rapport entre la masse des grains solides et leur volume. La mesure a été effectuée sur les matériaux broyés et séchés à 40°C, le tableau V.2 présente la masse volumique absolue obtenue pour chaque échantillon et après avoir la moyenne de trois essais.

La masse volumique des sédiments mesurée par la méthode du pycnomètre est inférieure que celles mesurée pour l'argile utilisée pour la fabrication des briques.

Tableau V.2: Masse volumiques absolue des matériaux étudiés.

Matériaux	Masse volumique absolue γ_s (g/cm ³)
Sédiments marins du port de Bethioua	2.2
Argile de briques	2.6
Barbotine de brique	2.4
Sable	2.6

2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des matériaux étudiés a été déterminées par la méthode du moule. Les valeurs de la masse volumique apparente des matériaux étudiés sont plus faibles que leur masse volumique absolue. Ces résultats sont liés à la porosité. Le tableau V.3 présente la masse volumique apparente obtenue pour chaque échantillon et après avoir la moyenne de trois essais.

Tableau V.3: Masse volumiques apparente des sédiments, de l'argile de briques et de la barbotine de brique.

Matériaux	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Sédiments marins du port de Bethioua	1.12
Argile de briques	1.77
Barbotine de brique	1.03

V.1.3 Analyse granulométrique

Les sédiments du port de Bethioua ont une couleur noirâtre à grisâtre (Figure V. 1) et ont une consistance molle au toucher. Ils sont caractérisés par la présence de sable et de débris de coquilles et par une odeur nauséabonde.



Figure V.1: Sédiments du port de Bethioua.

1. Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie

Les matériaux étudiés sont séchés dans une étuve à une température de 105°C qui a été retenue afin d'éviter toute modification des caractéristiques physico-chimiques. Avec cette température on peut s'assurer de ne pas dégrader la matière organique dans les sédiments. Dès que le séchage est terminé, les sédiments sont prêts pour l'utilisation. La figure V.2 représente les différents états du sédiment lors de la préparation pour l'analyse granulométrique. Finalement, on procède à un tamisage classique en retenant la série de tamis suivante : 0.08mm, 0.1mm, 0.315mm, 0.630mm, 1.25mm, 2.50mm et 5mm. Ce choix permet d'améliorer l'allure des courbes.

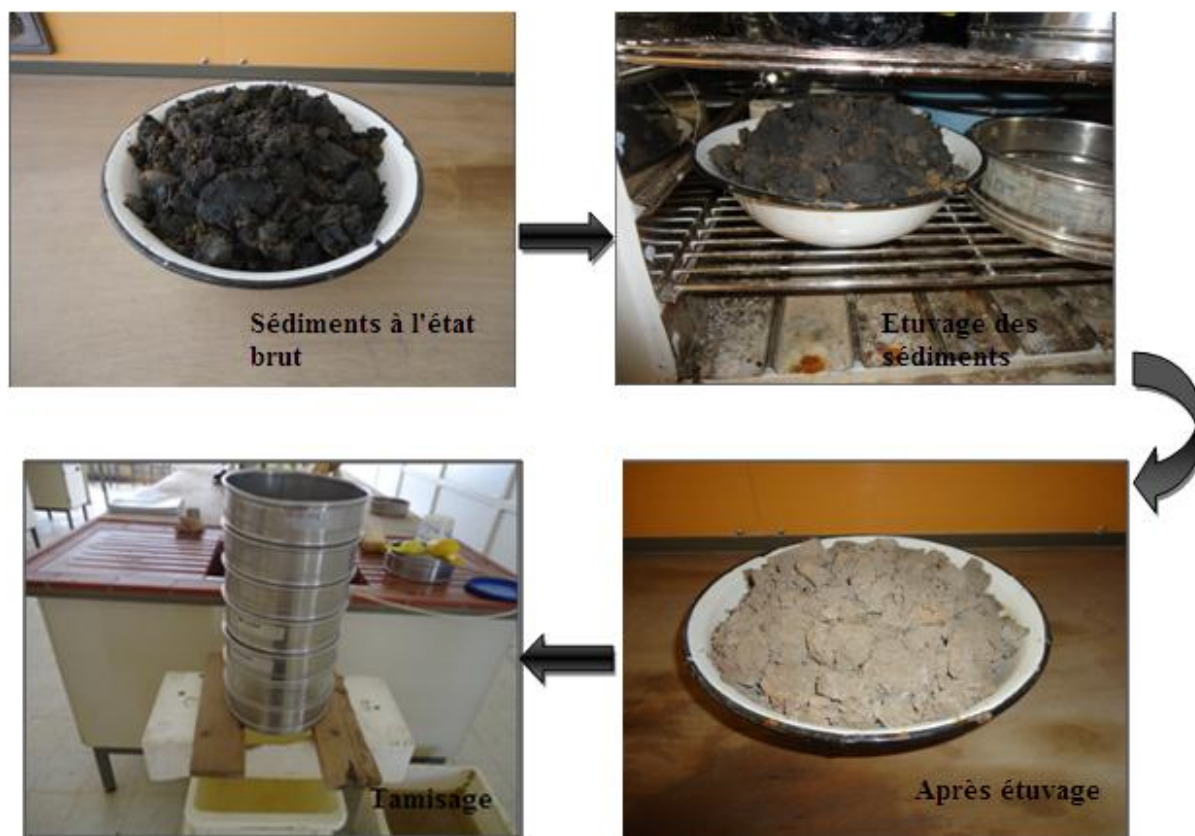


Figure V.2: Différentes étapes de préparation pour le tamisage.

La distribution granulométrique est une des propriétés à déterminer pour caractériser les sédiments et les classer parmi les catégories du sol. Avant de procéder au tamisage, l'échantillon est trempé pendant un temps suffisant au moins une heure dans un bac rempli d'eau en vue d'assurer la séparation complète des mottes argileuses. Le tamisage par voie humide est effectué manuellement sur la colonne des tamis. L'analyse granulométrique des matériaux étudiés a été effectuée suivant la norme **NF P 94-041** pour la fraction supérieure à 80 μm et la sédimentométrie selon la norme **NF P 94-057** pour la fraction inférieure à 80 μm .

Les pourcentages de la répartition granulométrique des sédiments du port de Bethioua, de l'argile de brique et de la barbotine de brique sont donnés dans le tableau V.4. La figure V.3 présente les granulométries des sédiments marins, de l'argile et de la barbotine de brique. Chaque courbe présentée est la courbe moyenne de trois analyses. D'après les coefficients de courbure et d'uniformité déterminés à partir de D_{10} , D_{30} et D_{60} donnés dans le tableau V.5, on distingue que les courbes granulométriques des matériaux étudiés sont étalés. Ces résultats montrent que les sédiments du port de Bethioua sont des limons sableux, l'argile de brique est considéré comme des argiles légèrement sableux et pour la barbotine est considéré comme des

limons sableux. Le sable dont le diamètre maximum D_{95} est de l'ordre de 2 mm d'où il s'agit d'un gros sable avec une composition de 80% de gros sable et 15% de sable fin.

Le diamètre médian (D_{50}) des sédiments marins est de l'ordre de 30 μm et le diamètre (D_{95}) des particules est égal à 200 μm . Pour l'argile de brique, le diamètre moyen est égal à 4 μm et D_{95} est de l'ordre de 80 μm . Le diamètre D_{50} de l'argile de brique est assez petit comparé à ceux des sédiments marins. L'analyse granulométrique a montré que les courbes et les propriétés granulométriques des sédiments du port de Bethioua et de la barbotine de brique sont très voisines.

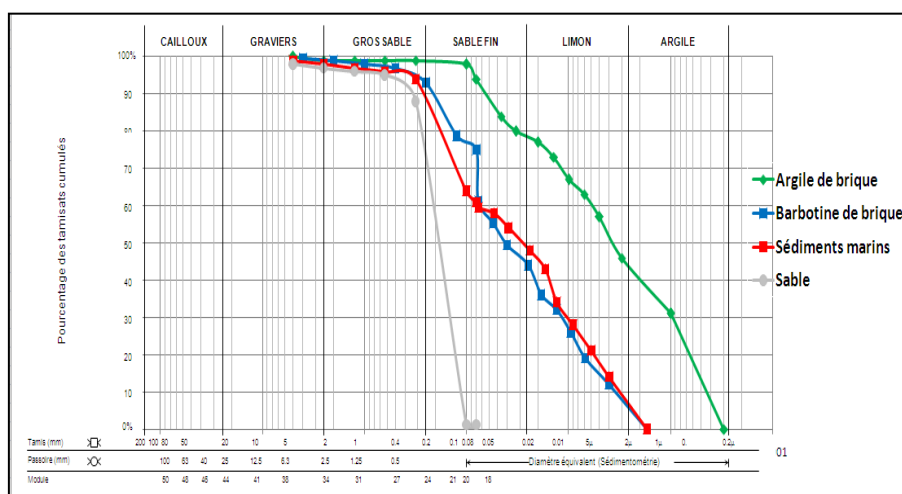


Figure V.3: Granulométrie des sédiments, de l'argile, de la barbotine de brique et du sable.

Tableau V.4: Répartition granulométrique en % des matériaux étudiés.

Matériaux	Gros sable $2 < d < 0.2$ (mm)	Sable fin $0.2 < d < 0.063$ (mm)	Limon $0.063 < d < 0.002$ (mm)	Argile $d < 0.002$ (mm)
Sédiment marins	10	40	42	8
Argile de brique	2	20	35	43
Barbotine de brique	8	47	40	5
Sable	25	75	0	0

Tableau V.5: Coefficients de courbure et d'uniformité des matériaux étudiés.

	D₁₀ (mm)	D₃₀ (mm)	D₅₀ (mm)	D₆₀ (mm)	D₉₅ (mm)	Cu	Cc
Sédiment marins	0.0035	0.01	0.03	0.08	0.2	22.8	0.36
Argile de brique	0.00045	0.001	0.004	0.006	0.08	13.3	0.37
Barbotine de brique	0.0035	0.012	0.04	0.08	0.2	22.8	0.51
Sable	0.19	0.25	0.28	0.30	2	1.57	1.10

2. Analyse granulométrique par laser

Deux méthodes sont utilisées pour déterminer la granulométrie (granulométrie par sédimentométrie et la granulométrie par laser) pour la fraction inférieure à 80 μm . Pour la fraction fine, l'analyse granulométrique par laser a été réalisée par voie sèche dans un granulomètre laser sous une pression d'air de 2,5 bars (Figure V.4). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V.5 et V.6. L'analyse des résultats obtenus pour chaque matériau étudié montre que les deux techniques donnent des courbes comparables.



Figure V.4: Granulomètre laser.

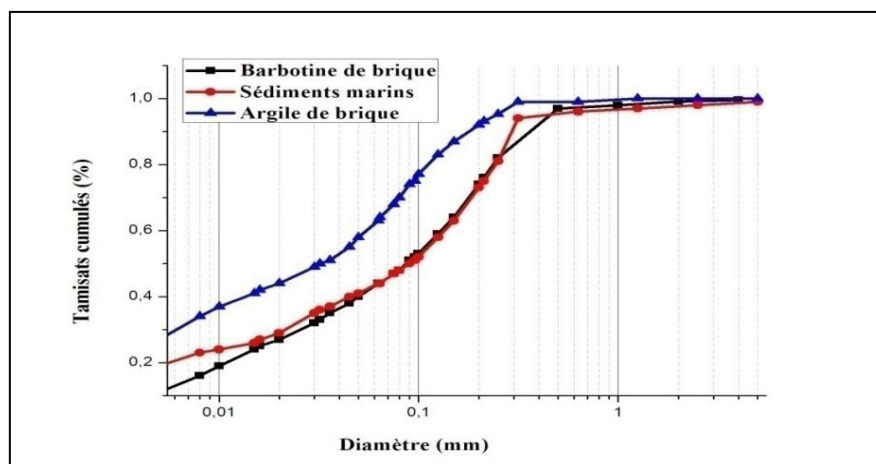


Figure V.5: Granulométrie par laser des sédiments, de l'argile et de la barbotine de brique.

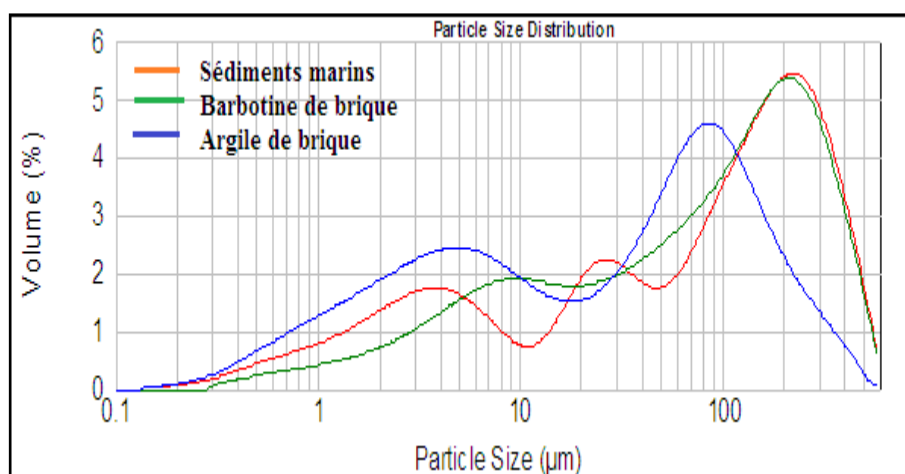


Figure V.6: Distribution des tailles de particules pour les sédiments, l'argile et la barbotine de brique.

V.1.4 Limites d'Atterberg

1. Limite de liquidité

Pour déterminer la limite de liquidité, on a utilisé l'appareil de Casagrande décrit dans la norme française **NF P94-051**. Les limites d'Atterberg, les indices de plasticité et de consistance sont regroupés dans le tableau V.6. Ces résultats montrent que les sédiments du port de Bethioua sont peu plastiques et de consistance dur et l'argile de brique est considérée comme argile peu plastique et de consistance dur. La classification des sédiments du port de Bethioua et de l'argile de brique sur l'abaque de Casagrande est déduite sur les figures V.7 et V.8. Cette classification révèle que les sédiments sont des limons peu plastiques et l'argile est

considérée comme des argiles peu plastiques. Les limites d'Atterberg, les indices de plasticité et de consistance pour la barbotine de brique sont comparable par rapport aux limites de sédiments marins.

Tableau V.6: Limites d'Atterberg, indice de consistance et plasticité des matériaux étudiés.

Matériaux	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)	Plasticité	I_c
Sédiments marins	30.2	19.6	10.6	Peu plastique	>1 dure
Argile de brique	50.1	25.2	24.9	Peu plastique	>1 dure
Barbotine de brique	35.5	17.4	18.1	Peu plastique	>1 dure

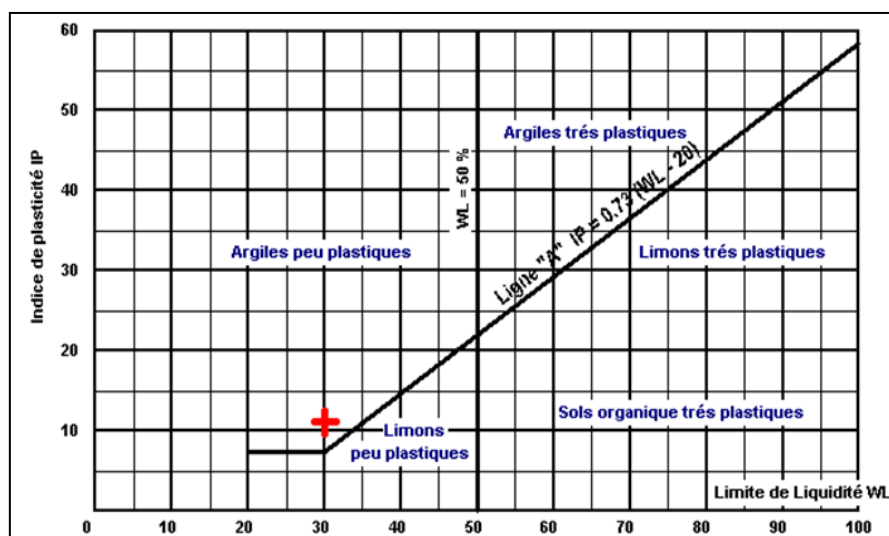


Figure V.7: Classification des sédiments du port de Bethioua sur l'abaque de Casagrande.

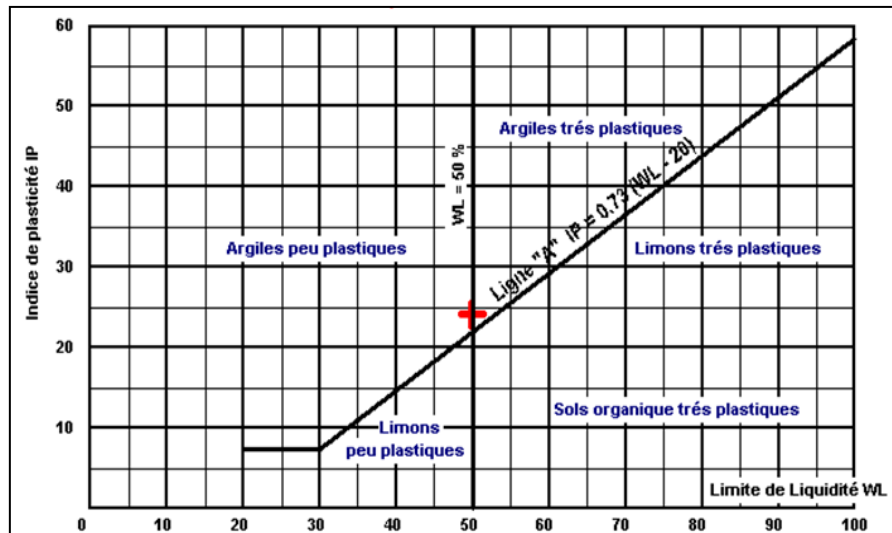


Figure V.8: Classification de l'argile de brique sur le diagramme de Caagrande.

2. Limite de plasticité

La limite de plasticité est déterminée par la méthode du rouleau. Par définition, la limite de plasticité est définie comme la teneur en eau du cylindre qui se brise en 2 ou 3 morceaux au moment où son diamètre atteint 3 mm.

V.1.5 Equivalent de sable

Dans cette étude, l'essai d'équivalent de sable est réalisé selon la norme **NF P 18-598** pour les sédiments marins et pour le sable utilisé dans la fabrication de brique. Les valeurs d'équivalent de sable et les classifications correspondantes attribuées aux sédiments du port de Bethioua et au sable sont données dans le tableau V.7. A partir de ces résultats, il apparaît que les valeurs mesurées sur le sable est supérieure à celles mesurées sur les sédiments marins. Pour comparaison, les valeurs d'ES mesurées sur les sédiments du port de Bethioua étaient de l'ordre de 42% qui permet d'identifier le type de sable (Sable argileux). Les valeurs d'ES mesurées sur le sable utilisé dans la fabrication de brique étaient de l'ordre de 84% qui permet d'identifier le type de sable (Sable très propre).

Tableau V.7: Résultats d'équivalent de sable pour les sédiments marins et le sable utilisé pour la fabrication de brique.

Matériaux	Es %	Nature et qualité
Sédiment marins	42	Sable argileux
Sable	84	Sable très propre

V.2 Caractéristiques chimiques

Les propriétés chimiques ont été déterminées pour caractériser les sédiments marins du port de Bethioua, l'argile, le sable et la barbotine utilisée pour la fabrication des briques de Hassi ben okba. Les normes et les méthodes utilisées sont récapitulées dans le tableau V.8. Les paramètres chimiques déterminés sont la valeur au bleu de méthylène, le Ph, la conductivité et la matière organique. Ces caractéristiques sont déterminées dans le laboratoire de la cimenterie LAFARGE et le laboratoire de CTH.

Tableau V.8: Normes et méthodes utilisées pour la caractérisation des matériaux étudiés.

Propriétés	Norme et méthode
Valeur au bleu de méthylène(VBS)	NF P 94 068
pH	NF X31-103
Conductivité	NF ISO 11265
Matière Organique	XP P94-047
Calcimètre de Bernard	NF P 94-048

V.2.1 Analyse chimique par fluorescence des rayons x

La caractérisation chimique a été déterminée par fluorescence des rayons x qui permet la détection de différentes proportions des éléments chimiques présents dans un matériau et la détermination de leur quantité respective. Les résultats des analyses par fluorescence aux rayons X des matériaux étudiés sont donnés dans le tableau V.9. Ils montrent que l'alumine (Al_2O_3) est liée à la plasticité et la teneur en cet oxyde est plus élevée dans l'argile de brique que ceux des sédiments marins. Pour conserver la plasticité il est nécessaire de mélanger ses

sédiments marins avec l'argile. Les teneurs en silice (SiO_2) dans les sédiments marins répondent aux normes de fabrication des briques en France. Cet oxyde correspond à la présence de quartz avec une teneur suffisante pour être utilisé comme dégraissant sans ajout d'un élément inerte tel que le sable. L'oxyde de fer (Fe_2O_3) est le principal colorant dans les argiles et est responsable de la couleur rouge après cuisson. Les sédiments marins sont en majeure partie constitués du Calcium (Ca) et de Silice (Si). La prédominance du Calcium confirme la présence d'une fraction importante de carbonate de calcium prouvée par la méthode du calcimètre. L'argile et la barbotine de brique sont en majeure partie constitués du Silice (Si) et d'Alumine (Al).

Tableau V.9: Composition chimique en éléments majeurs dans les matériaux utilisés (en % massique).

Eléments	Symbole	Sédiments marins %	Argile de brique %	Sable %	Barbotine de brique %	Norme de briqueterie Française %
La silice	SiO_2	27.9	48.4	82.7	61.0	35-80
L'allumine	Al_2O_3	6.1	12.2	1.07	12.1	5-25
L'oxyde de fer	Fe_2O_3	4.01	7.72	0.67	5.48	2-8
Le Calcium	CaO	29.4	10.7	7.04	9.09	0.5-15
La magnésite	MgO	2.71	2.50	0.13	1.76	0.3
Le sulfate	SO_3	0.85	0.70	0.06	0.04	-
Potassium	K_2O	0.70	2.03	0.30	1.13	0.5-10
L'oxyde de sodium	Na_2O	0.34	0.55	0.12	0.46	0.1-1
Le chlorure	Cl	0.02	0.05	0.003	0.13	-
Le phosphore	P_2O_5	0.11	0.21	0.01	0.11	-
L'oxyde de Titane	TiO_2	0.18	0.56	0.11	0.72	0.3-2
Perte au feu	PAF	28.9	16.1	7.57	7.80	3-18

V.2.2 Détermination du taux de carbonates de calcium

Le taux de carbonates de calcium a été déterminé en utilisant le calcimètre de Bernard selon la norme française **NF P 94-048**. Les teneurs en CaCO_3 des sédiments marins, d'argile et du sable sont présentées dans le tableau V.10. Selon la classification des échantillons

analysés, les sédiments sont moyennement calcaire (%CaCO₃ de 30 à 70%), l'argile est qualifié comme non calcaire (%CaCO₃ de 10 à 30%) ainsi que le sable.

Tableau V.10: Détermination du taux de carbonates de calcium pour les sédiments marins, l'argile de brique et le sable.

Matériaux	Volume (ml)	Caco ₃ %
Sédiments marins	55	50.9
Argile de brique	15	13.9
Sable	14.5	13.4

V.2.3 Analyse Environnementale

Afin d'évaluer l'impact environnemental des sédiments de dragage, plusieurs études ont été réalisées. Les mesures réalisées sur les sédiments du port de Bethioua et l'argile de brique montrent que la proportion des éléments traces est inférieure au niveau N1 et au niveau N2. Les éléments traces tels que le (Plomb, Mercure, Cadmium, Arsenic, Etain, Nitrite, Phénol et Hydrocarbure totaux) sont déterminés par une analyse directe par spectrométrie sur les matériaux solides. Ces analyses ont été réalisées au laboratoire AFAK.

Les résultats des analyses environnementales sont regroupés dans le tableau V.11. Ces résultats obtenus permettent de conclure que la comparaison des teneurs en métaux lourds des sédiments étudiés aux niveaux de référence (MATE, 1999) révèle que les sédiments du Port de Bethioua ne sont pas pollués. Les sédiments prélevés du port de Bethioua peuvent être réutilisés dans la formulation de nouveaux matériaux en génie civil et seraient d'un grand intérêt économique et écologique.

Tableau V.11: Niveaux relatifs aux éléments traces (en mg/kg de matériaux étudiés sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm), GEODE, (METL & MATE) (2000).

Métaux	Unités	Sédiments marins	Argile de brique	Niveau 1	Niveau 2
Plomb (Pb)	mg/kg	< 0.01	<0.01	100	200
Mercure (Hg)	mg/kg	< 0.01	<0.01	0.4	0.8
Chrome (Cr)	mg/kg	<0.005	<0.005	90	180
Cadmium (Cd)	mg/kg	< 0.01	< 0.01	1.2	2.4
Arsenic (As)	mg/kg	< 0.05	< 0.05	25	50
Etain	mg/kg	< 0.01	< 0.01	/	/
Nitrite	mg/kg	0.00	0.00	37	74
Phénol	mg/kg	0.017	0.017	/	/
Hydrocarbures totaux	mg/kg	1.010	0.441	/	/

V.2.4 Valeur au bleu de méthylène

Dans cette étude, l'essai au bleu de méthylène est réalisé selon la norme **NF P 94 068**. Les valeurs au bleu de méthylène et les classifications correspondantes attribuées aux sédiments du port de Bethioua et de l'argile de brique sont données dans le tableau V.12. A partir de ces résultats, il apparaît que les valeurs mesurées sur l'argile de brique est supérieure à celles mesurées sur les sédiments marins. Pour comparaison, les valeurs de VBS mesurées sur les sédiments du port de Bethioua étaient de l'ordre de 1.56 qui permet d'identifier le type de sol (Sol limoneux peu plastique). Les valeurs de VBS mesurées sur l'argile de brique étaient de l'ordre de 5.3 qui permet d'identifier le type de sol (Sol limono-argileux).

Tableau V.12: Valeurs au bleu de méthylène des sédiments marins et de l'argile de brique.

Matériaux	sédiments marins	Argile de brique
VBS %	1.56	5.3

V.2.5 Potentiel hydrogène (pH)

Le Potentiel hydrogène a été mesuré selon la norme **NF X31-103**. Les résultats du pH sont regroupés dans le tableau V.13 et montrent que le pH des sédiments marins et de l'argile de brique est basique.

Tableau V.13: Détermination du pH des sédiments marins et de l'argile de brique.

Matériaux	sédiments marins	Argile de brique
pH	8.7	8.1

V.2.6 Conductivité

La conductivité électrique a été mesurée avec une cellule conductimétrique étalonnée selon la norme **NF ISO 11625**. Les résultats obtenus des matériaux étudiés sont présentés dans le tableau V.14.

Tableau V.14: Détermination de la conductivité des sédiments marins et de l'argile de brique.

Matériaux	sédiments marins	Argile de brique
Conductivité	361 ms	169 μ s

V.2.7 Matières organiques

La matière organique des matériaux étudiés a été déterminée selon la norme **XP P94-047**. La teneur en matière organique de l'argile de brique est assez élevée comparée à celles de la teneur en matière organique des sédiments du port de Bethioua. Cela a un effet bénéfique sur la valorisation car la matière organique a une influence notable sur les propriétés du produit final. En effet, la forte teneur en matière organique peut engendrer des microfissures au sein de la brique ce qui affaiblit ses propriétés mécaniques. Les résultats obtenus des matériaux étudiés sont présentés dans le tableau V.15.

Tableau V.15: Détermination de la matière organique des sédiments marins et de l'argile de brique.

Matériaux	sédiments marins	Argile de brique
Matière organique %	1.88	3.66

V.3 Caractéristiques minéralogiques

Les propriétés minéralogiques ont été déterminées pour caractériser les sédiments marins du port de Bethioua et l'argile utilisé pour la fabrication des briques de Hassi ben okba. Les paramètres minéralogiques déterminés sont l'analyse par diffraction des rayons x (DRX) et l'analyse par spectroscopie infrarouge. Ces caractéristiques sont déterminées dans le laboratoire de chimie des polymères à l'université d'Oran 1 Ahmed ben Bella.

V.3.1 Analyse par diffraction des rayons x (DRX)

Les figures V.9, V.10 et V.11 présentent l'identification minéralogique effectuée à partir de l'analyse qualitative par DRX à l'aide du diffractomètre Bruker D8. Cette analyse a été effectuée pour les sédiments marins, l'argile et la barbotine de brique. Les résultats obtenus montrent que les sédiments marins, l'argile et la barbotine de brique contiennent une forte dominance de quartz (SiO_2) et contiennent des carbonates de calcium qui se présentent sous forme de (CaCO_3) et une présence de dolomite (le carbonate de calcium et de magnésium) sous forme de ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Une présence de Kaolinite a été détecté sous forme de ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) pour l'argile et la barbotine de brique. La composition minéralogique des matériaux étudiés confirme les résultats des essais géotechniques.

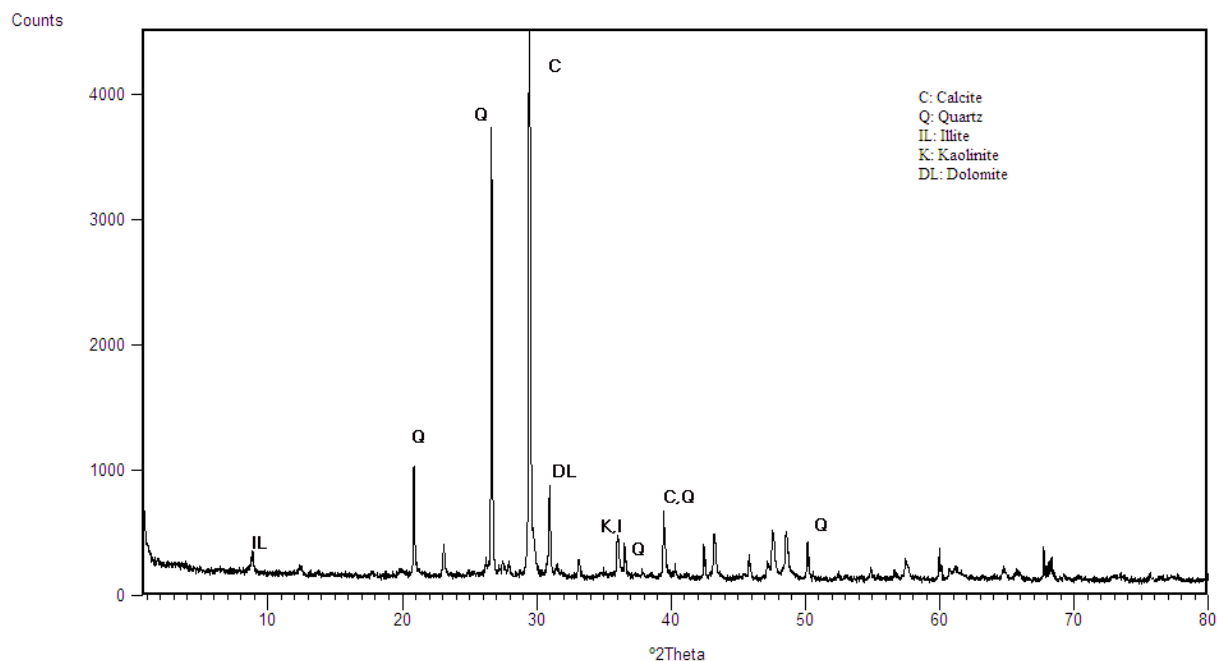


Figure V.9: Analyse minéralogique qualitative par diffraction des rayons X des sédiments marins.

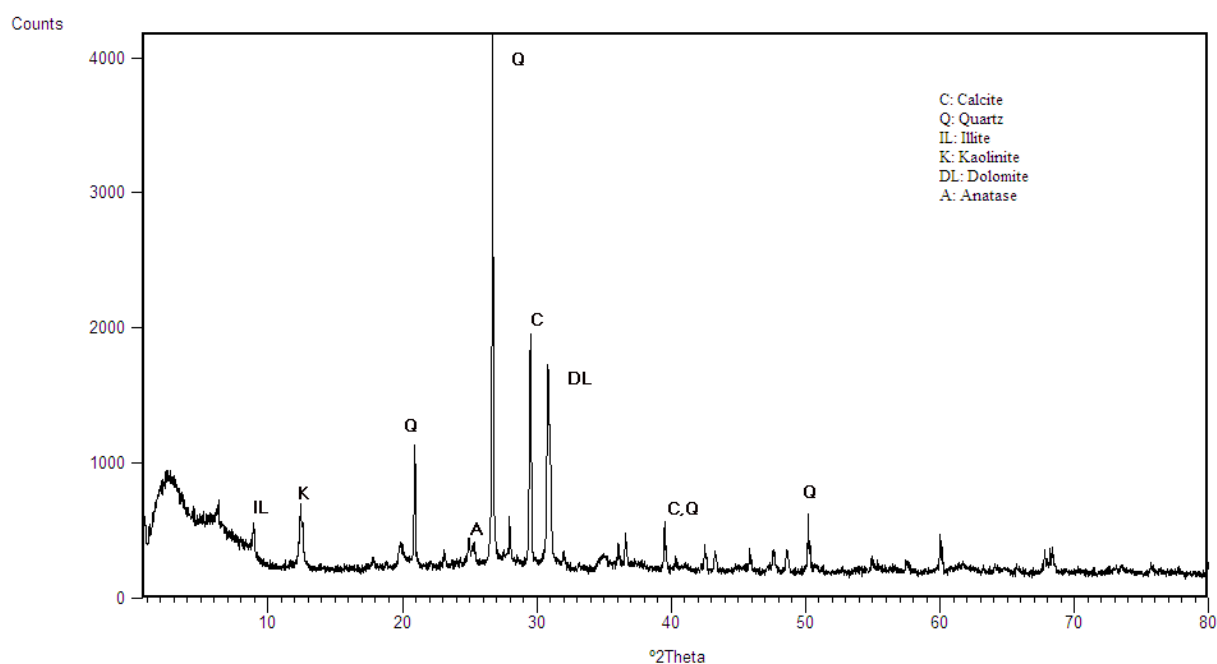


Figure V.10: Analyse minéralogique qualitative par diffraction des rayons X de l'argile de brique.

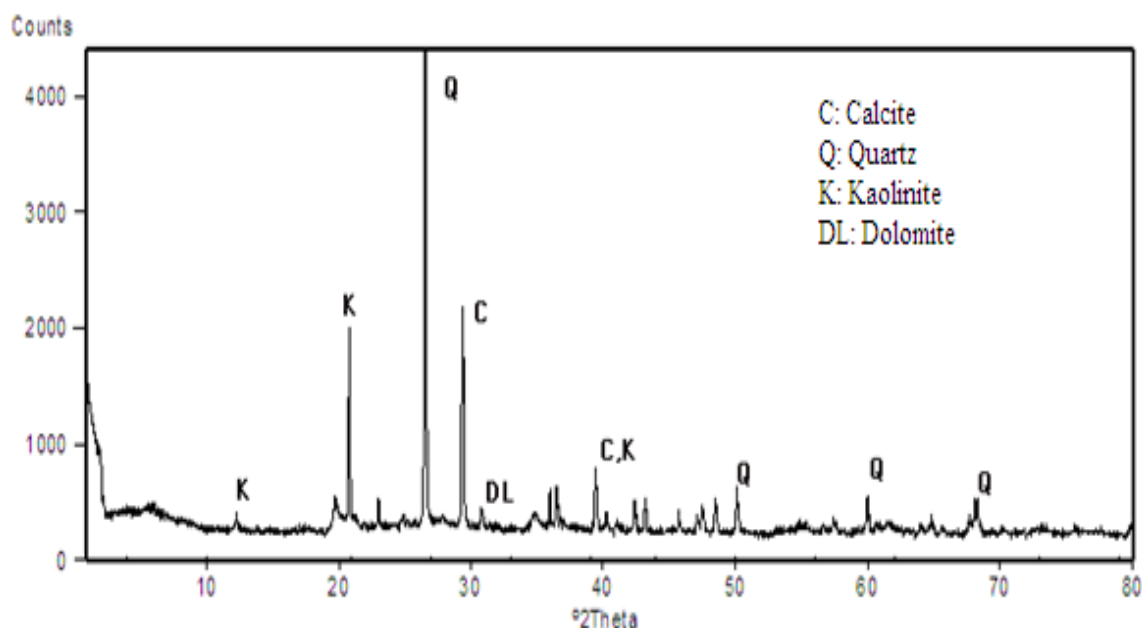


Figure V.11: Analyse minéralogique qualitative par diffraction des rayons X de la barbotine de brique.

V.3.2 Analyse par spectroscopie infrarouge

La figure V.13 présente l'identification minéralogique effectuée à partir de spectre infrarouge à l'aide d'un spectromètre IRTF BRUKER ALPHA avec module ATR Diamond (Figure V.12). Cette analyse a été effectuée pour les sédiments marins et l'argile de brique. Le spectre IR des sédiments marins montre que le pic 1020.79 cm^{-1} associé à une liaison Al-O qui se traduit par la présence des Alumines et le pic 1420 cm^{-1} associé à une liaison C-O. $600,700$ et 800 cm^{-1} correspondent aux vibrations d'élongation typiques des liaisons Al-O qui se traduit principalement par la faible présence de kaolinite. Le spectre IR de l'argile de brique montre que le pic 1000.79 cm^{-1} associé à une liaison Al-O qui se traduit par la présence des Alumines et le pic 1428 cm^{-1} associé à une liaison C-O. Entre 3088 et 3620 cm^{-1} vibration d'élongation des liaisons O-H est observé et l'apparition d'un pic à 3694 qui correspond à une bande des OH libres. $600,700$ et 800 cm^{-1} c'est les vibrations d'élongation typiques des liaisons Al-O.



Figure V.12: Spectromètre IRTF BRUKER ALPHA
avec module ATR Diamond (Source : Aiche. S, 2015).

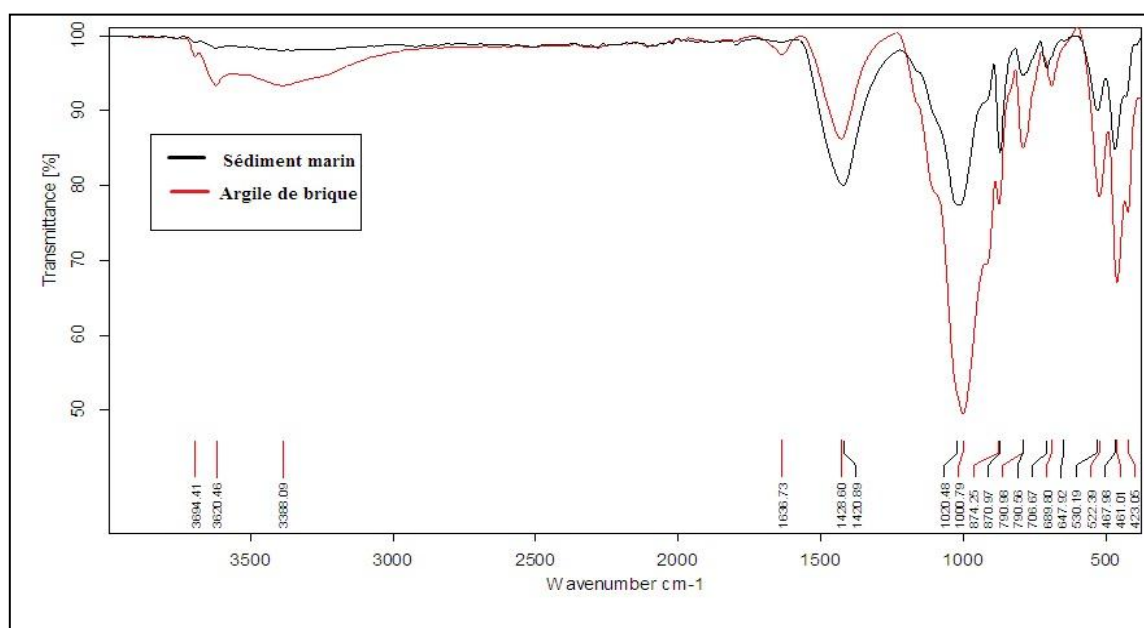


Figure V.13: Spectres IR de sédiments marins et de l'argile de brique.

V.4 Caractéristiques microscopiques

La caractérisation microscopique a été déterminée pour les sédiments marins du port de Bethioua, de l'argile utilisé pour la fabrication des briques de Hassi ben okba et de la barbotine de brique. Ces caractéristiques sont déterminées dans laboratoire de microscopie à l'université d'USTO-MB.

V.4.1 Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)

L'observation au microscope électronique à balayage de type de JSM 6610LVL a mis en évidence la présence d'un produit blanc dans les sédiments marins. Ce produit observé peut être dû aux taux élevés en sel minéraux qui a été détecté par la valeur importante de la conductivité qui est plus élevée par rapport à celle de l'argile et de la barbotine de brique. Les grains sont souvent poreux, ils ont des formes très variables, quelques fois sphériques mais la plupart du temps irréguliers sans contours définis. On remarque aussi dans les figures V.14, V.15 et V.16 que les grains sont de forme et de taille très variables, ils sont formés par l'agglomération des grains de plus petites tailles qui est de l'ordre de 1 μm .

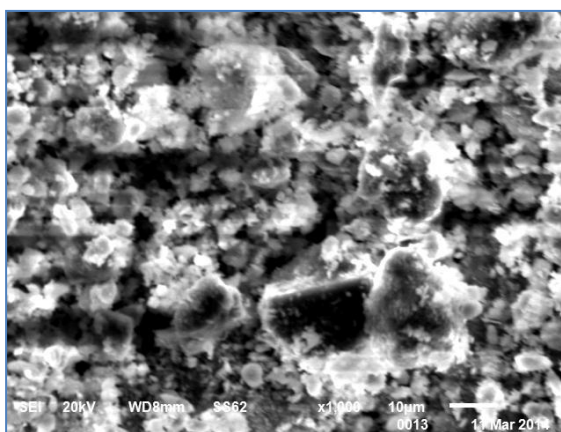


Figure V.14: MEB des sédiments marins

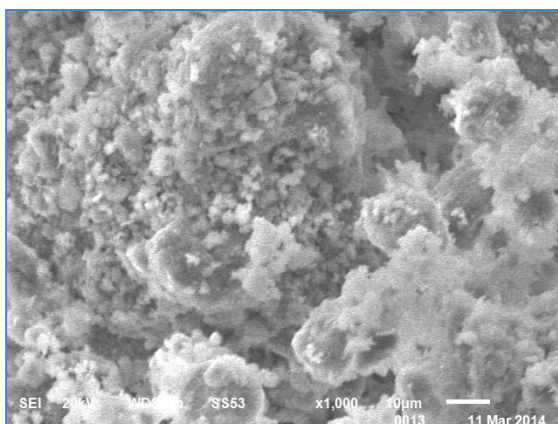


Figure V.15: MEB de l'argile de brique.

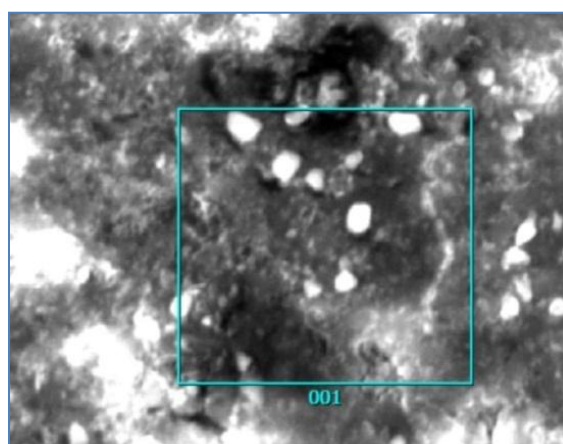


Figure V.16: MEB de la barbotine de brique.

V.5 Caractéristiques rhéologiques

Cette partie d'étude est consacrée à la caractérisation rhéologique des sédiments marins, de l'argile et de la barbotine de brique. L'étude rhéologique a été effectuée pour différentes concentrations massiques à l'aide d'un rhéomètre (RheoStress RS600 Thermo Haake) à vitesse imposée. La géométrie cylindre coaxiaux (Z40 DIN) dont l'entrefer de 8 mm a été utilisée. Les propriétés rhéologiques ont été déterminées par l'essai d'écoulement qui donne la courbe rhéologique qui présente l'évolution de la contrainte de cisaillements en fonction de la vitesse de cisaillements. Les essais ont été effectués au laboratoire de rhéologie, transport et traitement des fluides complexes (Université USTO, Algérie).

V.5.1 Matériels et méthode

1. Préparation des échantillons

Les matériaux étudiés sont sous forme de poudre, ils ont été placés dans une étuve pendant 24 heures à 105°C, puis broyés et passés au tamis de 200 µm pour les sédiments marins et la barbotine de brique. L'argile de brique a été tamisée par un tamis de 80 µm. Le choix de la géométrie de mesure a été déterminé à partir du diamètre de la plus grosse particule D_{95} qui a été donné par l'analyse granulométrique. Cependant, l'entrefer de cette géométrie (cylindre coaxiaux) est de l'ordre de 8 mm. Des essais préliminaires ont été effectués pour le choix de la rampe de vitesse et le temps de mesure pour atteindre le régime permanent.

2. Essais d'écoulement

Les trois matériaux (argile, barbotine et sédiments marins) ont été étudiés à différentes concentrations massiques de 10 à 55% à température ambiante de 20°C en utilisant un bain thermostatique de type (DC30). L'homogénéisation parfaite a été atteinte en agitant les mélanges respectifs (argile+eau, sédiments marins+eau, barbotine+eau) pendant 24 heures avec un agitateur magnétique. Une plage de vitesse de 150 à 0.02 s⁻¹ a été imposée aux échantillons en régime stationnaire. Les figures V.20, V.21 et V.22 montrent l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction de la vitesse de cisaillement (γ). D'après ces résultats on remarque l'augmentation de la contrainte de cisaillement en fonction de la concentration massique des échantillons. Ces courbes rhéométriques sont modélisées par le modèle d'Herschel- Bulkley (Equation V.1) pour les trois matériaux. Il s'agit de l'équation citée par (Benyerou et al, 2016).

$$\tau = \tau_0 + K\gamma^n \dots\dots\dots (V.1)$$

Avec : τ_0 le seuil d'écoulement (Pa), K : indice de consistance (Pa.sn) et n indice d'écoulement (-), la vitesse de cisaillement (S⁻¹).

Les tableaux V.17, V.18 et V.19 présentent les paramètres rhéologiques de différentes concentrations et le pH de chaque concentration. On remarque que l'augmentation de la

concentration massique en particule solide provoque une augmentation du seuil et de la consistance et en revanche une diminution de l'indice d'écoulement pour les sédiments marins, l'argile et la barbotine de brique est observée. On remarque aussi que le pH augmente en fonction de l'ajout en concentration massique de sédiments marins en revanche le pH diminue en fonction de l'ajout en concentration massique de l'argile ainsi que la barbotine de brique. L'augmentation de la contrainte de cisaillement avec les diamètres des particules peut être liée à l'interaction entre le diamètre et les charges négatives des surfaces des particules solide (Hammadi. L, 2013).

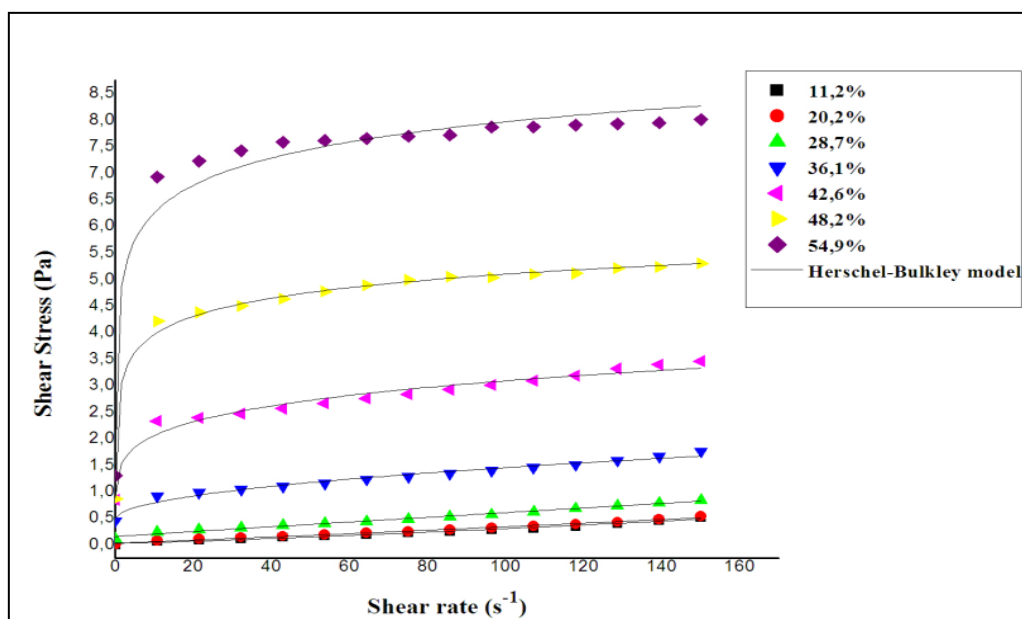


Figure V.17: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des sédiments marins.

Tableau V.16: Paramètres rhéologiques des sédiments marins.

Sédiments marins						
Cm (%)	Modèle calé	PH	τ_0 (pa)	K (pa.s ⁿ)	n	R
11.2	Herschel-Bulkley	8.65	0.035	0.001	1.229	0.993
20.2	Herschel-Bulkley	8.84	0.038	0.002	1.082	0.994
28.7	Herschel-Bulkley	9.07	0.168	0.005	0.972	0.995
36.1	Herschel-Bulkley	9.10	0.529	0.088	0.528	0.988
42.6	Herschel-Bulkley	9.15	0.572	0.096	0.237	0.986

48.2	Herschel-Bulkley	9.17	0.548	0.602	0.008	0.994
54.9	Herschel-Bulkley	9.28	1.250	1.220	0.005	0.991

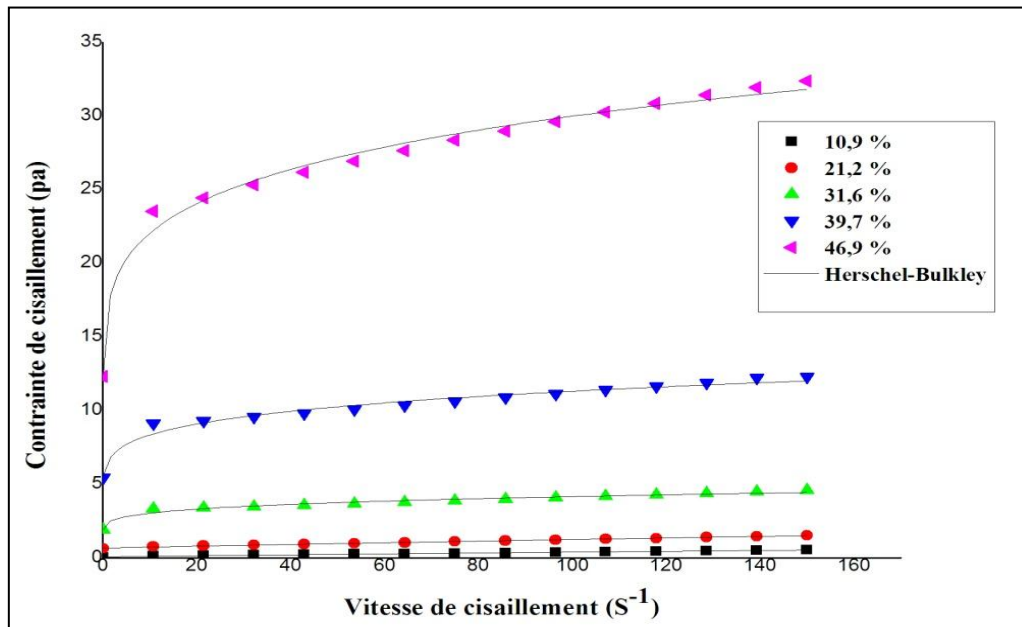


Figure V.18: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement de l'argile de brique.

Tableau V.17: Paramètre rhéologiques de l'argile de brique.

Argile de brique						
Cm (%)	Modèle calé	PH	τ_0 (pa)	K (pa.s ⁿ)	n	R
10.9	Herschel-Bulkley	8.26	0.061	0.005	0.976	0.997
21.2	Herschel-Bulkley	7.93	0.670	0.007	0.875	0.998
31.6	Herschel-Bulkley	7.73	0.982	0.673	0.579	0.985
39.7	Herschel-Bulkley	7.64	1.293	1.710	0.317	0.987
46.9	Herschel-Bulkley	7.57	1.820	2.866	0.120	0.993

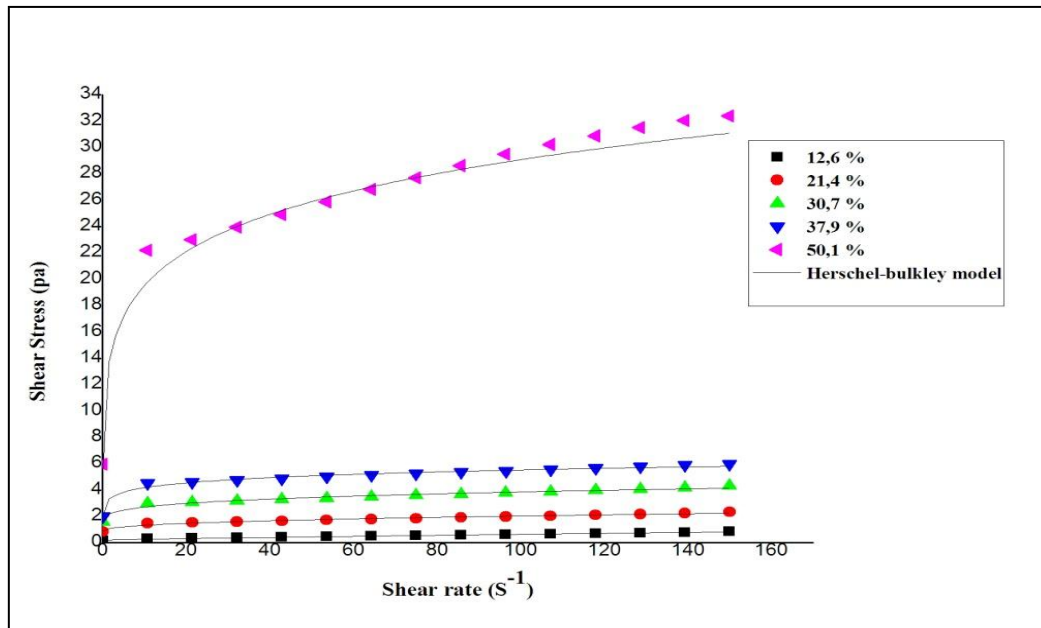


Figure V.19: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement de la barbotine de brique.

Tableau V.18: Paramètres rhéologique de la barbotine de brique.

Barbotine de brique						
Cm (%)	Modèle calé	PH	τ_0 (pa)	K (pa.s ⁿ)	n	R
12.6	Herschel-Bulkley	7.91	0.180	0.008	0.842	0.997
21.4	Herschel-Bulkley	7.86	0.505	0.193	0.629	0.986
30.7	Herschel-Bulkley	7.83	0.817	0.544	0.571	0.988
37.9	Herschel-Bulkley	7.78	1.049	0.967	0.394	0.993
50.1	Herschel-Bulkley	7.70	1.323	1.359	0.117	0.996

Conclusion

Le but de ce chapitre était d'étudier les caractéristiques physico-chimique, minéralogique, microscopique et rhéologique des sédiments marins, de l'argile et de la barbotine de brique. Les sédiments du port de Bethioua sont des limons peu plastiques et sont majoritairement constitués de sable. D'après les résultats physiques, on distingue que les sédiments marins ont des caractéristiques presque confondues avec les caractéristiques de la

barbotine de brique. On note aussi que la présence de la matière organique dans les sédiments est faible par rapport à sa présence dans l'argile de brique.

La caractérisation chimique des sédiments a permis d'évaluer leur potentiel de valorisation avec la nécessité à mélanger ces sédiments marins avec l'argile de briques pour garder la plasticité. D'après les résultats de l'analyse environnementale, on note que les sédiments de dragage du port de Bethioua présentent un taux faible en hydrocarbures et une absence de pollution métallique.

La caractérisation minéralogique a montré une présence majoritaire de quartz et de calcite dans les sédiments marins, dans l'argile et dans la barbotine de brique.

La caractérisation rhéologique donne une idée sur le transport des sédiments marins par des moyens hydrauliques. Par la suite, les courbes d'écoulement sont bien décrites par le modèle de Herschel Bulkey. Bien que, l'étude rhéologique nous aide pour avoir une idée sur la valorisation des sédiments et nous a permis de déterminer la composition idéales pour la fabrication des briques donc il sera nécessaire de caractérisé ces matériaux à l'état brut de point de vue rhéologique.

Ainsi, les sédiments du port de Bethioua peuvent être incorporés dans la formulation d'un nouveau matériau sans traitement. Dans la suite de cette étude, la faisabilité de la valorisation des sédiments dans la fabrication des briques est étudiée

Chapitre VI : Valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques

Introduction

D'après les caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et rhéologiques de sédiments marins déterminées dans le chapitre précédant, les sédiments du port de Bethioua peuvent être valorisés dans le domaine de la fabrication des briques. L'objet de ce chapitre est de confirmer ce résultat par des tests mécaniques, les sédiments du port de Bethioua sont incorporés dans la formulation des briques. Cette valorisation permet, d'une part, de gérer les grands volumes des sédiments stocker dans le port de Bethioua et, d'autre part, de diminuer les besoins en matériaux extraits des carrières. Ces essais ont été réalisés dans plusieurs laboratoires internes de notre université USTO-MB (laboratoire de MDS, de traitement thermique et laboratoire de rhéologie) et externes (laboratoire de CTH, LAFARGE et laboratoire de Saffesc).

VI.1 Préparation des barbotines sans et avec des sédiments marins

PROMAG utilise comme matière première 75% d'argile et 25% du sable de Mostaghanem. L'objectif de cette phase était de caractériser le comportement des briques produites à base de sédiments marins en fonction du taux de substitution. Quatre mélanges ont été préparés. Leurs compositions sont données dans le tableau VI.1 ainsi que leurs codes d'identification. La quantité de sable est fixée (25 %) pour tous les mélanges, tandis que la proportion des sédiments change de 0 à 20 % avec un pas de 5%.

Les sédiments marins avant d'être introduit dans le mélange de référence ont été séchés et broyée. Le mélange a été réalisé au moyen d'un malaxeur électrique ou les trois matériaux (argile, sable et sédiments marins) ont été mélangés à sec pendant 15 minutes. Les sédiments marins ont été incorporés dans la barbotine de briques avec différentes proportions s'étendant de 5 à 20 % avec un pas de 5% sur la masse sèche en tant que remplacement de

l'argile utilisée pour la fabrication des briques. Le choix du pourcentage des sédiments valorisés doit être confirmé par des analyses et des tests mécanique et comparant les résultats trouvés aux normes et aux exigences de briqueterie.

Tableau VI.1: Formulations avec ajout de sédiments marins de 0 à 20%.

	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

VI.2 Caractéristiques physiques des barbotines sans et avec des sédiments marins

Les propriétés physiques ont été déterminées pour caractériser la barbotine de brique utilisé dans la fabrication des briques de Hassi ben okba et les barbotines à base de sédiments marins du port de Bethioua. Les paramètres physiques déterminés sont l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg. Ces caractéristiques sont déterminées dans le laboratoire de MDS du département d'hydraulique de l'université, le laboratoire de CTH et la cimenterie de LAFARGE.

VI.2.1 Etude granulométrique des mélanges

Les pourcentages de la répartition granulométrique de différentes formulations à base de sédiments du port de Bethioua et de la barbotine de brique sont donnés dans le tableau VI.2. Afin de donner des explications à ce phénomène, on a présenté les courbes granulométriques effectuées par un granulomètre laser.

La figure VI.1 montre les résultats des analyses granulométriques de quatre différentes formulations de brique à base de sédiments marins et de la barbotine de référence. Cet essai a permis d'évaluer le changement de granulométrie subit par les sédiments qui vont être utilisés dans la confection des éprouvettes de briques. Les courbes granulométriques

résultant de cet analyse est la moyenne de 3 essais. D'après cette analyse on note que les quatre formulations et la barbotine de référence sont considérées comme des limons sableux. Le diamètre médian (D_{50}) de ces concentrations est entre 35 et 90 μm et le diamètre à travers lequel passe 95% des particules de ces formulations est égal à 400 μm . On remarque que l'allure des distributions granulométriques de la barbotine de référence et celles avec des ajouts en sédiments marins sont semblable et leur propriétés granulométriques sont presque identiques.

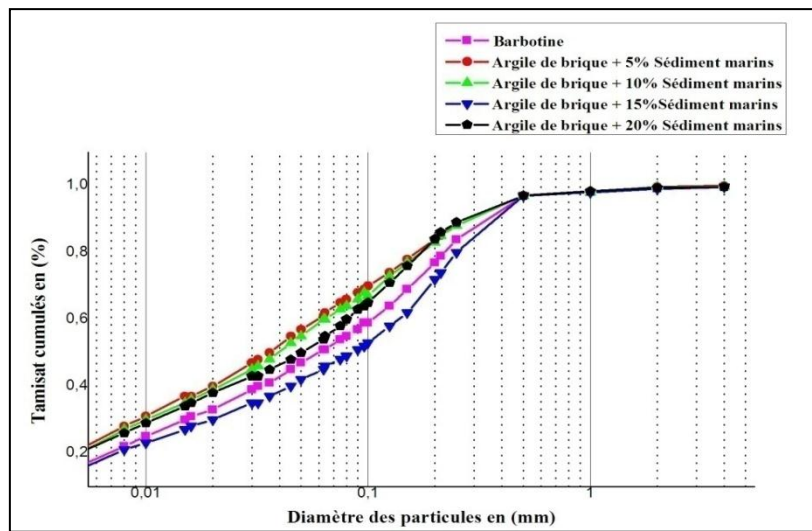


Figure VI.1: Courbes granulométrique de la barbotine de brique et de la barbotine à base des sédiments marins.

Tableau 1: Répartition granulométrique en % des formulations.

	Gros sable $2 < d < 0.2 \text{ (mm)}$	Sable fin $0.2 < d < 0.063 \text{ (mm)}$	Limon $0.063 < d < 0.002 \text{ (mm)}$	Argile $d < 0.002 \text{ (mm)}$
Barbotine	8	47	40	5
Formulation 1	18	22	38	22
Formulation 2	18	22	39	21
Formulation 3	29	26	28	17
Formulation 4	16	29	33	22

VI.2.2 Etude de la plasticité des mélanges

Les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité de différentes formulations à base de sédiments du port de Bethioua et de la barbotine de référence sont donnés dans le tableau VI.3. Afin de donner des explications plus précises à ce phénomène, on a procédé par les limites d'Atterberg et déterminer l'effet des sédiments sur la plasticité du mélange en mesurant l'indice de plasticité IP. Ces résultats montrent que les quatre formulations et la barbotine sont peu plastiques et ont presque le même indice de plasticité IP. On note aussi que les limites de liquidité et de plasticité des quatre formulations sont comparables par rapport aux limites de la barbotine de référence.

Tableau VI.3: Limites d'Atterberg, indice de plasticité des formulations.

	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)	Plasticité
Barbotine	35.5	17.4	18.1	Peu plastique
Formulation 1	38.5	19.7	18.8	Peu plastique
Formulation 2	37.3	18.0	19.3	Peu plastique
Formulation 3	34.4	17.8	16.5	Peu plastique
Formulation 4	32.9	17.4	15.6	Peu plastique

VI.3 Caractéristiques chimiques des barbotines sans et avec des sédiments marins

Les propriétés chimiques ont été déterminées pour caractériser la barbotine de brique utilisé dans la fabrication des briques de Hassi ben okba et les barbotines à base de sédiments marins du port de Bethioua. Les paramètres chimiques déterminés sont l'analyse chimique par fluorescence des rayons x et la conductivité électrique. Ces caractéristiques sont déterminées dans le laboratoire de la cimenterie LAFARGE et le laboratoire de CTH.

VI.3.1 Analyse chimique par fluorescence des rayons x

La caractérisation chimique a été déterminée par fluorescence des rayons x pour les quatre différentes formulations de brique à base de sédiments marins et pour la barbotine de référence. Le tableau VI.4 présente la composition chimique en éléments majeurs. Les résultats expérimentaux montrent que pour la première formulation (F1) y a une saturation maximale de la monocouche qui peut être due à une distribution des sites actifs d'adsorption sur la surface du matériau solide. La capacité d'adsorption qui correspond à une saturation maximale de la monocouche d'argile de brique en éléments majeurs dans les mélanges. Cette capacité d'adsorption est plus importante pour un ajout de 5% de sédiments marins que pour les autres formulations. On remarque que la présence d'alumine et de silice est plus importante pour la barbotine de référence et celles avec des ajouts. On note aussi que tous les oxydes ont des valeurs presque comparables pour les quatre différentes formulations de brique à base de sédiments marins et pour la barbotine de référence. Les sédiments marins sont en majeure partie constitués du calcium (CaO) ce qui favorise l'augmentation de calcium en fonction de l'ajout en sédiment.

Tableau VI.4: Composition chimique en éléments majeurs dans les mélanges de barbotine.

Paramètres en (%)	Symbole	Barbotine	F 1	F 2	F 3	F 4
La silice	SiO_2	54.8	50.5	50.9	50.6	49.9
L'alumine	Al_2O_3	12.7	12.9	12.2	11.7	10.9
L'oxyde de fer	Fe_2O_3	5.41	5.36	5.12	5.17	5.03
Le Calcium	CaO	9.86	11.8	12.9	13.2	14.4
La magnésite	MgO	2.45	2.46	2.41	2.37	2.29
Le sulfate	SO_3	0.57	0.77	0.59	0.62	0.60
Potassium	K_2O	2.04	2.08	1.94	1.97	1.89
L'oxyde de sodium	Na_2O	0.55	0.56	0.58	0.58	0.58

VI.3.2 Etude de la conductivité des mélanges

La conductivité électrique a été mesurée pour quatre différentes formulations de brique à base de sédiments marins et pour la barbotine de référence. Les résultats obtenus des matériaux étudiés sont présentés dans le tableau VI.5. Les sédiments marins ont un taux élevés en sel minéraux ce qui favorise l'augmentation de la conductivité en fonction de l'ajout en sédiment.

Tableau VI.5: Détermination de la conductivité des formulations.

Matériaux	Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)
Barbotine	270
Formulation 1	300
Formulation 2	320
Formulation 3	340
Formulation 4	390

VI.4 Caractéristiques rhéologique des barbotines sans et avec des sédiments marins

VI.4.1 Influence des sédiments marins sur les rhéogrammes

Cinq concentrations massiques ont été utilisées pour effectuer les essais rhéologiques. Les quatre différentes formulations de brique à base de sédiments marins et la barbotine de référence ont été étudiées à une concentration massique de 30% à température ambiante de 20°C en utilisant la géométrie de mesure cylindre coaxiaux avec un bain thermostatique de type (DC30). L'homogénéisation parfaite a été atteinte en agitant les mélanges respectifs (argile+sable+sédiments+eau) pendant 24 heures avec un agitateur magnétique. Une plage de vitesse de cisaillement de 150 à 0.02 s^{-1} a été imposée aux échantillons en régime stationnaire. La Figure VI.2 montre l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction de la vitesse de cisaillement (γ) pour des barbotines sans et avec des sédiments marins, Les différentes mesures sont traitées à l'aide d'un logiciel Rhéowin du rhéomètre RS 600. On

remarque que les courbes rhéométriques sont modélisées par Le modèle d'Herschel- Bulkley (Équation VI.1) pour les cinq concentrations. Il s'agit de l'équation citée par (Benyerou et al, 2016).

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \dots\dots\dots \text{VI.1}$$

Avec : τ_0 le seuil d'écoulement (Pa), K : indice de consistance (Pa.sn) et n indice d'écoulement (-), la vitesse de cisaillement (S^{-1}).

Le tableau VI.6 présente les paramètres rhéologiques de différentes formulations ainsi que le pH de chaque formulation. On remarque que l'augmentation de la concentration massique en particule solide des sédiments provoque une augmentation du seuil pour un ajout de 5 et 10% en sédiments puis une diminution de seuil pour un ajout de 15% en sédiments jusqu'à le seuil de la barbotine de référence et finalement la contrainte seuil chute pour un ajout de 20% en sédiments. On note aussi que la consistance augmente en fonction des ajouts en sédiments en revanche une diminution de l'indice d'écoulement en fonction des ajouts en sédiments. On remarque aussi que le pH diminue pour un ajout de 5 et 10% par rapport à la barbotine de référence puis augmente pour un ajout de 15 et 20%.

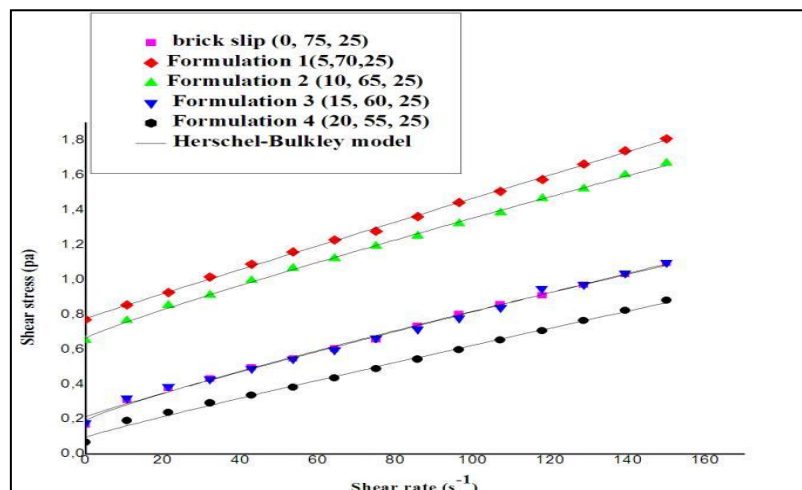


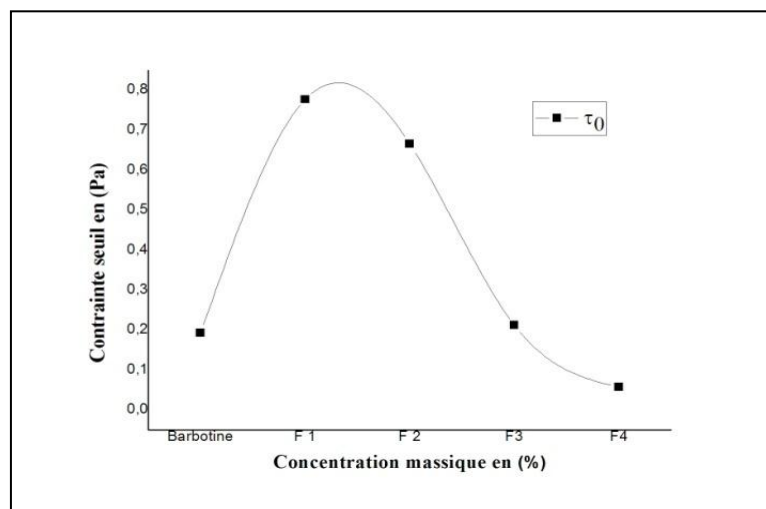
Figure VI.2: Courbe d'écoulement de la barbotine de brique et les barbotines avec ajout des sédiments marins.

Tableau VI.6: Paramètres rhéologiques des formulations.

Matériaux	Modèle calé	PH	τ_0 (pa)	K (pa.s ⁿ)	n	R
Barbotine	Herschel-Bulkley	7.73	0.192	0.007	0.978	0.998
Formulation 1	Herschel-Bulkley	7.65	0.777	0.008	0.924	0.998
Formulation 2	Herschel-Bulkley	7.65	0.665	0.010	0.898	0.999
Formulation 3	Herschel-Bulkley	7.90	0.212	0.010	0.868	0.997
Formulation 4	Herschel-Bulkley	8.05	0.056	0.011	0.865	0.998

VI.4.2 Influence des sédiments marins sur la contrainte seuil

La figure VI.3 montre l'évolution de la contrainte seuil en fonction de différentes concentrations d'ajouts en sédiments marins. On remarque que les barbotines à base de 5% et 10% de sédiments marins donnent une contrainte seuil nettement plus élevée par rapport à la barbotine de référence (de l'ordre de quatre fois). Pour la concentration en sédiments marins de 20%, la contrainte seuil chute jusqu'à une valeur de quatre fois plus petite que celle de la barbotine de référence.

**Figure VI.3:** Evolution de la contrainte seuil en fonction de concentration massique.

VI.4.3 Influence des sédiments marins sur la consistance et l'indice de fluidité

La figure VI.4 montre l'évolution de la consistance (K) et de l'indice de fluidité (n) des barbotines en fonctions des concentrations en ajouts des sédiments. Les résultats obtenus montrent une augmentation significative de la consistance lorsque la concentration en ajouts augmente, en revanche une diminution de l'indice de fluidité est observée.

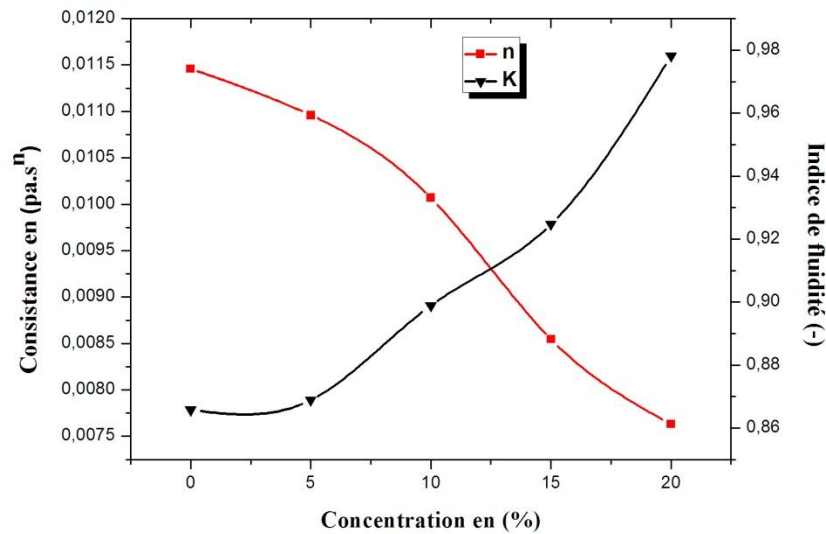


Figure VI.4: Evolution de la consistance et de l'indice de fluidité des barbotines en fonction des concentrations en ajout des sédiments marins.

VI.5 Façonnage des éprouvettes des barbotines sans et avec des sédiments marins

Le façonnage a pour but de donner à la pâte une cohésion suffisante et la forme désirée pour le produit. Avant d'être introduit les sédiments marins dans le mélange, l'argile a été séchée, concassée et broyée. La barbotine de référence est séchée, broyée et tamisée par un tamis de 2 mm. La poudre produite est utilisée pour fabriquer les éprouvettes. Le mélange des barbotines à base des sédiments marins a été réalisé au moyen d'un malaxeur électrique ou les trois matériaux (Argile+sable+sédiments marins) ont été d'abord mélangés à sec pour une quantité de 100 g de mélange pendant 15 minutes. Cette durée est suffisante pour assurer une bonne homogénéité du mélange. Ensuite une quantité suffisante d'eau a été ajoutée pour

amener le mélange au même état plastique que la pâte de la brique de Hassi ben okba. Le contrôle de l'humidité est fondamental dans le façonnage pour assurer la constance des propriétés mécaniques du mélange. L'humidité initiale peut varier en fonction des conditions de stockage et des conditions atmosphériques. On travaille généralement avec des concentrations d'eau entre 10 et 16 % (par rapport au poids sec). Cette teneur est utilisée dans la briqueterie de PROMAG (Hassi ben okba). D'après avoir étudié l'influence de la teneur en eau sur la résistance on a trouvé que la teneur en eau idéale pour la confection des éprouvettes de briques qui donne meilleure résistance est 14%.

La confection des éprouvettes de briques de référence et des éprouvettes de briques à base des sédiments de forme cylindrique ont été préparées. Les éprouvettes de briques produites ont ensuite été soumises à des essais de résistance à la compression.

VI.5.1 Méthode de compaction et conception des éprouvettes

Les éprouvettes de briques ont été préparées au moyen d'un triaxial. Les échantillons de barbotine ont été mélangés à une quantité déterminée d'eau dans un malaxeur pendant 15 minutes. Pour finir, le matériau humide est introduit dans un moule cylindrique creux de dimension 2 cm de diamètre et 4 cm de hauteur. Ensuite on fait le compactage en appliquant une force de pression de 100 bars. Le matériau est compacté verticalement en partie haute et en partie basse au moyen de deux pistons cylindriques. (Figure VI.5). Après compaction, toutes les éprouvettes sont placées dans une enceinte de séchage (40°C).



Figure VI.5: Préparation en laboratoire des éprouvettes de brique.

VI.5.2 Séchage et cuisson des éprouvettes de brique

Le choix de la température de cuisson est très important pour avoir un produit final confort aux normes et aux exigences de briqueterie. Le séchage est une phase délicate et importante de la fabrication qui peut influencer sur la qualité des briques. Les éprouvettes de briques ont été cuites à des températures comprises entre 600 et 900°C avec un pas de 100°C. Ces éprouvettes ont été cuites dans un four avec une durée de cuisson variable de l'ordre de 6h et de 24 heures.

La cuisson à des températures élevées (900°C et plus) permet aux briques d'avoir leurs véritables propriétés céramiques. La cuisson des briques a été réalisée dans un four électrique à moufle au laboratoire de MDS au niveau de département d'hydraulique et au laboratoire de Traitement Thermique au niveau de département de métallurgie. Le programme de cuisson été de l'ordre ou la température augmente pour atteindre une température de 900 °C pendant 4 heure, un maintien de 6 heure avec cette température puis une descente de température jusqu'à la température ambiante avec une durée de 3 à 4 fois la montée. Suivant une courbe bien déterminée et pendant une période de cuisson bien déterminée aussi. La courbe de cuisson est donnée dans la figure VI.6. Ensuite ces éprouvettes de briques produites ont été conservées et soumises à des essais de résistance à la compression.

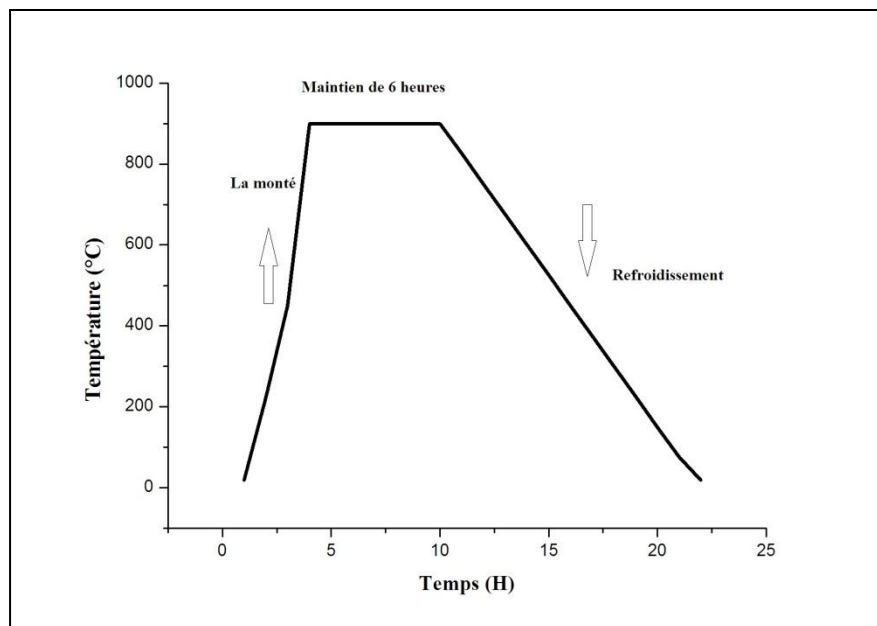


Figure VI.6: Courbe de cuisson, variation de la température en fonction du temps.

VI.6 Etude de la résistance et de la qualité de produit fini

VI.6.1 Résistance en compression

La résistance en compression est une caractéristique qui permet de déterminé la capacité d'un matériau à être employé dans la construction, on la considère comme un bon indicateur de qualité. Afin d'être caractérisées, les éprouvettes de briques produites ont subi des tests de résistance a la compression. Les essais de compression simple ont été réalises au

moyen d'une presse mécanique au laboratoire de CTH et au laboratoire de Saffesc sur des éprouvettes cylindriques cuites. La vitesse de déplacement est de l'ordre de 0.19 KN/S.

➤ **Etude de la résistance en compression pour une durée de cuisson de 6 heures et de 24 heures**

L'essai a été réalisé sur les éprouvettes de briques de référence et sur les éprouvettes de briques à base de 5, 10, 15 et 20% en sédiments marins du port de Bethioua. La cuisson a été effectuée pour ces éprouvettes avec une température de 600, 700, 800 et 900°C pendant 6 heures comme première étude et une durée de cuisson de 24 heures comme deuxième étude. Il consiste à casser ces éprouvettes de brique sous une charge de compression différente. Ensuite ces éprouvettes ont été placées entre les plateaux d'une machine d'essai (presse de compression) et chargée en compression perpendiculairement à sa face de pose jusqu'à rupture (Figure VI.7). La figure VI.8 présente l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température pour la barbotine de brique et pour la barbotine de brique à base de sédiments marins avec une durée de cuisson de 6h. La charge maximale atteinte est notée 38 MPA. Les résultats présentés sur la figure précédente sont rassemblés sur le tableau VI.7. La figure VI.9 présente l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température pour la barbotine de brique et pour la barbotine de brique à base de sédiments marins avec une durée de cuisson de 24h. La charge maximale atteinte est notée 29 MPA. Les résultats présentés sur la figure précédente sont rassemblés sur le tableau VI.8. Suivant la norme française NF EN 13-304 qui établit 4 catégories de résistance, les briques produites se classent dans la catégorie BP300 dont les critères sont une résistance moyenne supérieure à 30 MPa et une résistance minimale supérieure à 24 MPa.

En faisant la comparaison entre l'étude rhéologique et l'étude mécanique, On remarque que les allures des résistances à la compression en fonction de la température pour les briques de référence et les briques à base des sédiments marins avec une durée de cuisson de 6 heures suivent la même variation que la courbe d'écoulement des briques de référence et des briques à base des sédiments marins.

On peut conclure que l'influence des sédiments marins sur la résistance à la compression est la même que sur la contrainte seuil. Enfin on peut dire qu'il y a une relation entre l'étude rhéologique (La contrainte seuil) et l'étude mécanique (Résistance à la compression).

L'augmentation de résistance pour un ajout de 5% en sédiments est expliquée chimiquement. D'après la caractérisation chimique des différentes formulations, on note bien que pour la première formulation (F1) il y a une saturation maximale de la monocouche qui peut être due à une distribution des sites actifs d'adsorption sur la surface du matériau solide. La capacité d'adsorption correspondante à une saturation maximale de la monocouche d'argile de brique en éléments majeurs dans les mélanges. Cette capacité d'adsorption est plus importante pour un ajout de 5% en sédiments marins que pour les autres formulations.



Figure VI.7: Echantillons de brique après le test de compression.

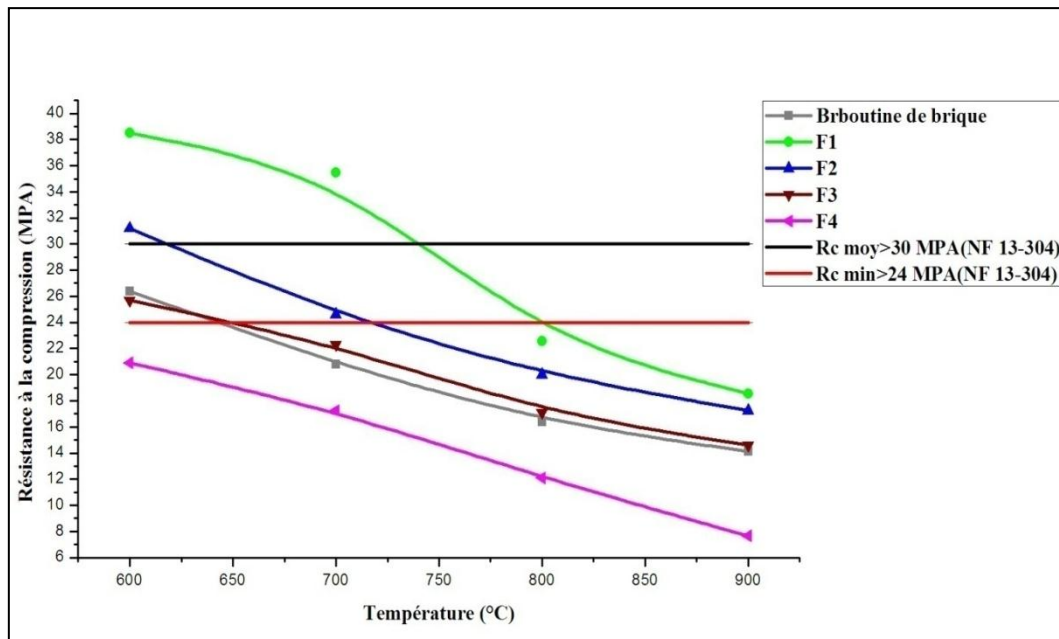


Figure VI.8: Résistance en compression en fonction de la température pour la brique de référence et les briques à base des sédiments marins avec une durée de cuisson de 6h.

Tableau VI.7: Résistance en compression en fonction de la température pour les barbotines sans et avec les sédiments marins pour une durée de cuisson de 6h.

Temps (h)	Température °C	Résistance en compression (MPa)				
		Barbotine	F1	F2	F3	F4
6	600	26,4	38,5	31,2	25,7	20,9
	700	20,8	35,5	24,6	22,3	17,3
	800	16,4	22,6	20	17,1	12,1
	900	14,1	18,6	17,3	14,6	7,66

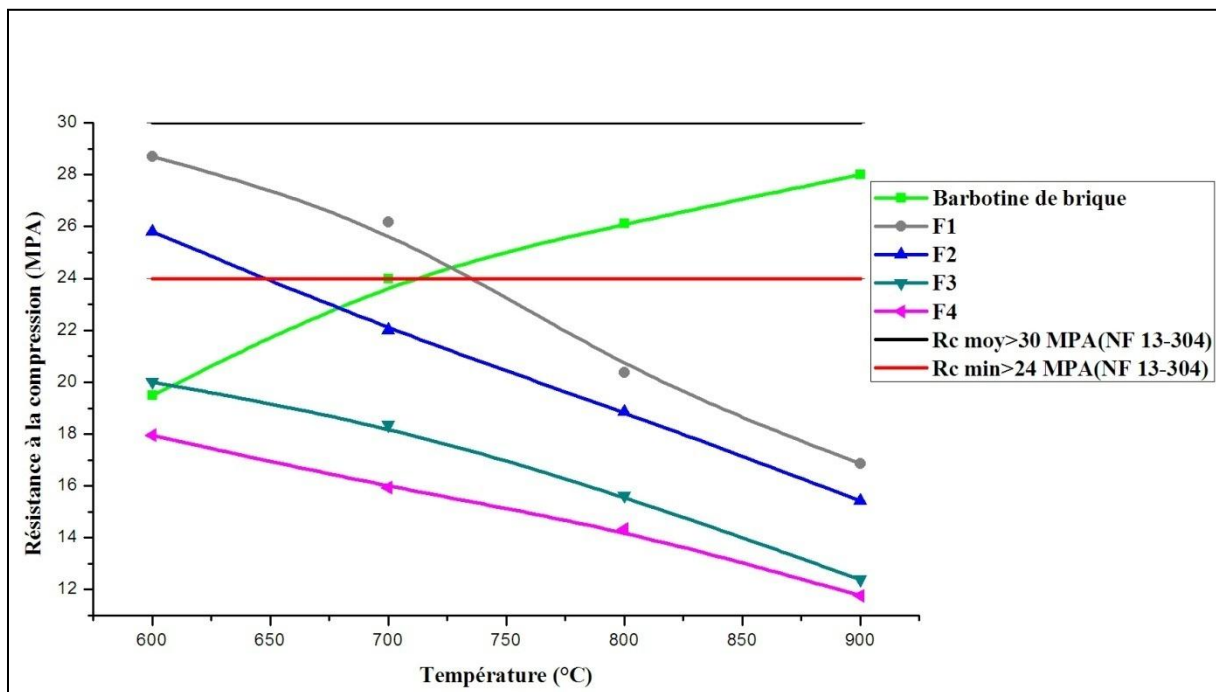


Figure VI.9: Résistance en compression en fonction de la température pour la brique de référence et les briques à base de sédiments marins avec une durée de cuisson de 24h.

Tableau VI.8: Résistance en compression en fonction de la température pour les barbotines sans et avec les sédiments marins pour une durée de cuisson de 24h.

Temps (h)	Température °C	Résistance en compression (MPa)				
		Barbotine	F1	F2	F3	F4
24	600	19,5	28,71	25,81	20,01	17,95
	700	24	26,16	22,01	18,35	15,94
	800	26,12	20,38	18,86	15,63	14,34
	900	28	16,85	15,43	12,39	11,76

VI.6.2 Qualité du produit fini

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur les propriétés du produit final comme la minéralogie de la matière première, la granulométrie, le façonnage, le séchage, la température et les conditions de cuisson. D'après la cuisson des éprouvettes de brique sans et avec de sédiments on remarque un changement de couleur d'une couleur rouge brique vers une couleur rouge claire en fonction des ajouts en sédiments marins. Cette couleur est due au forte teneur en CaO présentent dans les sédiments marins. La figure VI.10 présente qualité de différentes éprouvettes après cuisson.



Figure VI.10: Qualité de différentes éprouvettes après cuisson.

VI.7 Etude économique

L'étude économique a été effectuée en utilisant 5% de sédiments marins comme première formulation (F1). Nous avons calculé le gain de l'usine en utilisant les sédiments marins. Le Tableau VI.09 présente les quantités des matériaux utilisés dans la briqueterie de PROMAG et quantités des matériaux proposés dans la formulation (F1) de l'étude. Le tableau VI.10 calcul le cout des matériaux utilisé pour la fabrication des briques.

Tableau VI.9: Quantités des matériaux utilisés dans la briqueterie de PROMAG et quantités des matériaux proposés dans la formulation F1 de l'étude.

Matière	Composition (%)		Pois d'une pièce de brique (Kg)		Quantité des matériaux (Tonne)					
	Usine	F1	Brique de 16 trous		Jour		Mois		Année	
			Usine	F1	Usine	F1	Usine	F1	Usine	F1
Brique (U)	-	-	6	6	30 000		900 000		10 800 000	
Argile	75	70	4.5	4.2	135	126	4 050	3 780	48 600	45 360
Sable	25	25	1.5	1.5	45	45	1 350	1 350	16 200	16 200
Sédiments marins	-	5	-	0.3	-	9	-	270	-	3 240

Tableau VI.10: Calcul le cout des matériaux utilisés pour la fabrication des briques.

Matière	Composition (%)		Besoin annuel (Tonne/an)		Prix unitaire	Coût annuel (DA)	
	Usine	F1	Usine	F1	DA/Tonne	Usine	F1
Argile	75	70	48 600	45 360	42	2 041 200	1 905 120
Sable	25	25	16 200	16 200	855	13 851 000	13 365 000
Sédiment marins	-	5	-	3 240	1.5	-	4 860
					Total	15 892 200	15 270 120

VI.7.1 Gain de la briqueterie de PROMAG

La briqueterie de PROMAG consomme annuellement une quantité d'argile d'environ de 10 000 tonnes. La production annuelle des briques est de l'ordre de 10 million 800 pièces de brique avec un chiffre d'affaires qui a atteint 12 millions DA par an sachant que la quantité des matériaux utilisés dans la briqueterie est de l'ordre de 45 360 tonne d'argile et 16 200 tonne de sable. On note aussi que l'énergie utilisé pour le four de cuisson des briques au niveau de la briqueterie de PROMAG est aux environs de 134 Kw/h. Le tableau VI.11 présente les couts et bénéfices de la briqueterie de PROMAG.

Tableau VI.11: Couts et bénéfices de la briqueterie de PROMAG.

Les charges	Les équipes		Heure (DA)	Jour(DA)	Mois(DA)	Année(DA)
	(08h-16h)	(00h-08h)				
Effectifs	42	42				
Nombre de brique (U)			1250	30 000	900 000	10800000
Prix des briques en (DA)			13889	333 333	10 000 000	120 000 000
Masse salariale des effectifs			5827	139 838	4 195 155	50 341 856
Transport du personnelles			347	8 333	250 000	3 000 000
Téléphone + Internet			232	5 557	166 708	2 000 500
Electricité	193 DA/KW	102 DA/KW	1390	33 353	1 000 600	12 007 200
Gaz			1389	33 340	1 000 200	12 002 400
Gasoil			232	5 557	166 708	2 000 500
Location d'engins			116	2 778	83 333	1 000 000
Carrière "argile"			231	5 556	166 667	2 000 000
Sable			1604	38 502	1 155 069	13 860 825
Total			11367	272 815	8 184 440	98 213 281
Bénéfices			2522	60 519	1 815 560	21 786 719
Les impôts "1% du bénéfice"			25	605	18 156	217 867
Total HT (bénéfices net)			2496	59 913	1 797 404	21 568 852

TVA 19%			474	11384	341507	4098082
TTC		-	<u>2971</u>	71 297	2 138 911	25 666 934

VI.7.2 Gain de la briqueterie de PROMAG en utilisant les sédiments marins du port de Bethioua

La proportion de sédiment dans le mélange s'étendant de 5 à 15% a un impact sur la qualité de la brique et un impact important sur le bénéfice de la briqueterie de PROMAG. Vu les propriétés physiques, chimiques et mécaniques, la proportion de 5, 10 et 15% de substitution semble être la plus efficace. Suite aux résultats des essais mécanique (résistance en compression) qui répond à la norme de la briqueterie de PROMAG et répond à la norme française de la fabrication de briques nous avons calculé le gain de l'usine en utilisant ces sédiments. La formulation proposé était d'utilisé 5% de sédiments marins et garder les même processus de fabrication sachant que cette formule donne une meilleur résistance en compression avec une durée de cuisson de 6 heures et avec une température de 600°C. La briqueterie de PROMAG a une capacité de production continue et sans arrêt 24H/24H.

1. Transport de sédiments marins vers la briqueterie de PROMAG

Le port de Bethioua contient un volume de 3,5 millions de m³. Si le taux du comblement de sédiments a continué avec la même fréquence, le volume sera équivalent d'une masse de 8 million tonne. Le transport de 10 tonne de sédiments marins du port de Bethioua vers la briqueterie de PROMAG avec une distance de 12 km coute 3000 DA. Dans notre cas on aurait besoin d'une quantité de 3240 tonne /an pour une valorisation de 5% en sédiment (F1) (Cf. tab VI.9). Le nombre de voyage de sédiment avec un camion d'une capacité de 10 tonne est environ de 324 voyages annuellement, sera 27 voyages par mois et pourra un seul voyage pour deux jour (Tableau VI.12). Le cout de transport de sédiments marins du port de Bethioua vers la briqueterie de PROMAG coutera 972 000 DA/an.

Tableau VI.12: Calcul le cout de transport des sédiments marins du port de Bethioua vers la briqueterie de PROMAG.

Matériaux	Sédiments marins (Tonne)	Cout de voyage (DA)	Nombre de voyage	Cout (DA)	
				Mois	Année
Sédiments marins	3240	3000	324	81 000	972000

2. Utilisation des sédiments marins avec une capacité de production de 24H/24H

La première proposition était de garder les même processus de fabrication en valorisant 5% de sédiment avec une capacité de production 24H/24H. Le tableau VI.13 présente le calcul du gain de l'usine en utilisant les sédiments marins du port de Bethioua avec une capacité de production de 16H/24H (La cuisson se fait 24h/24h) et une température de cuisson de 600°C.

Tableau VI.13: Calcul du gain de l'usine en utilisant les sédiments marins du port de Bethioua avec une capacité de production de 16H/24H (La cuisson se fait 24h/24h).

Les charges	Les équipes		Heure (DA)	Jour(DA)	Mois(DA)	Année(DA)
	(08h-16h)	(00h-08h)				
Effectifs	42	42				
Nombre de brique (U)			5000	120 000	3 600 000	43200000
Prix de brique en (DA)			55556	1 333 333	40 000 000	480 000 000
Masse salariale des effectifs			5827	139 838	4 195 155	50 341 856
Transport du personelles			347	8 333	250 000	3 000 000
Téléphone + Internet			232	5 557	166 708	2 000 500
Electricité	193DA/KW	102 DA/KW	1390	33 353	1 000 600	12 007 200

Gaz			1389	33 340	1 000 200	12 002 400
Gasoil			232	5 557	166 708	2 000 500
Location d'engins			116	2 778	83 333	1 000 000
Carrière "argile"			231	5 556	166 667	2 000 000
Sable			1604	38 502	1 155 069	13 860 825
Total			11367	272 815	8 184 440	98 213 281
Bénéfices			44188	1 060 519	31 815 560	381 786 719
Les impôts "1% du bénéfice"			442	10 605	318 156	3 817 867
Total HT (bénéfices net)			43746	1 049 913	31 497 404	377 968 851
TV 19%			8312	199484	5984507	71814082
TTC		-	<u>52058</u>	1 249 397	37 481 911	449 782 933

L'avantage d'utiliser les sédiments marins avec une durée de 24 heures :

- La substitution de 5 et 10% donnent une meilleure résistance que la brique de référence (39 MPA au lieu de 27 MPA de l'usine).
- Consommer une faible température inférieure à celle de l'usine (600°C au lieu de 900°C).
- Utiliser une faible durée de cuisson (6 heures au lieu de 24 heures).
- Augmenter la production des briques de quatre fois la quantité actuelle de l'usine avec les même processus de fabrication.
- Récupérer une énergie de cuisson de 300°C qui est équivalente à 41 kilowatt/heure.
(Cette énergie est calculée avec la règle de trois sachant que l'énergie utilisée dans la briqueterie de PROMAG est de l'ordre de 980°C qui est équivalente à 134 kilowatt/heure).

3. Utilisation des sédiments marins avec une capacité de production de 6H

La deuxième proposition était de garder les même processus de fabrication en valorisant 5% de sédiment avec une capacité de production de 6 heures de cuisson. Le tableau VI.14 présente le calcul du gain de l'usine en utilisant les sédiments marins du port de Bethioua avec une capacité de production de 8H (La cuisson se fait 6h/24h) et une température de cuisson de 600°C.

Tableau VI.14: Calcul du gain de l'usine en utilisant les sédiments marins du port de Bethioua avec une capacité de production de 8H (La cuisson se fait 6h/24h).

Les charges	Les équipes		Heure (DA)	Jour(DA)	Mois(DA)	Année(DA)
	(08h-16h)	(00h-08h)				
Effectifs		42				
Nombre de brique (U)			1250	30 000	900 000	10800000
Prix de brique en (DA)			13889	333 333	10 000 000	120 000 000
Masse salariale des effectifs			2913	69 919	2 097 577	25 170 928
Transport du personelles			347	8 333	250 000	3 000 000
Téléphone + Internet			232	5 557	166 708	2 000 500
Electricité		102 DA/KW	481	11 532	345 970	4 151 640
Gaz			1389	33 340	1 000 200	12 002 400
Gasoil			232	5 557	166 708	2 000 500
Location d'engins			116	2 778	83 333	1 000 000
Carrière "argile"			231	5 556	166 667	2 000 000
Sable			1604	38 502	1 155 069	13 860 825
Total			7545	181 074	5 432 233	65 186 793
Bénéfices			6344	152 259	4 567 767	54 813 207
Les impôts "1% du bénéfice"			63	1 523	45 678	548 132
Total HT (bénéfices net)			6281	150 736	4 522 090	54 265 075
TV 19%			1193	28640	859197	10310364
TTC		-	<u>7474</u>	179 376	5 381 287	64 575 439

L'avantage d'utiliser les sédiments marins avec une durée de 6 heures :

- La substitution de 5 et 10% donnent une meilleure résistance que la brique de référence (39 MPA au lieu de 27 MPA de l'usine).
- Consommer une faible température inférieure à celle de l'usine (600°C au lieu de 900°C).
- Utiliser une faible durée de cuisson (6 heures au lieu de 24 heures).
- Avoir une production des briques avec la même quantité à l'état actuelle de l'usine mais avec une durée de cuisson de 6h et une température de 600°C.
- Travailler avec une seule équipe et éliminer la deuxième équipe.
- Récupérer une énergie de cuisson de 300°C qui est équivalente à 41 kilowatt/heure.

VI.7.3 Gain de l'agence nationale de dragage maritime

Après le dragage des sédiments marins du port de Bethioua une masse d'environ de 8 million tonnes de sédiment est rejetée dans le large. Les analyses confirment que ces sédiments peuvent être valorisés efficacement dans le secteur de la construction tel que la brique. Si la briqueterie de PROMAG achète les sédiments marins du port de Bethioua avec un prix de 1.5 DA/tonne et le reste des matériaux dragués sera utilisée par d'autre briqueterie ou par d'autre projet de valorisation, le gain de l'agence nationale de dragage maritime sera 12.4 millions de DA/an.

Conclusion

Cette étude réalisée en laboratoire portait sur la valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques. Elle a pour but d'examiner deux axes de recherche appliquée. La première phase permettait de caractériser le comportement des briques en fonction du taux de substitution en sédiments marins et la deuxième phase permettait de faire une étude économique sur cette valorisation. Pour cela, quatre mélangés ont été préparés avec un taux de substitution jusqu'à 20%.

La caractérisation rhéologique montre que l'introduction de 5, 10 et 15% des sédiments marins dans la barbotine de brique donnent une contrainte seuil comparable avec la barbotine de brique. Les paramètres rhéologiques obtenus montrent que ces sédiments marins peuvent être valorisé jusqu'à 15%. Donc il était nécessaire de caractériser ces matériaux à l'état brut du point de vue rhéologique.

L'étude des performances mécaniques des éprouvettes de briques produites à base de sédiments a été soumise à des tests de qualification et montré que la résistance à la compression est influencée par la quantité de sédiments. Vu les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des briques produites avec ajout des sédiments, on note que le taux de 5 et 10% de substitution semble être le plus efficace et augmente la résistance à la compression avec une faible température (600°C au lieu de 900°C) et une faible durée de cuisson (6 heures au lieu de 24 heures). Le taux de 15% est comparable à celui de la barbotine de brique.

Les valeurs de résistance à la compression pour une valorisation de (5%, 10%, 15% et 20%) en sédiments marins sont respectivement de l'ordre de (38.5 MPA, 31.2 MPA, 25.7 MPA et 20.9 MPA). La valeur de résistance à la compression de l'usine est de 26.4 MPA pour une durée de cuisson de 6h et une température de cuisson de 600°C. Ceci confirment que les sédiments marins peuvent être valorisés jusqu'à 15%.

Une étude économique a été effectuée pour déterminer le gain de la briqueterie de PROMAG avec l'utilisation des sédiments marins du port de Bethioua qui est de l'ordre de 449 782 933 DA/an pour une capacité de production de 24H/24H et 64 575 439 DA/an pour une capacité de production de 6 heures par rapport aux bénéfices de la briqueterie de PROMAG avec la formulation actuelle qui est de l'ordre de 25 666 934 DA/an. L'étude économique de la briqueterie de PROMG en utilisant 5% de sédiments marins comme première formulation (F1) donne des avantages meilleurs que la formule initiale de la briqueterie. L'avantage d'utiliser les sédiments marins:

- La substitution de 5 et 10% donnent une meilleure résistance que la brique de référence (39 MPA au lieu de 27 MPA de l'usine).
- Consommer une faible température inférieure à celle de l'usine (600°C au lieu de 900°C).
- Utiliser une faible durée de cuisson (6 heures au lieu de 24 heures).
- Augmenter la production des briques de quatre fois la quantité actuelle de l'usine avec les même processus de fabrication.
- Récupérer une énergie de 300°C qui est équivalente à 41 kilowatt/heure.

Conclusion générale et perspectives

Les sédiments dragués des ports algériens sont soit rejetés en mer soit mis en dépôts terrestres. Le rejet en mer étant la solution la plus économique est fréquemment adopté malgré la présence de la pollution.

L'objectif de cette thèse est de proposer une nouvelle alternative à la fois écologique et économique pour la gestion de sédiments marins algériens. Un état sur la problématique de dragage des sédiments ainsi que sur les solutions innovantes de leur gestion a été élaboré. La problématique provient de la nécessité de draguer de grands volumes de sédiments. Cette étude traite la valorisation des sédiments marins dans les matériaux de constructions et plus précisément dans la brique.

La caractérisation physique montre que les sédiments du port de Bethioua sont des limons peu plastiques et sont majoritairement constitués de sable. Ces sédiments ont des caractéristiques presque confondues avec les caractéristiques de la barbotine de brique. On note aussi que la présence de la matière organique dans ces sédiments est faible par rapport à sa présence dans l'argile de brique. Ainsi, les sédiments du port de Bethioua peuvent être incorporés dans la formulation d'un nouveau matériau sans traitement.

La caractérisation chimique de ces sédiments a permis d'évaluer leur potentiel de valorisation avec la nécessité de les mélanger avec l'argile de briques pour garder la plasticité. D'après les résultats de l'analyse environnementale ces sédiments présentent un taux faible en hydrocarbures et une absence de pollution métallique.

La caractérisation minéralogique a montré une présence majoritaire de quartz et de calcite dans les sédiments marins, dans l'argile et dans la barbotine de brique.

La caractérisation rhéologique montre que les courbes d'écoulement sont bien décrites par le modèle de Herschel Bulkey. Cette étude rhéologique nous a permis de déterminer la composition idéale pour la fabrication des briques.

La caractérisation rhéologique montre que la valorisation de 15% de sédiments marins donne une contrainte seuil comparable avec la contrainte seuil de la barbotine de brique, par contre le seuil est plus élevé pour une valorisation de 5% et de 10% en sédiments. Les paramètres rhéologiques obtenus montrent que ces sédiments marins peuvent être valorisés jusqu'à 15%. La contrainte seuil chute pour une valorisation de 20% en sédiments, donc à partir de ce pourcentage la valorisation devient non intéressante.

La dernière partie de ce travail a été consacrée à l'étude des performances mécaniques des éprouvettes de briques produites sans et avec les sédiments. Ces éprouvettes ont été soumises à des tests de qualification qui ont montré que la résistance à la compression est influencée par la quantité de sédiments. Vu les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des briques produites avec ajout des sédiments, on note que le taux de 5 et 10% améliore nettement et donne une meilleure résistance que la brique de référence. Finalement la résistance chute pour un ajout de 20% en sédiments. La substitution des sédiments avec une concentration de 5% et 10% augmente la résistance à la compression avec une faible température (600°C au lieu de 900°C) et une faible durée de cuisson (6 heures au lieu de 24 heures). La substitution des sédiments avec un taux de 15% donne des résultats comparables à ceux de la barbotine de brique. Les valeurs de résistance à la compression pour une valorisation de (5%, 10%, 15% et 20%) en sédiments marins sont respectivement de l'ordre de (38.5 MPA, 31.2 MPA, 25.7 MPA et 20.9 MPA). La valeur de résistance à la compression de l'usine est de 26.4 MPA pour une durée de cuisson de 6h et une température de cuisson de 600°C. Ceci confirme que les sédiments marins peuvent être valorisés jusqu'à 15%.

L'augmentation de résistance en compression pour un ajout de 5% en sédiments est expliquée chimiquement. D'après la caractérisation chimique des différentes formulations, on note bien que pour la première formulation (F1) il y a une saturation maximale de la monocouche qui peut être due à une distribution des sites actifs d'adsorption sur la surface du matériau solide. La capacité d'adsorption correspondante à une saturation maximale de la monocouche d'argile de brique en éléments majeurs dans les mélanges. Cette capacité d'adsorption est plus importante pour un ajout de 5% (F1) en sédiments marins que pour les autres formulations.

L'ensemble des résultats de cette thèse montre que les sédiments marins du port de Bethioua sont valorisés dans la fabrication des briques et avec des concentrations allant jusqu'à 15%.

En faisant la comparaison entre l'étude rhéologique et l'étude mécanique, on remarque que les allures des résistances à la compression en fonction de la température pour les briques de référence et les briques à base des sédiments marins avec une durée de cuisson de 6 heures suivent la même variation que la courbe d'écoulement des briques de référence et des briques à base des sédiments marins.

On peut conclure que l'influence des sédiments marins sur la résistance à la compression est la même que sur la contrainte seuil. Enfin on peut dire qu'il y a une relation

entre l'étude rhéologique (La contrainte seuil) et l'étude mécanique (Résistance à la compression).

L'étude économique a permis de déterminer le gain de la briqueterie de PROMAG avec l'utilisation des sédiments marins du port de Bethioua qui est de l'ordre de 449 782 933 DA/an pour une capacité de production de 24H/24H et 64 575 439 DA/an pour une capacité de production de 6 heures par rapport aux bénéfices de la briqueterie de PROMAG avec la formulation actuelle qui est de l'ordre de 25 666 934 DA/an. La valorisation de 5% de sédiments marins comme première formulation (F1) donne des avantages meilleurs que la formulation initiale de la briqueterie. L'avantage d'utiliser les sédiments marins dans les formulations étudiées donnent une meilleure résistance que la formulation de référence, avec une faible température (600°C au lieu de 900°C) et une faible durée de cuisson (6 heures au lieu de 24 heures).

L'utilisation des sédiments avec un ajout de 5% augmente la production des briques de quatre fois la quantité actuelle de l'usine avec les mêmes processus de fabrication et on récupère une énergie de cuisson de 300°C qui est équivalente à 41 kilowatt/heure.

Les perspectives de notre travail s'orientent sur les points essentiels suivants :

- Déterminer les performances mécaniques des sédiments marins à l'échelle industrielle.
- Déterminer les performances mécaniques des sédiments marins à long terme (la résistance à la compression).
- Etudier la performance des sédiments marins avec ajout de liant hydraulique avec différentes formulations de ciment et de chaux.
- Etudier l'extrusion des pâtes d'argile utilisées dans la fabrication des briques ainsi que les formulations étudiées pour la valorisation.
- Etudier le comportement rhéologique des sédiments marins avec ajout de liant hydraulique avec différentes formulations de ciment et de chaux.
- Etudier et expliquer le comportement minéralogique avant et après cuisson des éprouvettes de briques.
- Etudier la faisabilité de valoriser les sédiments marins du port de Bethioua dans la fabrication des céramiques et du béton.
- Etudier l'influence de la force de compactage sur la résistance des éprouvettes des briques.

Références bibliographiques

1. **Abriak, Damido, Zentar, Wang**, Characterization of Dredged Marine Sediments for Road Construction, Conference'04, Month 1–2, 2004, City State Country.
2. **Achour, Raouf**, Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routière et d'un béton à base de sédiments de dragage, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie de Lille, 19-23 p, 2013.
3. **Agostini. F, Skoczylas. F, Lafhaj. Z.:** About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment, Cement & Concrete Composites, Vol. 29, pp 270-278(2007).
4. **Agostini. F**, Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, 21-22p. 14, 2006.
5. **Aiche. S**, caractérisation du kaolin de tounane et son application catalytique dans les réactions de polymérisation de styrene, 1,3-dioxolane et du thf, Mémoire de master, Université d'Oran 1 Ahmed ben Bella, 2015.
6. **Albakjaji. M**, La pollution de la mer Méditerranée par les hydrocarbures liée au trafic maritime, Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2011.
7. **Andrea. M, Nortey. N. Y, Susan. E. B, Lawrence. F. K., Kimberly. E. K**, Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick, Journal of Environmental Management, 113(2012) 128-136.
8. **Aouad, Laboudigue, Gineys, Abriak**, Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker, Journal of Cement & Concrete Composites, 2012.
9. **Atroune, F**, Degré de pollution marine par les métaux lourds dans les sédiments superficiels des principaux ports algériens, Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, EDITION 3, FERRARA, ITALIA.<http://www.paralia.fr/>, 2015.
10. **Ben allal. L, Ammari. M, Frar. I, Azmani. A, Belmoukhatare. N**, Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc), *Revue Paralia* vol4, pp5, 1-5.13, 2011.
11. **Bel-hadj.A.I.**, contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens: Cas des ports de Rades et de Gabes, Thèse de doctorat, école centrale de Lille (France), Ecole nationale d'Ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2013<NNT :2013.

12. **Belhadri. M**, Ecoulement des fluides à seuil au travers de singularités convergentes et divergentes, Institut national polytechnique de Grenoble, 1996.
13. **Benamara. L**, Conception d'éléments de toiture pour pays en voie de développement, Institut national des sciences appliquées de Lyon (France), 1990.
14. **Benamar. A, Brasselet. S, Pantet. A**, *Revue Paralia* DOI : 10.5150/jngcgc.108-B, 2012.
15. **Benyerou.D, Boudjenane.N, Belhadri.M**, physicochemical characteristics of port dredging sediments and of the brick slip used in the manufacture of bricks: A comparative study, Coastal Cities and their Sustainable Future, ISSN 1743-3509, doi:10.2495/CC150241, 2015.
16. **Benyerou. D, Boudjenane. N, Belhadri. M**, Etude de la pollution des vases marines des ports algériens par les hydrocarbures, Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime EDITION 3, FERRARA, ITALIA.<http://www.paralia.fr/>, 2015
17. **Benyerou. D, Boudjenane. N, Belhadri. M**, Caractérisation et valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques, J. Mater. Environ. Sci. 7 (4) (2016) 1317-1327.
18. **Bonnet. C**, Développement de bio essais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse de doctorat. Université de Metz, UFR Sciences fondamentales et appliquées, 2006.
19. **Brakni. S, Abriak. N.E, Hequette. A**, Formulation of artificial aggregates from dredged harbour sediments for coastline stabilization, Environmental Technology. Vol 30, No. 8, pp 849-854, 2009
20. **Scordia. P**, Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers, Thèse à l'école centrale de Lille, 2008.
21. **Dubois. V**, Etude de comportement physico-chimique et caractérisation environnementale des sédiments marins-valorisation en technique routière, Thèse de doctorat à l'école nationale supérieure des mines de DOUAI, 2006.
22. **Dubois, V, Abriak. N. E, Zentar. R, Ballivy. G**, The use of marine sediments as a pavement base material, Waste Management, Vol. 29, pp 774-782(2009).
23. **EPA (U.S. Environmental Protection Agency)**, Evaluating Environmental effects of dredged material management alternatives – A technical framework. EPA842-B-92-008, 1992.
24. **Foucher. J**, Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France Métropolitaine, Thèse à centre d'étude technique maritime et fluviale, 2005.

25. **Frar. I et al**, Utilisation des sédiments de dragage portuaire comme matière première dans la fabrication des briques en terre cuite, *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (2) (2014) 390-399
26. **GEODE 2000**, Arrêté du 14 juin 2000 (J.O du 10 Août 2000) relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire.
27. **Hamer et Karius**, Brick production with dredged harbour sediment an industrial-scale experiment, *Waste Management*, 22, 2002, pp. 521-530.
28. **HAMMADI. L**, Rhéologie et écoulement des fluides complexes applications aux vases de barrage et boues de stations d'épuration, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2013.
29. **Julie Lions** Etude hydrogéochimique de la mobilité de polluants inorganiques dans des sédiments de curage mis en dépôt : expérimentation, étude in situ et modélisations, Thèse de doctorat à l'Ecole nationale supérieure des mines de paris, 2004.
30. **Kamali. S, Bernard. F, Abriak. N.E, Degrugilliers. P**, Marine dredged sediments as new materials resource for road construction, *Waste Management*, Vol. 28, pp 919-928(2008).
31. **KAZI. F, AOUAL. B, MAAROUF. H, SEMCHA. A, MEKERTA. B**, Durabilité des mortiers à base de sédiments de dragage du port d'Oran, Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime EDITION 2, TANGER, MAROC EditionsParalia CFL .<http://www.paralia.fr/>, 2011.
32. **Khenifi. A**, Elaboration de matériaux à base d'argiles, caractérisation, et application a l'élimination des polluants organiques, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2010.
33. **Krachai. N**, Mohammed Hadjel, Etude de la qualité des sédiments marins pollués de la côte ouest de l'Algérie, *Communication Science & technology* N° 16. January 2016 COST.
34. **Kribi. S**, Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage, Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), 2005.
35. **Lafhaj. Z, Samara. M, Agostini. F, Boucard. L, Skoczylas. F, Depelsenaire. G**, Polluted river sediments from the north region of France: Treatment with Novosol

- process and valorization in clay bricks, *Construction and building materials*, 22(2008)755-762.
36. **Levachie. D, Sanchez. M, Duan. Z, Liang. Y**, Revue paralia, Valorisation en unité pilote de sédiments méditerranéens : étude des caractéristiques géotechniques et de la perméabilité (2011).004. vol.4, pp.1-4.20.doi ; 10,5150.
 37. **Limeira. J, Etxeberria. M, Agulló. L, Molina. D**, Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand, *Construction and Building Materials*, Vol 25, pp 4165–4174(2011).
 38. **Maher. A, Douglas. W.S, Jafari. F**, Field placement and evaluation of stabilized dredged material (SDM) from the New York/New Jersey Harbor, *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol 24, pp. 251–263(2006).
 39. **Marie loustau. C**, Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques-Evaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques, Thèse à l'institut nationale des sciences appliquées de Lyon, 2012.
 40. **Mechaymech. A**, Valorisation des boues de dragage application : port autonome de dunkerque, Thèse de doctorat, Université d'Artois (France), 2002.
 41. **Meskine. A**, Caractérisation et valorisation des sédiments d'envasement du barrage de gargar, Thèse De Magister, Université Des Sciences Et De La Technologie d'Oran Algérie, 2012.
 42. **Moukhchan, Ammari, Ben Allal**, Caractérisation Physico-Chimique Des Sédiments Marins Du Littoral De Tanger Et Perspectives De Valorisation. *Journal de Dechets Sciences Et Techniques*.
 43. **METL, MATE**, Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, (2000). Arrêté du 14 juin 2000 relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire. *Journal Officiel* n° 184 du 10 août 2000, texte n° 24, pp 12415-12416.
 44. **Nguyen Thanh Binh**, Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL ® dans des matériaux d'assises de chaussée-comportement mécanique et environnemental, Thèse de doctorat à l'université de TOULOUSE, 2008.
 45. **Nougar. B**, Etude du comportement des sédiments issus du dragage en vue de leur stockage en attente de valorisation, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran (Algerie), 2009.

46. **Pascal. G**, Modèle conceptuel d'aide à la décision multicritère pour le choix négocié d'un scénario de dragage maritime, Thèse de doctorat, Université d'ARTOIS, 2004.
47. **P.R. Pinet**, Invitation to Oceanography. 2nd ed. Sudbury, Mass., Jones and Bartlett Publishers, 556 pp.
48. **Remini. B**, Valorisation de la vase des barrages quelques exemples algériens, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, Juin 2006, pp.75-89.
49. **Roudier**, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire (Granulats, sols, ciments et bétons), Techniques de l'ingénieur, ISBN : 2-7135-1471-1.
50. **Samara. M**, Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite, Thèse à l'école centrale de Lille, 2007.
51. **Samara. M, Lafhaj.Z, Chapiseau.C**, Valorisation des sédiments des rivières stabilisées dans les briques d'argile usées: essai à l'échelle de l'usine, Journal of Hazardous Materials. 163(2009)701-710.
52. **Schneider, G**, Boues de curage des cours d'eau, CE, Le courrier de l'Environnement de l'INRA, 43,146-147.<http://www7.inra.fr/dpenv/curage.htm#1A>, 2001.
53. **Scordia. P**, Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille (France), 2008.
54. **Semcha. A**, Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.
55. **Semcha. A, Mekerta. B, Kazi. F, Draoui. A, Maarouf. H**, Alternative au largage en mer des sédiments dragués au port d'Oran, XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Cherbourg, Editions Paralia CFL. <http://www.paralia.fr/2012>.
56. **Sépouv. K, Besq. A, Guillou. S**, Revue Paralia. CFL. DOI:10.5150/jngcgc.062-P. (2010)
57. **Silitonga.E**, Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice, Thèse de doctorat, Université de Caen (France), 2006
58. **Tran. N**, Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Spécialité : Génie Civil, 23p ,28-31 p. 2009.

59. **Tribout. C**, Valorisation de sédiments traités en techniques routières : contribution a la mise en place d'un protocole d'acceptabilité. Thèse de doctorat de l'université de TOULOUSE.2010.11.10
60. **UNESCO**, The Integrated, Strategic Design Plan for the Coastal Ocean Observations Module of the Global Ocean Observing System GOOS Report No. 125; IOC Information Documents Series N°1183, 2003.
61. **Wang. H.Y**, Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt. Construction and Building Materials, Vol 23, pp. 2332–2337(2009).
62. **Weng. C. H, Lin. D.F, Chiang.4 P.C.**: Utilization of sludge as brick materials. Advances in Environnemental research, vol.7, pp 679-685(2003).
63. **Yang. x, Changhong. Y, Baotian. X, Xiaohong. R, Zhi. W**, L'utilisation des sédiments des rivières urbaines comme matière première dans la production des briques isolantes, Ceramic international, 40(2014) 8833-8840.
64. **Yingjie LIANG.CO**-Valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres. Thèse à l'université de LAEN.2006.
65. **Zentar, R, Dubois. V, Abriak. N.E.**: Mechanical behavior and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediment. Resources, Conservation and recycling.Vol: 52, pp. 947-954(2008).

Listes de normes utilisées

1. **NF P 94-050 .1995** : Sols reconnaissance et essais’ - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux –Méthode par étuvage, AFNOR.
2. **NF P 94-054. 1991:** ‘Sols Reconnaissance et Essais’ - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau, AFNOR.
3. **NF P 94-051.1993** : ‘Sols Reconnaissance et Essais’ – Détermination des limites d’Atterberg – Partie 1 : Limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration, AFNOR.
4. **XP P 94-041** : Sols : ‘Reconnaissance et Essais ‘ – Identification granulométrique – Méthode de tamisage par voie humide, AFNOR.
5. **NF P 94-057.1992** : ‘Sols Reconnaissance et Essais’ – Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation, AFNOR.
6. **NF P 94 068.1998** : ‘Sols Reconnaissance et Essais’ – Mesure de la quantité d’adsorption de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux par l’essai à la tâche, AFNOR.
7. **XP P 94-047.1998** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur pondérale en matière organique – Méthode par calcination, décembre 1998, 11p, AFNOR.
8. **NF ISO 11265 .1994** : ‘Qualité du sol’ – Détermination de la conductivité électrique spécifique.
9. **XP P 94-048.1996** : Sols : Détermination de la teneur pondérale en carbonate méthode du calcimètre, 2003, 11p.
10. **AFNOR. NF P13-304:** October 1983. Facing clay bricks.