



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

Boukelmoune Sofiane

Ait Messaoud Thinhinane

Thème

***Caractérisations physico-chimiques et
valorisation des sédiments de dragage du port
de bejaia dans la brique***

Soutenu le 22 / 06 /2017 devant le jury composé de:

Président:	Mr	TAHAKOURT	Professeur	U.A.M.B
Examinatrice:	M ^{me}	S.ATTIL	MAA	U.A.M.B
Promotrice:	M ^{me}	N.BOUZIDI	MCA	U.A.M.B
Co-promoteur:	Mr	H.SLIMANOU	DOCT	U.A.M.B

Année Universitaire: 2016-2017

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous ceux de loin ou de près qui ont participé à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promotrice **Mme N. BOUZIDI**, qui nous a proposé ce sujet et qui nous a constamment aidé par ses conseils, pour son confiance envers nous et sa patience envers ce travail.

Nous sommes très reconnaissants envers **Mme ATTIL**, pour son soutien et ses conseils, durant notre travail au laboratoire, et d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions vivement **M. TAHAKOURT** qui nous a fait l'honneur d'accepter de juger notre travail et qui nous a laissé la chance de bénéficier de ses intéressantes remarques.

Nous voudrions remercier aussi **M. H. SLIMANO**, pour son aide et ses conseils durant notre travail.

Nous tenons à remercier également **M. AZRI RACHID** responsable d'exploitation de la carrière dans la briqueterie de REMILA, qui nous a aidés et soutenus durant notre stage.

Nous remercions également les chimistes de laboratoire de la cimenterie d'Ain Kebira, pour la réalisation des analyses par fluorescence X, nous remercions aussi le technicien de laboratoire de génie civil.

Ainsi nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants qui nous ont suivis durant notre cycle d'étude, plus précisément ceux de notre département mines et géologie.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail avant tout à la lumière
de mes jours les étoiles de mes nuits la source de
mon bonheur et le guide de mon chemin*

Ma très chère mère.

*A mon père, celui qui m'a donné tous pour
atteindre mon but, celui qui m'a encouragé.*

A mes très chers (es) frères et sœurs.

A tous mes proches.

A mon cher binôme.

A mes adorables amis (es).

Ait Messaoud Thinhinane.

Dédicaces

Nulle œuvre exaltante que celle réalisée avec le soutien morale et financier des personnes qui nous sont proches.

Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à :

A mes très chers parents

Tous les mots du monde ne seraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien être.

A mon cher frère et ma chère sœur.

A mes très chers grands parents.

A tous mes proches.

A tous mes amis (es).

A ma chère binôme.

Boukelmoune Sofiane.



Sommaire

Sommaire

Remerciements	
Sommaire	
Liste des tableaux et figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur les sédiments de dragages des ports	
I.1. Introduction	03
I.2. Origine et nature des sédiments.....	03
I.3. Définition de dragage	04
I.4. L'intérêt de dragage.....	05
I.5. Equipements de dragage portuaire	06
I.5.1. Les dragues mécaniques	06
a). Drague à godets	07
b). Drague à benne	07
c). Drague à pelle	07
I.5.2. Le curage hydraulique	08
a). Aspiratrice stationnaires avec conduite de refoulement	09
b). Aspiratrice en marche.....	10
c). Drague fendable.....	11
I.5.3. Le curage pneumatique.....	11
a). La technique d'injection JESTED	11
I.6. Types de dragages	12
I.6.1. Les dragages d'entretiens	12
I.6.2. Les dragages d'approfondissement	12
I.6.3. Les dragages lors d'aménagement de nouvelles aires portuaires	13
I.7. Le devenir des sédiments dragués	13
I.7.1. Les mises en dépôts	13
I.7.2. Le lagunage.....	13

I.7.3. Remblaiement et construction d'îles artificielles	13
I.7.4. Les dépôts sous-marins confinés	13
I.8. Risques environnementaux.....	14
I.8.1. Les sédiments de dragages non contaminés ou traités	14
I.8.2. Les sédiments contaminés	14
I.9. Caractérisation des polluants rencontrés dans les sédiments.....	15
I.9.1. Les métaux lourds.....	15
a). L'arsenic (As)	15
b). Cadmium (Cd)	16
c). Chrome (Cr)	16
d). Mercure (Hg)	16
e). Plomb (Pb)	16
f). Zinc.....	16
I.9.2. Les matières organiques	17
I.9.3. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	17
I.9.4. Les polychlorobiphényles (PCB)	18
I.9.5. Les tributylétain(TBT)	18
I.9.6. Les sulfures.....	18
I.10. Traitement des sédiments	19
I.10.1. Prétraitement.....	19
I.10.1.1. La déshydratation	19
I.10.1.2. Le séchage et évaporation.....	20
I.10.1.3. Le criblage	20
I.10.1.4. La séparation par densité	20
I.10.1.5. La séparation magnétique.....	20
I.10.1.6. Le cyclonage.....	20
I.10.1.7. L'attrition.....	20
I.10.2. Traitement biologique.....	20
I.10.3. Traitement chimique.....	21

I.10.3.1. Extraction des métaux	21
I.10.3.2. Extraction des matières organiques	21
I.10.3.3. Destruction des substances organiques.....	21
I.10.4. Traitement thermique	22
I.10.4.1. Désorption	22
I.10.4.2. Incinération.....	22
I.10.4.3. Réduction thermique.....	22
I.10.4.4. Vitrification	22
I.10.5. Traitement par immobilisation	22
I.10.5.1. Fixation.....	22
I.10.5.2. Solidification	23
I.10.6. Traitement d'eau.....	23
I.11. Domaines de valorisation des sédiments de dragages	23
I.11.1. Génie civil et BTP	23
I.11.2. Environnement.....	24
a). Amendement des sols	24
b). Réhabilitation des sites naturels	24
I.11.3. Agriculture.....	24
I.12. Conclusion	24
Chapitre II : Généralités sur les briques	
II.1. Introduction	26
II.2. Situation géographique du gisement	26
II.3. Aperçue sur la géologie du gisement	26
II.4. Caractéristiques des argiles d'Oued Remila.....	27
II.5. Historique d'utilisation d'argile dans la construction	27
II.6. Définition d'argile	31
II.7. Les roches argileuses.....	32
II.8. La structure des argiles.....	33
II.9. La classification des minéraux argileux	34

II.10. Propriétés des argiles.....	35
II.10.1. Forme et surface spécifique.....	35
II.10.2. Plasticité	37
II.10.3. Bonne capacité de compaction	37
II.10.4. Degré d'hydratation.....	37
II.10.5. Capacité d'échange cationique.....	38
II.10.6. Activités des argiles	39
II.11. Définition de la brique.....	40
II.12. Procédé de fabrication de la brique	41
II.12.1. Extraction	41
II.12.2. Préparation de la matière première.....	42
a). Le broyage et le malaxage	42
b). Le dosage et le mélange.....	42
c). Façonnage des produits.....	42
d). Séchage.....	43
e). cuisson	44
II.13. Formes des briques.....	45
II.13.1. Les briques pleines	45
II.13.2. Les briques creuses.....	45
II.13.3. Les briques perforées	45
I.14. Conclusion	46
Chapitre III : Caractérisations des matières premières	
III.1. Introduction.....	47
III.2. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X	47
III.2.1. Principe	48
III.3. Analyse chimique par la spectrométrie de fluorescence X.....	48
III.3.1. Principe	49
III.3.2. Mode opératoire	49
III.4. Analyse thermique	52

III.4.1. Analyse thermique différentielle.....	52
III.4.1.1. Principe	53
III.4.2. Analyse thermogravimétrique.....	53
III.5. Analyse par la microscopie électronique à balayage (MEB)	54
III.5.1. Principe	54
III.6. Essai au bleu de méthylène	55
III.6.1. Principe	55
III.6.2. Appareillage.....	55
III.6.3. Mode opératoire	56
III.7. Caractérisation physico-mécanique des matières premières.....	57
III.7.1. Détermination des limites d'Atterberg.....	57
III.7.1.1. La limite de plasticité (W_P)	57
III.7.1.2. La limite de liquidité (W_L)	57
III.7.1.3. Détermination de la limite de plasticité	58
III.7.1.4. Détermination de la limite de liquidité (W_L)	58
III.8. Détermination de la masse volumique.....	60
III.8.1. Principe	60
III.8.2. Equipements utilisés	60
III.8.3. Mode opératoire	61
III.9. Mesure du PH	61
III.9.1. Matériels utilisés	61
III.10. Détermination des matières organique.....	61
III.11. Conclusion	62
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1. Introduction.....	63
IV.2. Résultats d'analyse par diffraction des rayons X	63
IV.2.1. Analyse par DRX d'échantillon d'argile de Remila.....	63
IV.2.2. Analyse par DRX des sédiments de dragages	65
IV.3. Résultats d'analyses par spectrométrie de fluorescence X.....	67

IV.3.1. Composition chimique de l'argile	67
IV.3.2. Composition chimique des sédiments de dragage	68
IV.4. Résultats d'analyse thermique	70
IV.4.1. Analyse thermique de l'argile	70
IV.4.2. Analyse thermique des sédiments de dragage	71
IV.5. Analyse par microscopie électronique à balayage	72
IV.5.1. Analyse d'échantillon d'argile au MEB	72
IV.5.2. Analyse d'échantillon des sédiments de dragage au MEB	73
IV.6. Résultats d'essai au bleu de méthylène	74
IV.6.1. Discussion des résultats	74
IV.7. Résultats de la masse volumique absolue	75
IV.8. Résultats de la plasticité	75
IV.8.1. La plasticité d'argile	75
IV.8.2. La plasticité des sédiments de dragage	76
IV.9. Détermination du PH	77
IV.10. Détermination des matières organiques	77
IV.11. Conclusion	77
Chapitre V : Propriétés physico-chimiques des briques élaborées	
V.1. Introduction	79
V.2. Préparation des éprouvettes	79
V.3. Méthode de la confection des briques	80
V.3.1. Matériaux et matériels utilisés	80
V.3.2. Mode opératoire	81
V.3.2.1. Préparation mécanique des matières première	81
a). Broyage	81
b). Tamisage	81
V.3.2.2. Façonnage des briques	81
V.4. La composition des éprouvettes	83
V.3.3. Séchage	85

a). Séchage à l'air libre	85
b). Séchage à l'étuve	85
V.3.4. Cuisson.....	85
V.6. Les résultats du retrait des briques	86
V.7. Les résultats de la perte en masse des briques	89
V.8. Caractéristiques mécaniques	91
V.8.1. La résistance à la flexion.....	91
V.8.2. La résistance à la compression.....	92
V.9. Résultats de la résistance à la flexion et à la compression.....	93
V.9.1. La résistance à la flexion.....	93
V.9.2. La résistance à la compression.....	93
V.9.3. Discussion des graphes de la résistance à la flexion et à la compression	94
V.10. Détermination des caractéristiques physiques des différentes briques	94
V.10.1. Le coefficient d'absorption	94
V.10.1.1. Mode opératoire	95
V.10.2. La masse volumique des briques	96
V.11. Conclusion	97
Conclusion générale.....	98

Références bibliographiques

Annexes

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Représente le classement granulométrique des sédiments	04
Tableau I.2 : Représentation les sources de pollution des métaux lourds dans les sédiments de dragages	17
Tableau II.1 : Classification granulométrique d'une particule argileuse, selon le critère dimensionnel des grains de sol (Atterberg, 1919)	31
Tableau II.2 : surface spécifique des particules argileuses.....	37
Tableau II.3 : Minéral prédominant dans la matrice argileuse basant sur l'activité, proposé par Skempton et Al (1953)	40
Tableau III.1 : Estimation de la plasticité d'un sol	58
Tableau IV.1 : Composition chimique d'argile	67
Tableau IV.2 : Composition chimique des sédiments de dragages	69
Tableau IV.3 : Résultats du bleu de méthylène de l'argile.....	74
Tableau IV.4 : Résultats du bleu de méthylène des sédiments de dragage	75
Tableau IV.5 : Masse volumique d'argile	75
Tableau IV.6 : Masse volumique absolue des sédiments de dragage.....	75
Tableau IV.7 : Les résultats de la plasticité pour l'échantillon d'argile	75
Tableau IV.8 : Les résultats de la plasticité des sédiments de dragage	76
Tableau IV.9 : Le pH des matières premières	77
Tableau IV.10 : Teneur en matières organiques des matières premières	77
Tableau V.1 : Composition du mélange pour 0 % d'ajout.....	83
Tableau V.2 : Composition du mélange pour 5 % d'ajout.....	83
Tableau V.3 : Composition du mélange pour 10 % d'ajout	83
Tableau V.4 : composition du mélange pour 15 % d'ajout.....	84
Tableau V.5 : Composition du mélange pour 20 % d'ajout	84
Tableau V.6 : Composition du mélange pour 100 % d'ajout.....	84
Tableau V.7 : Le mode de cuisson de la brique le temps en fonction de la température.....	85
Tableau V.8 : Le retrait des briques d'argile	87
Tableau V.9 : Le retrait des briques de 5% d'ajout	87
Tableau V.10 : Le retrait des briques de 10 % d'ajout	87

Liste des tableaux

Tableau V.11 : Le retrait des briques de 15 % d'ajout	87
Tableau V.12 : Le retrait des briques de 20 % d'ajout	87
Tableau V.13 : Le retrait des briques de 100% d'ajout	87
Tableau V.14 : Pertes en poids des briques de 0 %	89
Tableau V.15 : Pertes en poids des briques de 5 %	89
Tableau V.16 : Pertes en poids des briques de 10 %	89
Tableau V.17 : Pertes en poids des briques de 15%	90
Tableau V.18 : Pertes en poids des briques de 20 %	90
Tableau V.19 : Pertes en poids des briques de 100 %	90
Tableau V.20 : Récapitulatif de l'essai à la flexion pour l'ensemble des essais	93
Tableau V.21 : Récapitulatif de l'essai à la compression pour l'ensemble des essais.....	93
Tableau V.22 : Coefficient d'absorption en eau des différentes compositions	95
Tableau V.23 : La masse volumique apparente des briques en fonction de la composition ..	96

Liste des figures

Figure I.1. Origine des sédiments dans l'environnement aquatique.....	04
Figure I.2. Représentation schématique du dragage à godets	07
Figure I.3. Représentation schématique du dragage à benne	07
Figure I.4. Représentation schématique du dragage à pelle.....	08
Figure I.5. Schéma représentatif d'un aspirateur stationnaire avec conduite de refoulement.	09
Figure I.6. Aspirateur stationnaire avec conduite de refoulement	09
Figure I.7. Dragage hydraulique de type aspirateur en marche	10
Figure I.8. Représentation schématique du dragage fendable.....	11
Figure I.9. Schéma représentatif de la technique de dragage « JESTED »	12
Figure I.10. Le devenir du sédiment de dragage selon le taux de contamination	14
Figure II.1. Utilisation ancienne de la brique dans la construction des murs	28
Figure II.2. Brique émaillées (VI ^{ème} siècle av. J-C)	29
Figure II.3. Un fragment de brique à décor floral exposé au musée de Louvre.....	31
Figure II.4. Photo des différents minéraux argileux	32
Figure II.5. Structure des argiles (couche tétraédrique et octaédrique)	33
Figure II.6. Schéma représentatif de la structure des minéraux argileux.....	34
Figure II.7. Structure des minéraux argileux	35
Figure II.8. Les trois formes principales des minéraux argileux	36
Figures II.9. Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation	38
Figure II.10. Différentes formes de briques.....	41
Figure II.11. Schéma récapitulatif du processus de fabrication de la brique	44
Figure II.12. Différents modèles des briques.....	46
Figure III.1. : Schéma du principe du diffractomètre des rayons X	47
Figure III.2 : Echantillons préparé pour réaliser la pastille	49
Figure III.3 : Appareil à broyeur à boulet.....	50
Figure III.4 : Matériels utilisée pour la réalisation de la pastille.....	50
Figure III.5 : Appareil à compression.....	50
Figure III.6 : La forme de la pastille préparée.....	51

Liste des Figures

Figure III.7 : Appareil à fluorescence X à gauche et à droite les moules dont on met les échantillons (la pastille) pour l'analyse	51
Figure III.8 : Logiciel d'analyse par fluorescence X.....	52
Figure III.9 : Appareil d'analyse ATD/ATG	53
Figure III.10 : Microscope électronique à balayage.....	54
Figure III.11 : Matériels de bleu de méthylène	56
Figure III.12 : Classification d'argile selon l'indice de plasticité.....	58
Figure III.13 : Appareil de Casagrande	59
Figure III.14 : Equipements utilisés pour la masse volumique	60
Figure III.15 : L'éprouvette graduée remplie d'argile.....	61
Figure IV.1 : Spectre DRX d'échantillon de l'argile de Remila.....	64
Figure IV.2 : Spectre DRX des sédiments de dragage	66
Figure IV.3 : Histogramme représentatif de la variation des oxydes en fonction du % masse d'échantillon d'argile.....	68
Figure IV.4 : Histogramme représentatif de la variation des oxydes en fonction des sédiments de dragage.....	69
Figure IV.5 : Graphe représentatif d'ATD/ATG d'argile.....	70
Figure IV.6 : Graphe représentatif d'ATD/ATG des sédiments de dragage	71
Figure IV.7 : Cristaux d'argile vus MEB de dimension 50 μ M à droite, à gauche de dimension de 100 μ M.....	72
Figure IV.8 : Cristaux d'argile vus au MEB de dimension de 200 μ M.....	72
Figure IV.9 : Cristaux des sédiments de dragage vus au MEB de dimension 50 μ M à droite, à gauche de dimension de 100 μ M.....	73
Figure IV.10 : Cristaux des sédiments de dragage vus au MEB de dimension de 200 μ M	73
Figure IV.11 : Essai au bleu de méthylène d'argile	74
Figure IV.12 : Essai au bleu de méthylène des sédiments de dragage	74
Figure V.1: Préparation de matériel nécessaire.....	81
Figure V.2: Un malaxeur utilisé pour le mélange de la pâte.....	82
Figure V.3: a)-La pâte préparée ;b)- Sa mise dans le moule.....	82
Figure V.4: L'ensemble des briques confectionnées après le séchage à l'étuve.....	85
Figure V.5: Le four utilisé pour la cuisson des briques	86

Liste des Figures

Figure V.6 : La mesure du retrait de la brique à l'aide du pied à coulisse	86
Figure V.7 : Graphe représentatif de la variation de la perte en volume pour chaque % d'ajout	88
Figure V.8 : Graphe représentatif de la variation de la perte en masse pour chaque % d'ajout	90
Figure V.9 : Appareil de la résistance à la compression et à la flexion	91
Figure V.10 : Essai de flexion.....	92
Figure V.11 : Essai de compression.....	92
Figure V.12 : Graphe représentatif de la résistance à la compression des briques	93
Figure V.13 : Graphe représentatif de la résistance à la flexion des briques	94
Figure V.14 : Les briques dans l'eau	95
Figure V.15 : Graphe représentatif de la variation d'absorption en eau des briques	95
Figure V.16 : Graphe représentatif de la variation de la masse volumique apparente des briques.....	96

Liste des abréviations

AS : arsenic

Cd : Cadmium

Cr : Chrome

Hg : Le mercure

Pb : plomb

Zn : Zinc

PCB : polychlorobiphényles

TBT : tributylétains

Sd : sédiments de dragages

SiO₂: silice

Al₂O₃: Alumine

Fe₂O₃: Hématite

CaO: Chaux

MgO: magnésium

SO₃: Oxyde de sulfure

K₂O: Potasse

Na₂O: Soud

Cl: Chlore

PAF: Pert au feu

Na : Sodium

Ca: Calcium

K: Potasium

W₁ : Limite de liquidité

W_p : Limite de plasticité

I_p : Indice de plasticité

A₁ : Activité des argiles

n : le nombre entier désignant l'ordre de la réflexion,

λ : désigne la longueur d'onde du rayon x.

Θ : L'angle de diffraction.

Liste des abréviations

M_w : Masse d'eau évaporée

M_d : Masse matériau sèche

W : La teneur en eau

T : poids de la tare.

P : poids de l'échantillon humide.

P_d : poids de l'échantillon sec.

A : Absorption d'eau

M_h : Masse saturée dans l'air

M_s : Masse sèche dans l'air

DRX : Diffraction des Rayons X

ATD : Analyse Thermique Différentielle

ATG : Analyse Thermogravimétrique

FX : Spectrométrie de Fluorescence X

MEB : Microscopie électronique à balayage

RF : Résistance à la Flexion

RC : Résistance à la Compression

LSF : Indice de saturation en chaux (Line Saturation faction)

Introduction générale

Introduction générale :

Le développement durable, l'utilisation rationnelle de l'énergie, la préservation des ressources naturelles, font aujourd'hui partie de notre quotidien [1].

Depuis quelques années, la prise de conscience de l'importance à préserver l'environnement se répand partout dans le monde et plus précisément au sein des entreprises et manufactures [1].

Parmi les substances chimiques rejetées dans l'environnement, nombre d'entre elles s'accumulent dans les vases ou les boues constituant les sédiments, au fond des rivières et des lacs ainsi que dans les fonds marins. Ces polluants persistent parfois longtemps dans les sédiments et peuvent entraîner des effets néfastes tant sur l'écosystème que sur la santé humaine [2].

Les dépôts de sédiments, contaminés ou non, peuvent induire des besoins de curage lorsqu'ils augmentent le risque d'inondation [2]. Ces sédiments qui sont considérés comme déchets, ont alimenté plusieurs filières de valorisation. Ce processus de valorisation réunit un avantage économique et un enjeu environnemental.

La fabrication des briques est très intéressante et constitue une idée majeure de progrès architectural. L'élément répétitif à l'infini est facile à réaliser. Il ne nécessite pas de main d'œuvre qualifiée tant pour la fabrication que la mise en œuvre [3].

Cette étude permet d'utiliser l'argile de manière rationnelle, et de caractériser, valoriser les sédiments de dragage du port de Bejaia. En effet, il ne suffit pas de garantir une production en préservant l'environnement encore faut-il s'assurer des qualités physico-mécaniques du produit avec ajout. C'est pour cela que des essais techniques ont été effectués pour mettre en évidence les qualités de la brique réalisée.

Ce mémoire évoque cinq chapitres :

Le premier chapitre évoque en général les sédiments et leurs origines, pour cela nous allons expliquer la technique d'extraction des sédiments des ports, leurs caractérisations, les méthodes de dragages utilisées, leurs traitements, et leurs domaines d'utilisations.

Le deuxième chapitre, donne un aperçu bibliographique en ce qui concerne les minéraux argileux, l'historique de leurs utilisations, leurs classifications, et leurs propriétés qu'elles possèdent ; ensuite nous allons définir, expliquer la brique et son procédé de fabrication.

Le troisième chapitre caractérise les matières premières utilisées dans la confection des briques : argile, les sédiments de dragages ; ainsi des différents analyses, minéralogique par diffraction des rayons X (DRX), chimique par fluorescence X (FX), thermique différentielle et gravimétrique (ATD/ATG) et l'analyse par microscope électronique à balayage (MEB).

Le quatrième chapitre englobe les résultats des différentes méthodes d'analyse des matières premières, la représentation graphique et l'interprétation de ces résultats.

Le dernier chapitre comportera la méthode qu'on a suivi pour la confection des briques sans et avec les différents pourcentages en ajouts, aussi on présentera les mesures de la variation de poids et de retrait après la confection, le séchage et cuisson de la brique ; ainsi que les résultats de l'ensemble des essais physico-mécaniques avec leurs résultats et leurs interprétation.

Enfin, ce mémoire ce termine par une conclusion générale où nous mettons en évidence tous nos les résultats trouvés.



Chapitre I
Généralités sur les sédiments
de dragage

I.1. Introduction :

L'accumulation des dépôts des sédiments marins, ainsi que l'augmentation des risques d'inondation peuvent induire à des besoins de curage, et la nécessité de la mise en point des procédures et des méthodes d'évaluation dont on spécifie l'opération de dragage [2].

Ce premier chapitre évoque en général les sédiments et leurs origines, pour cela nous allons expliquer la technique d'extraction des sédiments des ports, leur caractérisation, les méthodes de dragage utilisées, leurs traitements, et en dernier leurs domaines d'utilisations.

I.2. Origine et nature des sédiments :

Les sédiments sont des dépôts (continentaux ou marins) qui proviennent de l'altération et de la désagrégation des roches préexistantes. Ces dépôts sont ensuite transportés par les cours d'eau et/ou par le vent, pour finalement se déposer dans des bassins de sédimentation et former des roches sédimentaires [4].

Les sédiments ont principalement deux origines : endogène ou exogène [4].

1. L'origine endogène de la sédimentation provient de la production autochtone du milieu. Cette production primaire engendre des débris de macrophytes (plantes aquatiques, cadavre de microphytes et d'animaux).

2. L'origine exogène, dans ce cas les sédiments sont issus du ruissellement des fleuves, des effluents ou de l'atmosphère. Cet apport peut être d'origine naturelle (érosion des sols, décomposition de la matière végétale), ou anthropique (apports de matière en suspension, des matières organiques, de nutriments ou de micro-polluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques) [5].

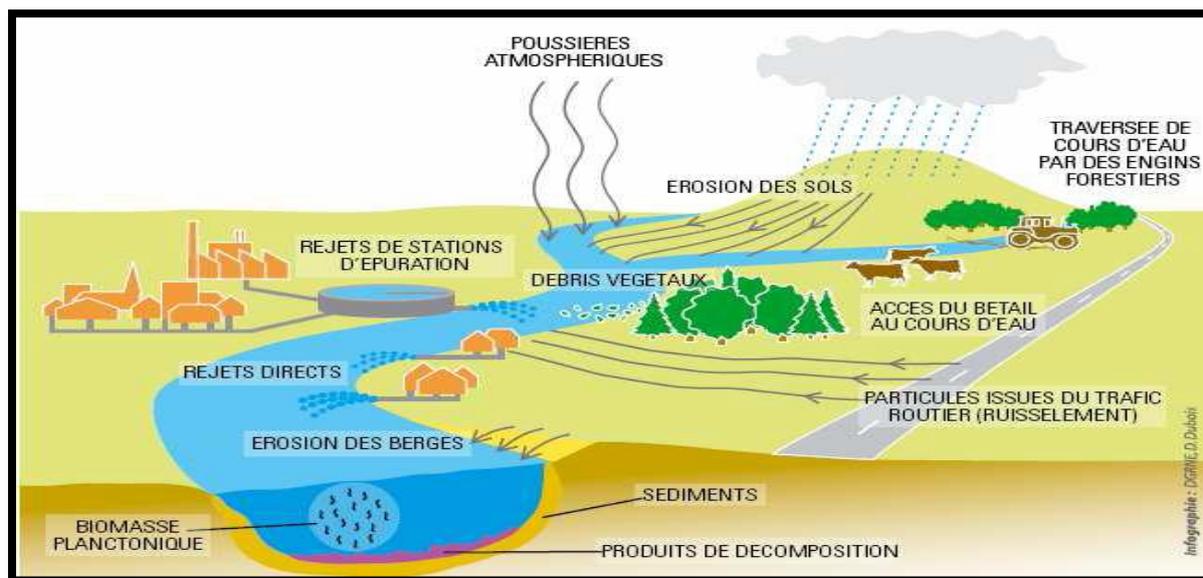


Figure I.1: Origine des sédiments dans l'environnement aquatique [5].

La provenance des sédiments conditionne leur composition minérale :

- ✚ Les sédiments terrigènes (blocs, cailloux, graviers, sables,...), issus de l'érosion des sols, traduisent fidèlement de par leur nature chimique la nature des terrains érodés.
- ✚ Les particules les plus fines (limons, boues et vases), sont composées d'une part des minéraux argileux d'origine terrigène et d'autre part de squelettes d'organismes d'origines endogène [5].

Les sédiments peuvent être caractérisés par leur granulométrie, voir le tableau ci-dessous

Tableau I.1 : Représentation le classement granulométrique des sédiments [5].

Taille	Dénomination
Supérieur 20cm	Blocs
De 2cm à 20cm	Galets et cailloux
De 2mm à 2 cm	Graviers
De 63µm à 2mm	Sables (grossiers et fins)
De 2µm à 63µm	Limons (ou silt)
Inférieur à 2µm	Vases, boues argileuses

I.3. Définition de dragage :

Les opérations de dragage dans les ports constituent une nécessité vitale au maintien et au développement de leur activité (sécurité de la navigation, travaux d'aménagement).

Boutin B, 2000 a défini le dragage comme étant « des terrassements effectués sous l'eau avec des engins flottants au moyen des procédés mécaniques ou par aspiration ». Donc, pour maintenir et garantir ces accès pour la navigation et la restauration des milieux portuaires, il est indispensable de les entretenir en effectuant régulièrement des opérations de dragage. Les Grenelles de l'environnement et de la mer ont permis de mettre en avant de nouvelles formes de gouvernance environnementale pour les ports [6].

Le dragage est une technique qui consiste à enlever les boues du fond des ports marins. Les matériaux dragués sont généralement des matières transités par les forts courants de marées. Suite au phénomène de sédimentation, les boues peuvent atteindre plusieurs mètres par an, selon la situation de chaque port, d'où la nécessité d'un entretien permanent pour ne pas empêcher la navigation dans les ports [7].

I.4. L'intérêt de dragage :

Le processus de sédimentation est avant tout une loi physique, liée à la pesanteur. Ce phénomène est tout à fait naturel mais il provoque, par le dépôt des sédiments, l'envasement des cours d'eau. Il est d'ailleurs accentué par une topographie plane, de faibles débits ainsi que les rejets industriels urbains [6].

Les cours d'eau sont dragués depuis longtemps. Autrefois, ils étaient entretenus par les riverains. En effet, les principales raisons qui obligent à draguer les sédiments sont le maintien de la navigation de 43% et la lutte contre les inondations de 32% [6].

Le dragage est également indispensable pour assurer le libre écoulement des crues et prévenir les inondations.

La sédimentation entraîne un envasement progressif du lit, les capacités d'écoulement s'en trouvent ainsi réduites et les risques d'inondation des terrains avoisinants sont élevés.

Au niveau environnemental, la sédimentation peut également être nocive car elle peut engendrer une altération de la qualité de l'eau et perturbe la vie aquatique, surtout quand les sédiments sont pollués. La présence excessive des sédiments ou des matières en suspension qui peut contribuer à la l'eutrophisation des cours d'eau en limitant la pénétration de la lumière et en réduisant ainsi la photosynthèse. Le risque de transfert des polluants des sédiments vers les nappes souterraines existe également, et leur présence dans

les cours d'eau pose un problème en raison de leur bioaccumulation, de sorte à rendre certains produits de la pêche impropres à la consommation [6].

L'envasement créé par la sédimentation est également responsable de la disparition des frayères, ce qui engendre une perte de la biodiversité. Ces phénomènes associent à la dégradation des fonctions biologiques des cours d'eau, la qualité de l'eau s'en trouve ainsi affectée [6].

I.5. Equipements du dragage portuaire :

Les conditions écologiques, considérées aujourd'hui très pénibles, ne permettent plus de draguer les ports sans tenir compte des conditions attentives envers l'environnement. A cet effet plusieurs équipements de dragage ont été apparus dans les dix dernières années pour excaver les sédiments [7].

Le choix des outils de dragage dépend de plusieurs paramètres, à savoir l'épaisseur de la couche à excaver, l'éloignement du site de dépôts, la qualité tolérée des solides en suspension, la qualité des matériaux dragués, la hauteur d'eau dans les ports et la capacité d'installation de traitement.

Après avoir établi la nécessité avérée d'extraire les sédiments, les opérations de curage peuvent débuter, donc les équipements de dragage des sédiments portuaires sont classés selon leurs méthodes d'excavation et de fonctionnement.

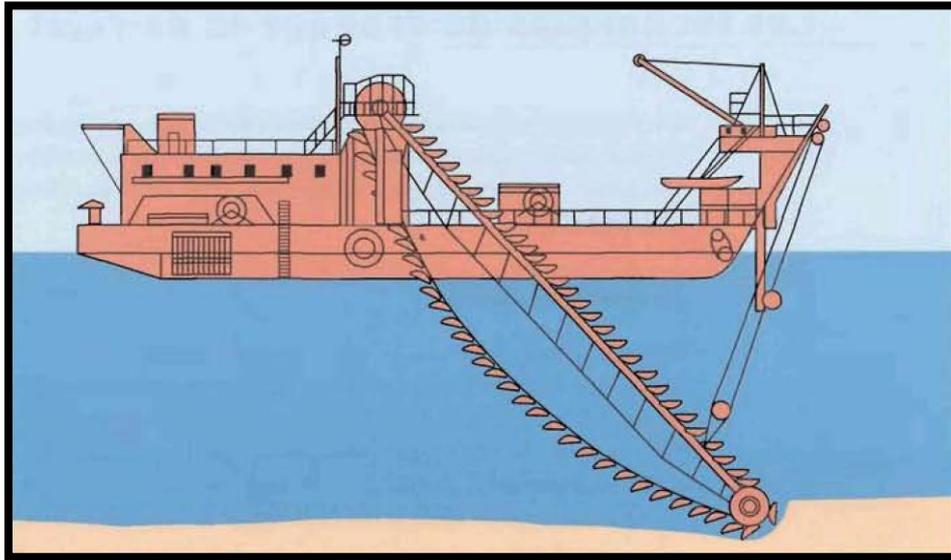
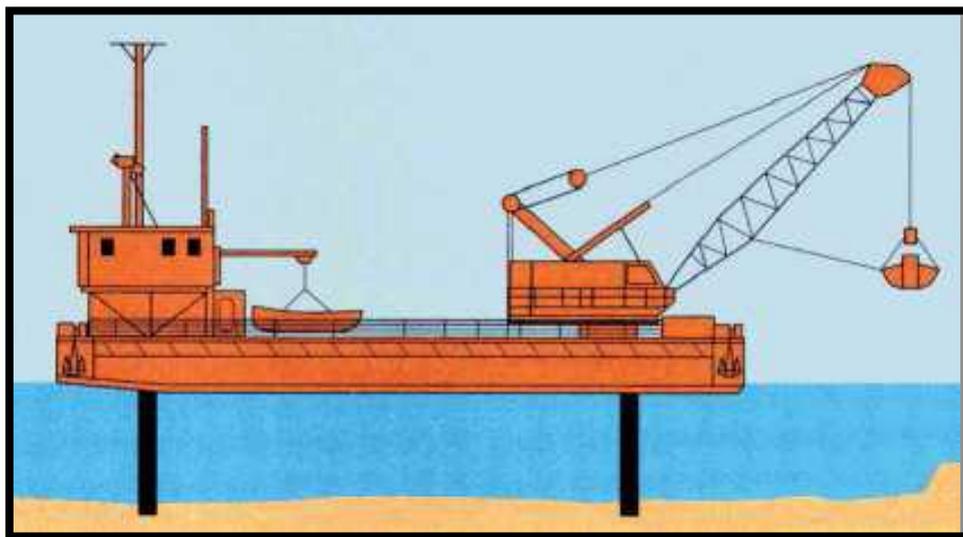
Il existe trois techniques traditionnelles de curage : mécanique, hydraulique et pneumatique. [7]

I.5.1. Les dragues mécaniques :

Le principe de fonctionnement de type de drague se fait par action mécanique d'un godet soit par une benne qui enlève les matériaux, elles sont employées en général pour l'extraction des sédiments graveleux.

Ces dragues sont utilisées dans des zones difficiles d'accès (bordures de quais, bassins étroits) et peuvent travailler jusqu'à des profondeurs de 25m (dragues à godets) à 30 m (dragues à benne). Dans le cas de dragage des sédiments cohésifs, les matériaux récoltés sont généralement assez compacts (formation de blocs) et peu chargés en eau [8].

Il en existe plusieurs types :

a). Dragage à godets :**Figure I.2 :** Représentation schématique du dragage à godets [8].**b). Dragage à benne****Figure I.3 :** Représentation schématique du dragage à benne [8].**c). Dragage à pelle :**

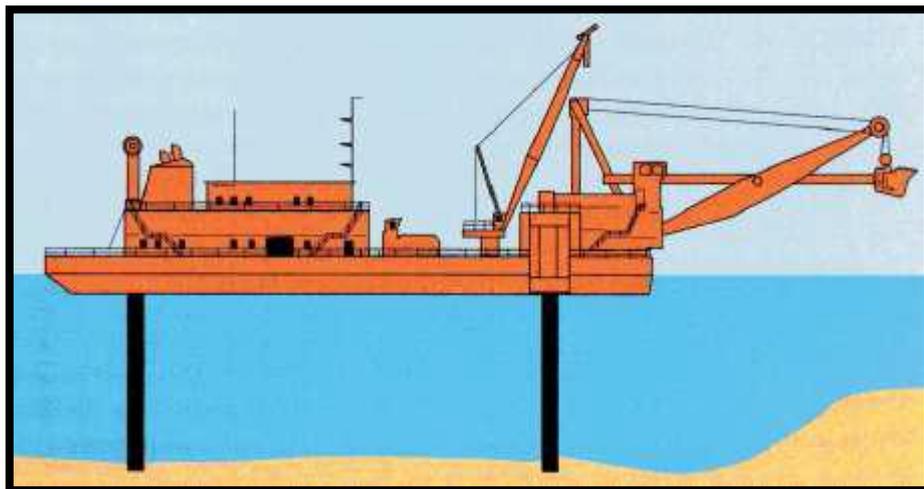


Figure I.4 : Représentation schématique du dragage à pelle [8].

I.5.2. Le curage hydraulique :

Un mélange d'eau et de sédiment est aspiré par des pompes centrifuges au travers un long tube (élinde) muni d'un embout (bec d'élinde), ce sont les dragues les plus fréquemment utilisées dans le dragage des ports.

La mixture est refoulée, selon les dragues, dans un puits, dans un chaland ou dans des conduites allant vers une zone de dépôt. Le volume du puits peut atteindre $4\,000\text{ m}^3$ (drague Paul Barillon du port autonome de Rouen) et des projets de dragues hollandaises avec des puits de $23\,000\text{ m}^3$ existent. La profondeur de dragage est inférieure ou égale à une trentaine de mètres. L'efficacité du dragage peut être accrue par l'adjonction d'un dés-agrégateur (sorte de fraise ou de roue-pelle) au niveau du bec d'élinde ; ce dernier système entraîne une augmentation des remises en suspension au niveau du fond lors des opérations de dragage [8].

Les dragues hydrauliques présentent l'avantage de faible remise en suspension des sédiments et un rendement élevé par rapport aux autres dragues :

On distingue trois familles de ce type de dragues :

a). Aspiratrice stationnaires avec conduite de refoulement :

Un premier type de dragues aspiratrices est constitué par les engins qui travaillent de façon stationnaire, sur pieux ou sur ancres. Ces dragues, s'elles ne sont pas autoporteuses, refoulent les sédiments dans des chalands ou dans des conduites flottantes [8].

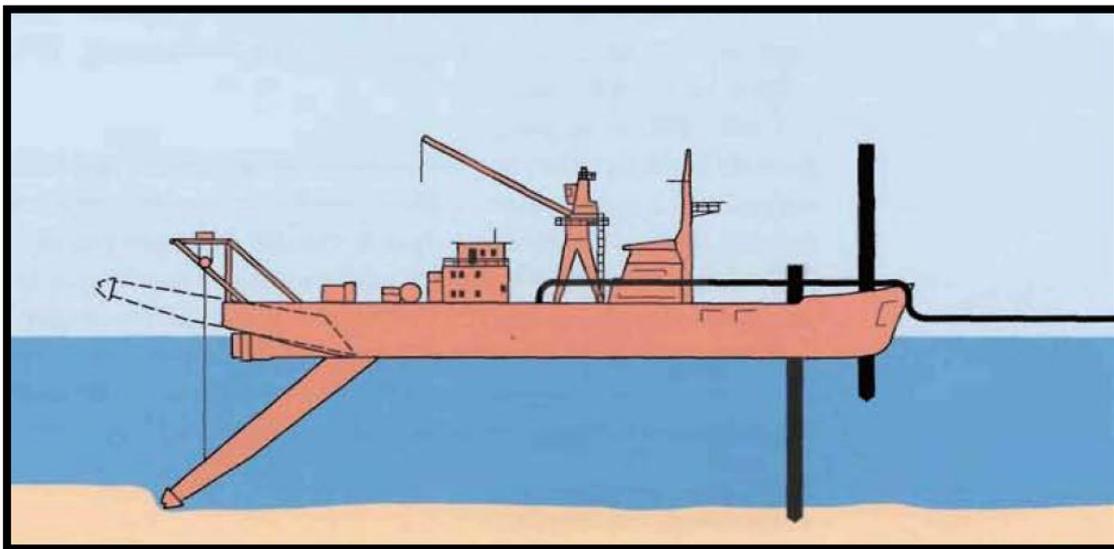


Figure I.5 : Schéma représentatif d'un aspirateur stationnaire avec conduite de refoulement [8].



Figure I.6 : aspirateur stationnaire avec conduite de refoulement [8].

b). Aspiratrice en marche :

Le deuxième type concerne les dragues aspiratrices en marche qui chargent les sédiments en puits et peuvent les évacuer, après transport, par ouverture de clapets au fond des puits ou bien par ouverture de la drague elle-même en deux (dragues fendables), voir la figure [8].

Dans les deux cas, le temps d'ouverture est de plusieurs minutes.

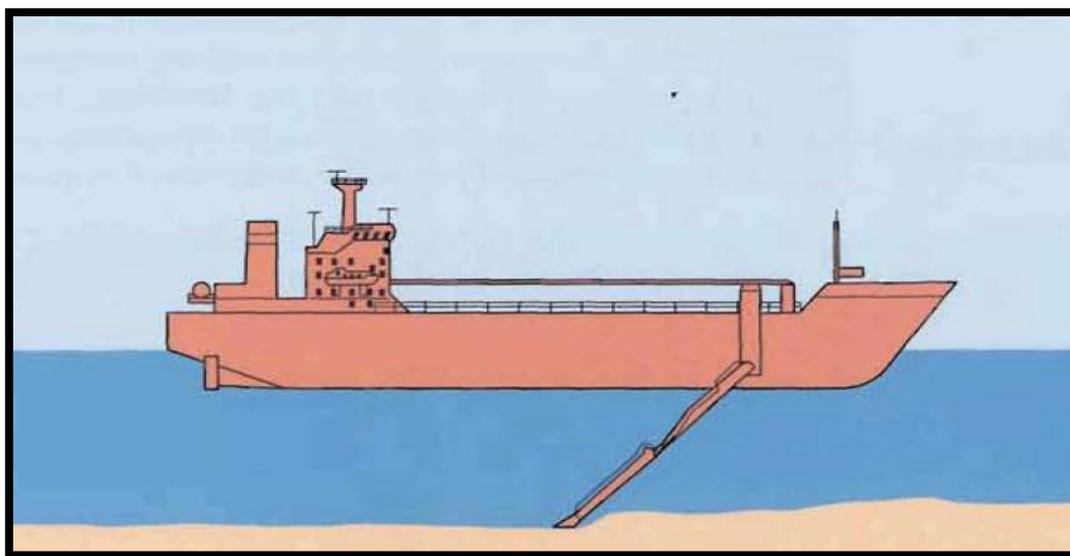


Figure I.7 : Dragage hydraulique de type aspirateur en marche [8].

L'entraînement des sédiments par les dragues aspiratrices nécessite le pompage d'une quantité importante d'eau [9].

- ✚ 10 à 12 fois en volume ;
- ✚ 8 fois environ en poids ;

Lors de la décantation des sédiments dans les puits, l'eau en excès retourne au milieu par surverse ; celle-ci constitue la source de matières en suspension la plus importante dans le cas des dragages par aspiration. Les sédiments cohésifs extraits par une drague aspiratrice sont en général plus riches en eau que ceux extraits au moyen d'une drague mécanique. Les dragages peuvent donner lieu à des opérations de surverse. Celles-ci ont pour but d'augmenter la densité de la mixture en puits de drague (notamment lorsque les sédiments contiennent une fraction sableuse).

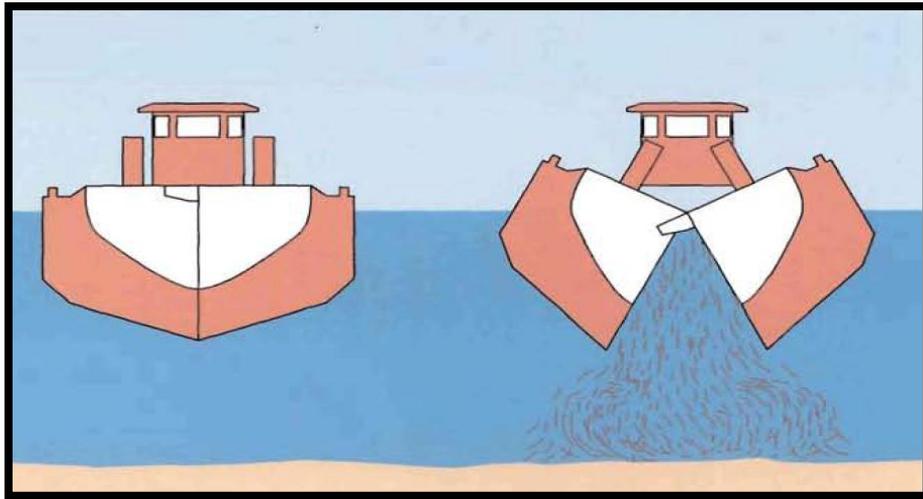
c). Dragage fendable:

Figure I.8 : représentation schématique du dragage fendable [8].

I.5.3. Le curage pneumatique :

Cette technique fonctionne par aspiration et est équipée d'un système à air comprimé. Un vide d'air est créé dans un cylindre, provoquant une arrivée des sédiments. Une fois le cylindre plein, les valves sont inversées, l'air comprimé y pénètre alors et expulse les sédiments [10].

Dans le cas d'extraire des matériaux non cohérents et en circulation ainsi qu'au traitement des sédiments contaminés, l'utilisation des dragues pneumatiques semble convenable, car elle permet :

- ✚ Un refoulement continu des boues ;
- ✚ Un contact réduit entre l'équipement et les sédiments contaminés ;
- ✚ Une remise en suspension minimum des sédiments ;

a). La technique d'injection JESTED :

La technique de dragage « JESTED » consiste à fluidiser le sol par application d'eau sous pression ou d'air comprimé ; le sédiment est alors remis en suspension et peut être véhiculé par les courants [10].

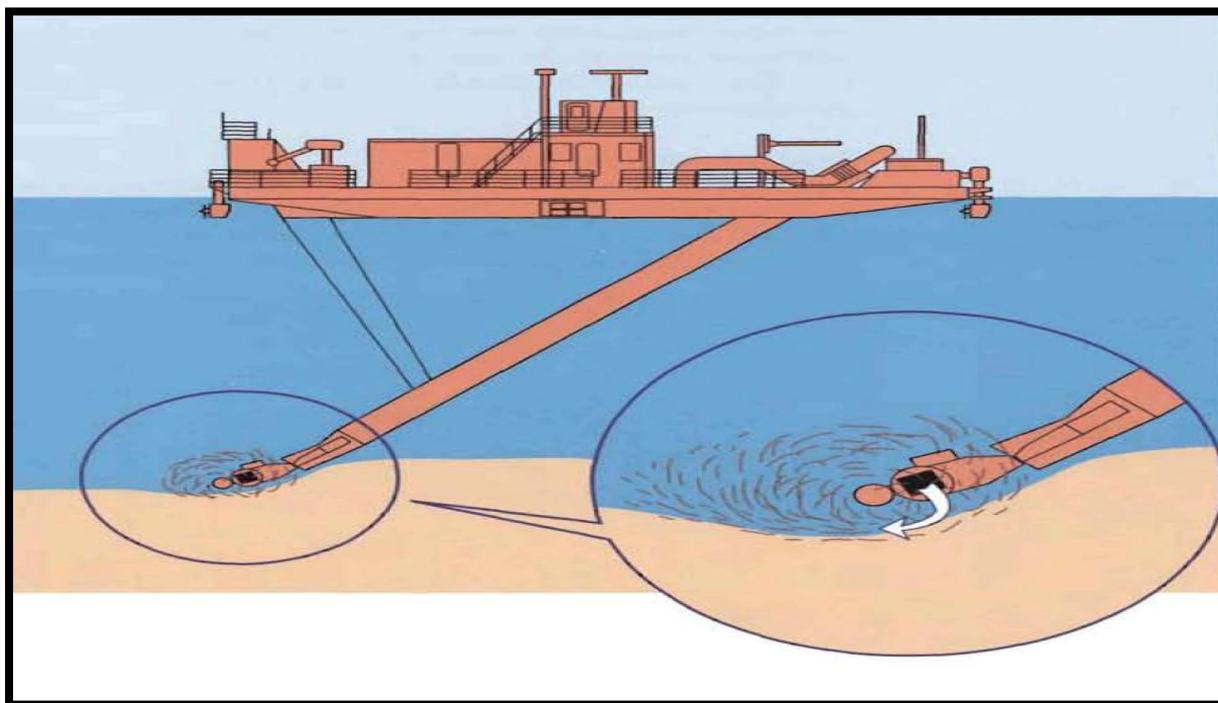


Figure I.9 : Schéma représentatif de la technique de dragage « JESTED » [10].

I.6. Les type de dragages :

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 [11].

I.6.1. Les dragages d'entretiens :

Les opérations de dragage d'entretien concernent la majeure partie des travaux réalisés dans les ports.

Ce dragage a pour but d'enlever les sédiments accumulés au fond des ports afin de conserver la profondeur nominale pour garantir la navigation [11].

I.6.2. Les dragages d'approfondissement :

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. C'est pourquoi il est le plus souvent utilisé. Généralement, ces travaux nécessitent de déplacer des volumes importants de sédiments et demandent des moyens de dragage sophistiqués [11].

I.6.3. Les dragages lors d'aménagement de nouvelles aires portuaires :

Ce type de dragage est principalement utilisé lors de la création des nouvelles aires portuaires, il a pour objectif le déplacement des volumes importants des matériaux divers : roches, sables, terres, argiles, graviers ou vases.

I.7. Le devenir des sédiments dragués :

Bien que très largement pratiquée, l'immersion n'est pas obligatoirement la destination finale de tous les matériaux dragués. En effet, selon leurs caractéristiques physico-chimiques et leur niveau de contamination, les déblais peuvent être valorisés, déposés ou confinés à terre et en mer, ou être soumis à des traitements spécifiques de dépollution [12].

I.7.1. Les mises en dépôts :

Les sédiments peuvent techniquement être mis en dépôt à terre, sous l'eau ou sur des îles. Toutefois, les dispositions liées à la protection de l'environnement marin contre les risques écologiques potentiels des immersions tendent à privilégier les dépôts terrestres.

I.7.2. Le lagunage :

Le lagunage consiste à déposer de manière temporaire sur une faible épaisseur des sédiments en vue de leur utilisation ultérieure. Différents processus interviennent au cours de l'opération qui débute par une perte irréversible d'eau.

I.7.3. Remblaiement et construction d'îles artificielles :

Lorsque les sites le permettent, d'importants dépôts à terre peuvent être construits par remblaiements cotres ou création d'îles artificielles.

I.7.4. Les dépôts sous-marins confinés :

La technique la plus courante consiste à recouvrir les sédiments déposés au fond de la mer par une importante couche de sable (1m) destinée à les isoler de la colonne d'eau sus-jacente. Connue sous le nom de capping cette pratique est peu courante en Europe.

La valorisation des déblais de dragage :

Elle est souvent recherchée pour réduire les couts de dragage et répondre à un besoin en matériaux. Trois types d'utilisation sont envisageables : amendements pour les sols agricoles (épandage), emploi comme matériaux de construction primaires (sables) ou élaborés (briques), remblaiement pour la réalisation d'infrastructures.

Cette figure montre les devenir des sédiments de dragages selon le taux de contamination des polluants

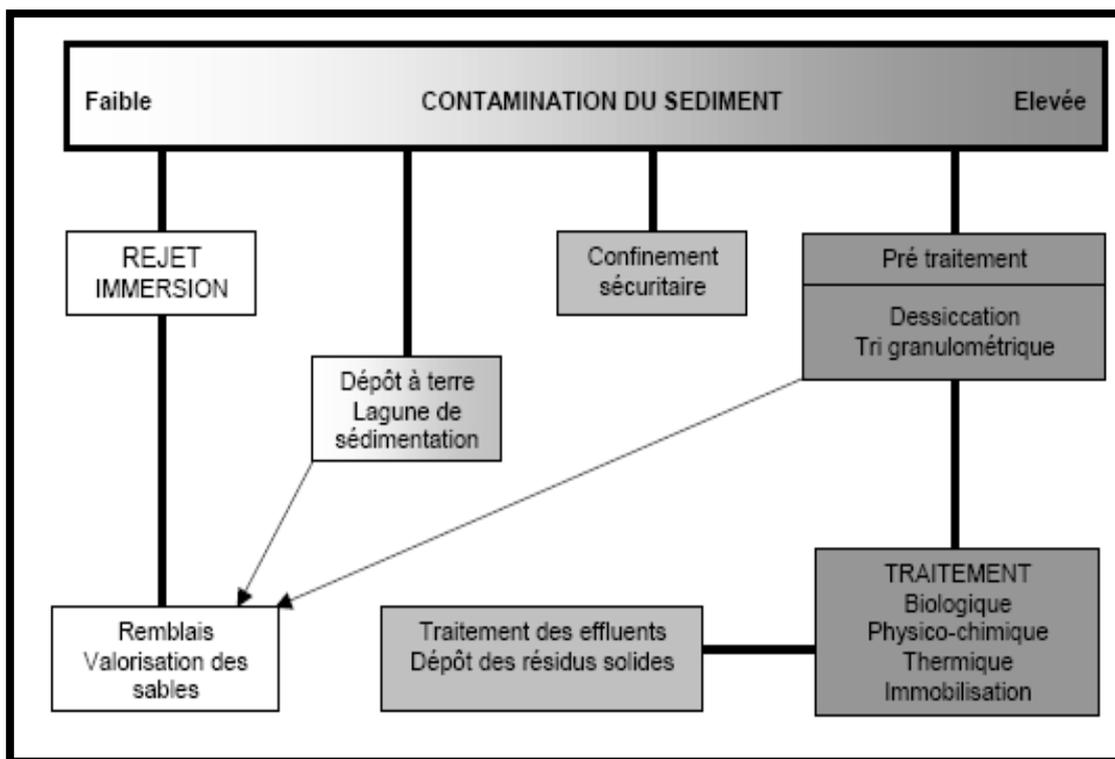


Figure I.10 : Le devenir du sédiment de dragage selon le taux de contamination [12].

I.8. Risques Environnementaux :

I.8.1. Les sédiments de dragage non contaminés ou traités :

Ils ne représentent aucun risque sur l'environnement, leur mise en dépôt n'exigent pas de prise de mesures particulières en amont. Ils sont généralement réutilisés dans plusieurs domaines comme le BTP [13]. L'agriculture ou bien dans le rechargement des plages en cours d'érosion. Parfois le rejet en eau libre est économiquement plus rentable que la mise en dépôts, mais à condition que le choix de la zone de rejet doit se faire de manière à ne présenter aucun danger pour la faune et la flore.

I.8.2. Les sédiments contaminés :

Ils représentent un danger sur l'environnement à cause de leurs taux de contamination, qui dépassent le seuil fixé par la réglementation, d'où la nécessité de procéder à un traitement avant toute éventuelle réutilisation ou mise en dépôts.

Le traitement de ces sédiments coûte cher, la mise en dépôt reste la meilleure solution pour minimiser les impacts sur l'environnement. En revanche le rejet direct sans traitement aura certainement des effets négatifs sur la qualité des eaux et sur les organismes vivants, la

faune et la flore. Ces effets peuvent atteindre l'être humain en s'introduisant dans la chaîne alimentaire [13].

I.9. Caractérisation des polluants rencontrés dans les sédiments :

Les cours d'eau, les canaux, les lacs, les ports et les estuaires sont très souvent soumis à des rejets industriels, urbains ou agricoles, entraînant l'apport d'un grand nombre de polluants.

Ces polluants sont peu solubles dans l'eau dans les conditions normales, et ils prédominent dans les matières en suspension et dans les sédiments qui par la suite deviennent des réserves de composés toxiques. Le dragage suivi d'une mise en régilage peut favoriser les relargages des polluants.

Darmendrai, rappelle les processus majeurs d'accumulation des polluants dans les sédiments : adsorption sur les solides fins, précipitation des composés métalliques Co-précipitation des métaux sur des oxydes métalliques, complexation avec des composés organiques, diffusion dans les réseaux cristallins tels que les carbonates [14].

D'une manière générale, on distingue classiquement deux familles de polluants accumulés dans les sédiments : les métaux lourds et les matières organiques toxiques [15].

I.9.1. Les métaux lourds :

La présence des métaux lourds sous de fortes concentrations est liée généralement à des rejets provenant de l'activité humaine [16,17].

Ces métaux peuvent changer de forme et devenir de ce fait plus ou moins mobiles [18,19].

De plus, leur durée de vie est infinie, les plus dangereux d'entre eux sont le plomb, le cadmium et le mercure qui ne possèdent aucune activité biologique favorable.

Deux facteurs accentuent la gravité des polluants métalliques : d'une part, ils ne sont pas biodégradables, et d'autre part, ils s'accumulent dans l'environnement et en particulier dans les sédiments en s'associant avec les matières organiques et inorganiques par le jeu des phénomènes d'adsorption, de complexation et de combinaisons chimiques [20,21,22].

a). L'arsenic (As) :

L'As est présent naturellement dans les sols à l'état de traces, à l'état dissous, l'arsenic inorganique se présente sous forme d'As (III) et d'As (V). L'As (III) prédomine en milieu anoxique [23].

Dans les sédiments récents, l'anoxie progressive solubilise à nouveau l'arsenic sous forme d'As (III) et contribue donc à sa remobilisation partielle. Par contre, dans les horizons, profonds, la présence de sulfures favorise la fixation définitive de l'arsenic et de certains

autres métaux. Les ions arsénites et arséniates sont les formes les plus dangereuses pour les espèces marines et pour le consommateur des produits marins [24].

b). Cadmium (Cd) :

Le Cd est principalement utilisé pour la fabrication des batteries, mais son introduction dans le sédiment peut résulter de l'activité minière, des eaux de lavage des routes, et des déchets d'hydrocarbures [25].

Ses niveaux de présence dépendent non seulement de contamination, mais aussi de certains paramètres physico-chimiques influant les équilibres et les distributions [26].

c). Chrome (Cr) :

Le Cr est essentiellement insoluble dans le sédiment. Alors que la forme oxydée (VI) est très soluble, la forme réduite (III) possède une forte tendance à s'adsorber sur toutes les surfaces et est donc enlevée très rapidement de la colonne d'eau sous forme particulaire [27]. Peu de données sont disponibles sur la toxicité sublétales des différentes formes d'oxydation du chrome. Le seuil sans effet (Threshold Effect Level) dans les sédiments est estimé à 52.3µg/g.

d). Le mercure (Hg) :

L'Hg présente un risque majeur pour l'écosystème et pour le consommateur humain, en raison de sa toxicité et de ses capacités de bio-magnification par la chaîne alimentaire. Le mercure peut prendre les degrés d'oxydation zéro, 1 ou 2 et former des liaisons covalentes stables en donnant ainsi des dérivés alkylés ou phénylés très toxiques [28].

e). Plomb (Pb) :

Le Pb se trouve dans le sédiment principalement sous forme de carbonates $PbCO_3$ (40 à 80%) ou de chlorures $PbCl_2$ (1 à 40 %) et $PbCl^+$ (2 à 19 %). Il présente une forte affinité pour la matière particulaire. La fraction adsorbée sur les particules en suspension augmente avec le PH et diminue lorsque le chlorite augmente.

f). Zinc (Zn) :

A forte concentration, le Zn peut provoquer des sérieux problèmes toxicologiques [29]. Il est introduit dans les zones portuaires à partir de la dissolution des masses de zinc pur fixées sur les parties immergées des bateaux, pour en assurer leur protection contre la corrosion. De plus, certaines peintures antisalissure renferment des quantités importantes d'oxydes de zinc utilisé comme adjuvant anticorrosion.

Les sources de pollution des métaux lourds dans les sédiments de dragage sont détaillées dans le tableau ci-dessous

I.9.2. Les matières organiques :

Ce sont essentiellement des composés de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, qui sont pour la plupart des produits fabriqués par l'homme. Il en existe des dizaines de milliers, dont 60 000 sont couramment utilisés.

Les plus fréquemment rencontrés dans les sédiments sont groupés dans cette liste

Tableau I.2 : Représentation les sources de pollution des métaux lourds dans les sédiments de dragages [30].

Cadmium	Engrais phosphatés ; industries de traitement de surface des métaux ; industrie déstabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles ; fabrication de caoutchouc ; colorants ; eaux de ruissellement des voies de circulation.
Cuivre	Canalisation d'eau ; fils électriques ; radiateurs automobiles ; appareils de chauffage ; traitement de surface.
Zinc	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; conduites d'eau ; 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 ; électrographie ; catalyse ; pyrotechniques ; céramiques ; produits pharmaceutiques ; épilage des peaux en tannerie et mégisserie ; durcissement du cuivre et du plomb ; fabrication des batteries.

I.9.3. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) :

Les HAP sont des substances dont la structure chimique est constituée de plusieurs noyaux aromatiques ayant en commun plus d'un atome de carbone. Les HAP présents dans l'environnement résultent de différents processus dont la biosynthèse par des organismes vivants, les pertes à partir du transport ou d'utilisation des carburants fossiles, la pyrolyse des matières organiques à haute température, la combustion des charbons et pétroles [31].

En raison de leur caractère lipophile, les HAP sont concentrés dans les sédiments et les organismes vivants ; les niveaux rencontrés dépendant de la nature et des sources de contaminations.

Les HAP peuvent interagir avec les mécanismes cellulaires, soit directement en se fixant sur les sites lipophiles, soit indirectement par liaison de leurs métabolites hydrophiles avec des structures cellulaires (protéines, ADN), provoquant ainsi des effets à long terme.

I.9.4. Le polychlorobiphényles (PCB) :

Le PCB désigne une famille de composés organochlorés de synthèse de haut poids moléculaire et de formule chimique $C_{10}H_{(10-n)}Cl_n$. produits industriellement depuis 1930, ces mélanges ont fait l'objet de multiples utilisations comme additifs dans les peintures, les encres et les apprêts destinés aux revêtements muraux, puis ont été progressivement interdits.

Le PCB est introduit dans l'environnement, et en particulier dans les sédiments par différentes activités humaines : combustion incomplète des matériaux, déchets des décharges des produits pétroliers, post-dépôts de la transformation des précurseurs biogéniques [32].

I.9.5. Les tributylétains (TBT) :

Les TBT sont des composés organiques qui ne sont considérés des polluants du milieu marin que depuis le début des années 1980, en raison de leur utilisation comme matière active des peintures antisalissure. Ces dernières, destinées à la protéger la carène des navires contre la fixation d'organismes vivants, agissent en diffusant dans le milieu des quantités importantes de Tributylétains. Dans l'eau de mer, le TBT se trouve à l'état dissous sous forme d'hydroxyde de carbonates ou chlorures et est faiblement associé aux matières en suspension (5%).

I.9.6. Les sulfures :

Divers composés de soufre se constituent dans les sédiments. Ces composés soufrés sont essentiellement insolubles. Les formes inorganiques du soufre fréquemment rencontrées dans le sédiment sont les sulfates, les sulfures élémentaires et les sulfures métalliques tel que le FeS et la pyrite. L'essentiel du soufre dans le sédiment est sous forme inorganique, dans les conditions anaérobies, ou le milieu est réducteur, il se trouve sous forme de sulfure et dans le sédiment aéré, où le milieu est oxydant, il est de forme sulfatée (plus mobile).

Quant au soufre organique, il se trouve généralement sous deux formes : soit dans le groupe des esters, soit lié au carbone.

I.10. Traitement des sédiments :

Avant toute opération de valorisation des sédiments, ces derniers doivent être analysés pour déterminer leur degré de contamination, et subir, si c'est nécessaire, un traitement, pour être enfin prêts à leur destination finale.

Le traitement des sédiments pollués nécessite, généralement, une combinaison de techniques, car chacune d'entre elle ne peut traiter que partiellement la pollution, vu la complexité et la diversité des contaminants présents aux sédiments. Ces contaminants sont liés majoritairement à la fraction fine de ces matériaux (limon et argile).

Ce traitement peut être effectué selon l'une des façons suivantes :

- Destruction de la charge polluante.
- Extraction de la charge polluante.
- Immobilisation ou neutralisation de la charge polluante.

Le mode de traitement à mettre en œuvre dépend, généralement, de la quantité des sédiments, de la nature de pollution, du but attendu de dépollution et l'utilisation du matériau traité.

Les techniques de traitement sont assez nombreuses, et peuvent être regroupées en cinq classes, dépendantes de leurs principes de fonctionnement :

- Prétraitement ;
- Traitement biologique ;
- Traitement physico-chimique ;
- Traitement thermique ;
- Traitement par immobilisation ;

Les eaux extraites des sédiments de dragage peuvent contenir une bonne partie des polluants, elles doivent aussi faire l'objet d'un traitement avant leur rejet [33,34].

I.10.1. Prétraitement :

Le prétraitement est une phase pour préparer le matériau au traitement approprié, il peut servir aussi à la séparation des sédiments et détritiques ou leur déshydratation.

Il permet de réduire le coût des traitements ultérieurs par la minimisation de la partie à mettre en dépôt et maximisation de quantité des sédiments valorisables.

Parmi les principaux types de prétraitement on cite :

I.10.1.1. La déshydratation :

S'effectue pour diminuer la teneur en eau des sédiments, par dépôt en aires d'assèchement, par évaporation, par centrifugation ou par filtration.

I.10.1.2. Le séchage et évaporation :

Le séchage se réalise à l'air, en étuve ventilé à une température inférieure à 40°C, par voie chimique ou par lyophilisation.

I.10.1.3. Le criblage :

Se fait à l'aide de crible à tambour, séparateurs magnétiques ou rotatifs ou écrémeurs. Il a pour objectif d'éliminer les débris qui peuvent perturber le cycle de traitement.

I.10.1.4. La séparation par densité :

L'utilisation de matières chimiques moussantes et de l'air permet aux particules polluantes d'adhérer à la mousse flottante, et par suite séparer les contaminants des sédiments.

I.10.1.5. La séparation magnétique :

S'effectue en adoptant les techniques de séparation magnétique ou électrostatique. Elle est utilisée surtout dans des situations particulières telles que les affinités entre les métaux et les oxydes de fer car si la pollution est diversifiée, l'adoption de cette méthode est limitée.

I.10.1.6. Le cyclonage :

C'est une opération qui consiste à la séparation de la fraction fine de la fraction grossière d'un matériau par un effet vortex, en utilisant un tube conique, appelé hydro cyclone.

I.10.1.7. L'attrition :

C'est un procédé qui utilise les forces de frottement entre grains au moyen d'une agitation pour séparer les polluants des grains de matériau [33,34].

I.10.2. Traitement biologique :

Il consiste à introduire des micro-organismes (bactéries, champignons, ou enzymes) capables de détruire (et/ou) extraire les micropolluants organiques ou d'accélérer le processus de la décomposition naturelle des contaminants organiques [34].

Ces micro-organismes affaiblissent les liaisons chimiques des PCB, des contaminants organiques, HAP ou pesticides, et les transforment en matières moins nocives, comme dioxyde de carbone, méthane, sels inorganique...etc.

Ce procédé nécessite des conditions de température, d'aération et de nutrition favorables à l'activité des micro-organismes.

On peut aussi utiliser les plantes et les microorganismes, ces derniers peuvent traiter des contaminants organiques (et/ou) inorganiques, sachant que les mécanismes de

fonctionnement sont différents ; dans le cas de contaminants organiques il s'agit d'une dégradation, alors que dans le cas de contaminants inorganiques il s'agit d'une solubilisation puis lixiviation des contaminants.

Souvent on utilise les plantes pour le traitement des métaux lourds, c'est une méthode qu'on peut mettre en œuvre in situ, mais on risque de contaminer la chaîne alimentaire. [35] [34]

I.10.3. Traitement chimique :

Ce traitement est fondé sur des lois et principes des interactions physico-chimiques telles que l'adsorption/désorption, oxydo-réduction, échange ionique ou l'adaptation du PH pour détruire, fixer ou transformer les matières toxiques.

Il existe deux groupes de techniques de traitement chimique :

- Les techniques fondées sur l'extraction des polluants.
- Les techniques visant la destruction ou l'altération des contaminants.

Les techniques de traitement par extraction se diffèrent selon qu'il s'agit d'un contaminant organique ou métaux lourds. Cette distinction donne lieu à trois grandes familles de techniques de traitements chimiques :

I.10.3.1. Extraction des métaux :

L'ajout d'acide, ou l'introduction de micro-organismes, permet la réduction de la concentration en métaux lourds. La présence d'un ou deux métaux montre clairement l'efficacité des techniques de cette famille, elles sont réservées aux sites gravement pollués, car leur coût reste élevé.

I.10.3.2. Extraction des matières organiques :

Les polluants organiques, présents dans les sédiments, sont extraits par l'action de solvants organique utilisés pour le lessivage. Cette méthode est lente et coûteuse ce qui limite son utilisation.

I.10.3.3. Destruction des substances organiques :

Cette technique visant la destruction des matières organiques présentes dans les sédiments, utilise des agents très oxydants, comme l'eau oxygénée, l'ozone ou l'air liquide. Mais ces agents ne s'attaquent pas seulement aux polluants organiques, ce qui donne lieu à l'oxydation inutile d'autres matières organiques naturelles.

L'une des techniques de traitements chimiques, les plus importantes, en cours de développement, consiste à introduire des micro-organismes producteurs de l'acide sulfurique capable d'absorber les contaminants organiques, s'avère particulièrement prometteuse pour tous les métaux sauf le plomb [35] [33].

I.10.4. Traitement thermique :

C'est un procédé efficace mais coûteux, Il permet la destruction des polluants par chauffage grâce à des températures élevées provoquant la combustion et la destruction des contaminants.

Les principales méthodes sont :

I.10.4.1. Désorption :

Grâce à la chaleur (entre 550 et 600°C) les contaminants organiques sont volatilisés et récupérés par condensation sous forme huileuse facilement récupérable. C'est une méthode très efficace, elle peut atteindre 99% pour les PCB et HAP. Des contaminants métalliques comme le mercure, l'arsenic ou le cadmium sont volatilisés à une température de 800 °C.

I.10.4.2. Incinération :

Cette méthode est aussi très efficace par oxydation à haute température (800-1200°C), une partie des métaux lourds se fixe sur une structure cristalline qui se forme suite à la destruction des matières organiques.

I.10.4.3. Réduction thermique :

C'est une nouvelle technique qui ne produit pas de fumée, insensible à la présence d'eau dans le sédiment et utilise une température élevée. La présence dans le réacteur de gaz autre que l'oxygène (l'hydrogène généralement) provoque la transformation des matières organiques en matières plus légères et moins toxiques.

I.10.4.4. Vitrification :

Cette méthode ressemble à la désorption mais en plus elle permet la fixation des métaux, car leur fusion avec les silices permet la vitrification des matériaux et produit par conséquent des matériaux de construction. [33,34], [35]

I.10.5. Traitement par immobilisation

Cette technique vise l'immobilisation des contaminants par leur fixation ou leur solidification sur la matrice solide des matériaux.

On peut citer ici deux types de traitements :

I.10.5.1. Fixation : par ajout d'agents chimiques, des éléments polluants sur la matrice solide des sédiments, cela permet d'éviter leur migration. L'une des méthodes de fixation consiste à augmenter le PH des sédiments par ajout de grande quantité de matières oxyhydyles, et immobiliser alors la plupart des métaux présents dans le matériau.

I.10.5.2. Solidification :

Les éléments polluants sont solidifiés sur la matrice solide pour empêcher leur déplacement physique. Cette technique est réalisée par vitrification ou par ajout de liants (ciment, chaux, polymère, matériaux pouzzolanique) et surtout le ciment [35].

I.10.6. Traitement d'eau :

Comme signalé ci-dessus, les eaux extraites des sédiments peuvent contenir une partie considérable des polluants, et doivent par conséquent être traitées avant leur rejet, conformément aux lois et normes en vigueur, afin d'éviter de polluer le milieu récepteur.

La filtration (par lit de sables, à membrane ou biologique) et la décantation forcée (en réservoir, en bassin ou par surverse) restent les procédés les plus efficaces pour le traitement des eaux issues des sédiments contaminés, car les contaminants dans ce cas sont généralement liés aux particules solides en suspension [33].

I.11. Domaines de valorisation des sédiments de dragage :

La valorisation des sédiments de dragage constitue une issue pour le problème de gestion de ces matériaux.

Nombreuses sont les voies possibles de valorisation des sédiments de dragage. En effet, les secteurs de travaux publics, l'environnement, ou l'agriculture et aquaculture peuvent absorber des quantités importantes de ces matériaux, et constituer par conséquent des destinations potentielles pour les sédiments de dragage.

a). Génie civil et BTP :

Dans le domaine de génie civil et BTP, les sédiments de dragage peuvent constituer une alternative des granulats produits en carrières et gisements terrestres. Ceci est justifié par la raréfaction et la limitation d'extraction des matériaux nobles, et le souci de développement durable et protection de l'environnement, sachant que près de 30 % des matériaux dragués sont des sables potentiellement de bonne qualité.

Ces sédiments peuvent être employés comme matériaux de construction dans les aménagements de routes et ferroviaires, ou la fabrication de ciments, des briques, des agrégats, des carreaux et du béton, ils peuvent également être employés comme remblais, digues, barrages, barrière antibruit ou pour le rechargement des plages ...etc.

Chacune de ces utilisations dépend des caractéristiques (physico-chimiques et mécaniques) requises dans le domaine. Parfois une correction granulométrique ou un traitement des sédiments s'avère nécessaire pour répondre aux exigences de l'utilisation [34].

b). Environnement :

Dans cette filière, il est possible de réutiliser les sédiments à titre d'exemple pour :

✚ Amendement des sols :

C'est une opération qui consiste à dresser de grandes quantités de matériaux, sur une épaisseur pouvant atteindre un mètre, couvrant des sols érodés ou en friches, le sol évoluera ainsi par lui-même pour obtenir en quelques années une prairie permanente, par exemple.

Les sédiments peuvent être aussi utilisés comme matériau permettant de réaliser des modelés de terrains dans le cadre d'aménagements des paysages ou de reprofilage de certains terrains, et pour le rechargement d'anciennes carrières et ballastières dans le cadre de la remise en état des lieux. Il peut être utile pour la création des espaces pour les industriels, pour des parcs de loisirs, pour des aménagements ferroviaires ou routiers ou encore pour la création d'îles artificielles [11].

✚ Réhabilitation de sites naturels :

L'un des emplois possibles des matériaux de dragage est leur réutilisation pour restaurer l'environnement ; ils peuvent servir, par exemple, à la construction d'habitats aquatiques ou terrestres pour la faune (oiseaux, poissons.), ou pour la création de parcs naturels (îles.) et la restauration de zones humides [11].

c). Agriculture :

L'épandage des sédiments sur un sol cultivable est une technique de valorisation très intéressante qui peut enrichir les sols pauvres en éléments nutritifs et améliorer par conséquent qualité et son rendement, ou corriger leurs PH et rendre les terres plus adaptées au développement des plantes.

Il peut être utile pour améliorer des aires de loisirs, des parcs, des terrains de golf.

Cette opération doit être entreprise sans porter atteinte au milieu récepteur [11].

I.12. Conclusion :

On se ressourçant des documents, nous nous sommes rendu compte que :

- ✚ L'altération et la désagrégation sont des phénomènes qui causent le dépôt des sédiments continentaux ou marins.
- ✚ L'opération de dragage est indispensable dans le curage et la gestion des sédiments des ports, ainsi que leur maintenance et prévenir le risque d'inondation.
- ✚ Les équipements de dragage des sédiments portuaires sont classés selon les méthodes d'excavation et de fonctionnement, dont on distingue : dragage mécanique, hydraulique et pneumatique.

- ✚ Il existe différents types de traitement des sédiments, selon les types des polluants contenus dans les sédiments.
- ✚ Le traitement des sédiments est complexe devant l'obligation de la protection de l'environnement, et leur valorisation reste encore timide par rapport aux quantités des matériaux dragués.

Chapitre II

Généralités sur les briques

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons alors présenter les généralités en ce qui concerne les minéraux argileux, historique de leurs utilisations, leurs classifications et leurs propriétés qu'ils possèdent...etc.

Par la suite nous allons définir, expliquer la brique et son procédé de fabrication, on mettant l'accent sur les différentes formes des briques qui existent.

II.2. Situation géographique du gisement :

Le gisement d'argile d'Oued Remila est découvert en 1979, alors que son extraction au niveau de la carrière est réalisée en 1984. La carrière est située sur le territoire de la commune de Tinebdar, daïra de Sidi Aich, wilaya de Bejaia. Elle est localisée sur la rive droite de l'Oued de Remila, soit à 1500 m de la piste au Nord de la route nationale RN 26 reliant El-Kseur à Sidi Aich. A 200 m avant d'arriver à la briqueterie, une piste de carrière mène à cette dernière en traversant l'Oued Remila [36].

L'environnement immédiat de la carrière est loin des lieux urbains, la carrière présente des conditions favorable à l'exploitation.

II.3. Aperçu sur la géologie du gisement :

La géologie de la région peut être résumée par la présence des formations du Trias, Jurassiques, Crétacé et Cénozoïques.

L'air du gisement fait partie du massif montagneux d'Oued Remila. Ce gisement est constitué par destruction des roches sédimentaires résiduelles (héritage) ou bien transportées (altération) couvrant une superficie de .

Le gisement d'argile de Remila a fait l'objet d'une étude géologique détaillée par la SNMC (Direction de la Recherche et d'Etude géologique DREG, 1983). Les travaux de prospection sont menés sur la base d'un réseau de sondages et de creusement de tranchées.

Les analyses effectuées sur les échantillons prélevés ont permis de maîtriser les caractéristiques qualitatives de la matière première.

Les dépôts marins du miocène inférieur participent à la constitution de l'assise utile du gisement. Ils sont représentés par des argiles compactes, modérément plastique, jaune, grise à gris-jaunâtre. La puissance totale de l'assise utile argileuse est supérieure à 180 m, quelques intercalations métriques de marno-calcaires y sont rencontrées [36].

La région de la carrière présente d'importantes potentialités en eau. Elle se situe dans la zone de rencontre de l'Oued Soummam avec son influent Oued Remila.

Le réseau hydrographique est très diversifié. Les cours d'eau en tresse sont très nombreux. Ils prennent naissance sur les collines boisées du massif d'Akfadou dominant les paysages au Nord. Ils drainent un important mini-bassin versant à précipitations atmosphérique derniers se déversent dans l'Oued Remila qui atteint des débits considérables en hivers.

Les eaux de ruissellement ainsi collectées alimentent l'Oued Remila qui se jette à la mer à 25 km au Nord. Ils convergent vers la plaine de l'Oued Soummam qui est entourées de terrasses alluviales dont la majorité sont exploitées.

Les potentialités hydrogéologiques de la région sont importantes et prouvées. La nappe aquifère de l'Oued Soummam est très bien connue et de nombreux forage y sont réalisés. Elle aliment la majorité des agglomérations et de localités situées autour de la vallée. Elle est constituée par les alluvions plaines de l'Oued Soummam. A ce niveau de la vallée, la nappe présente une largeur appréciable de plus de 1200 m [36].

II.4. Caractéristiques des argiles d'Oued Remila :

Les argiles d'Oued Remila sont homogènes en profondeur comme en surface, la coupe lithologique du gisement (du haut vers le bas) est comme suit :

- ✚ De 0 à 0.8 m : terre végétale et limons ;
- ✚ De 0.8 à 3 m : zones d'infiltration, argile jaune à précipitations de carbonates ;
- ✚ De 3 à 18 m : argiles marneuse compacte plus ou moins plastique, de couleur jaunâtre (jaune à gris) avec intercalations d'argiles sableuses et grès argileux ;
- ✚ De 18 à 24 m : argile marneuse grise compacte avec intercalations d'argiles sableuses rarement de grès argileux de 1.5m, ainsi que la présence de gypse et de quelques cristaux de pyrite [36].

II.5. Historique d'utilisation d'argile dans la construction :

Le besoin de se protéger de façon durable des intempéries et des prédateurs impose à l'homme de trouver des matériaux durs et résistants. La pierre naturelle ou les troncs d'arbre peuvent remplir cet office dans les régions où ils peuvent être facilement prélevés.

Dans les pays où la végétation est rare, notamment les pays méditerranéens, l'argile constitue l'un des premiers matériaux de construction utilisés [37].

La brique est facilement réalisable à partir d'argile ou de terre crue, on a parlé au XIXe siècle de terre franche. Cette brique de terre crue d'autre part, abandonnée au feu, acquiert solidité et

dureté. On lui enlève surtout l'inconvénient de se délayer dans l'eau. Ce progrès profite aux briques aussi bien qu'aux tuiles, aux carreaux et à la céramique en générale.

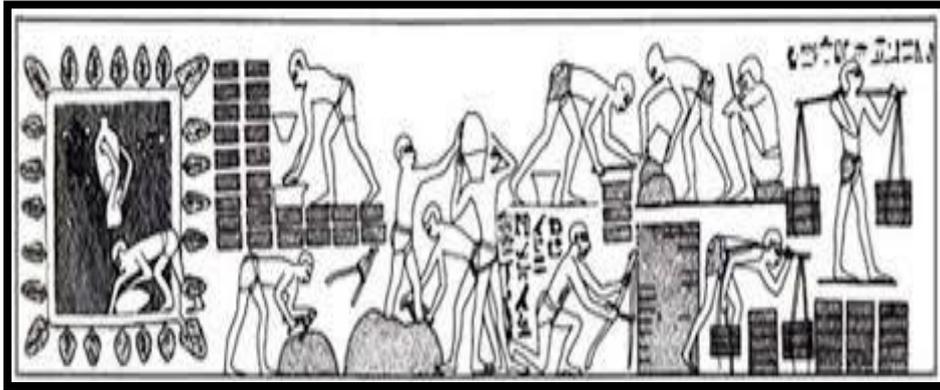


Figure II.1 : Utilisation ancienne de la brique dans la construction des murs [37].

Alors que la fabrication des briques s'est mécanisée et standardisée (d'abord en Grande Bretagne, en Belgique et en France), abaissant sensiblement le cout de la construction tout en augmentant sa résistance.)

Un grand et nouveau progrès est encore réalisé le jour où l'on a su recouvrir cette terre qui reste poreuse et absorbante, d'une couche vitreuse imperméable, d'une glaçure. Ce progrès profite toutefois plus aux tuiles et à la poterie, qu'aux briques pour lesquelles son usage reste marginal [38].

La Porte d'Ishtar dans l'actuel Irak, ou le palais de Darius I^{er} à Suze dans l'actuelle Iran, montrent l'usage maîtrisé des décors en brique de terre cuite émaillée et colorée, qu'avaient les néo-babyloniens et d'autres part les Achéménides. Au XV^e siècle, le nord de l'Italie deviendra maître dans l'art de la décoration des habitations et monuments avec des frises, des guirlandes et des festons constitués tout de briques émaillées.

D'abord modelée, la brique apparait entre le huitième et le septième millénaire av J-C, dans la région du Tigre et d'Euphrate. Les premières maisons en brique ont été découvertes en Mésopotamie, actuellement c'est l'Irak, et l'on estime que l'usage de la brique s'étend rapidement dans tous le Moyen-Orient [39].

La figure I.1 représente les briques émaillées qui sont connue déjà dans Mésopotamie antique remonte au VI^{ème} siècle avant J.C



Figure II.2 : Brique émaillée (VI^{ème} siècle av. J-C) [39].

La brique crue est simplement moulée puis séchée au soleil, pour la rendre plus résistante. Elle permet de monter des habitations ou des monuments comme la pyramide d'Amenemhat III, mais reste fragile et résiste mal aux intempéries. Son utilisation se généralise au quatrième millénaire, avec l'invention et l'emploi du moule à briques aux dimensions normalisées, donnant naissance aux premières cités urbaines [40].

La cuisson de la brique est expérimentée en 2500 av. J.-C., en Mésopotamie et dans la vallée de l'Indus. [39]

La cuisson permet de réaliser des constructions plus imposantes. La brique de terre cuite, constitue la première pierre artificielle ou pierre factice, longtemps avant le béton de ciment. La Rome antique, met en œuvre les briques crues dans l'opus latericium, et les briques cuites dans l'opus testaceum. Les briques sont carrées et peuvent être fractionnées en éléments rectangulaires ou triangulaires.

Si en France, Paris, tirant parti du calcaire lutécien du Bassin parisien, demeure une ville de pierre, beaucoup de villes et pays où la pierre à bâtir est rare seront des villes de brique. Le Gothique de brique est un style spécifique de l'architecture gothique en Europe du Nord, en particulier dans le nord de l'Allemagne et les régions autour de la mer Baltique, qui ne disposent pas de ressources en pierre naturelle construiront en utilisant essentiellement la brique.

Les édifices gothiques de briques se trouvent en Biélorussie, Danemark, Estonie, Finlande, Allemagne, Lettonie, Lituanie, Pays-Bas, Pologne, Russie et Suède. À Londres, la pénurie en pierre de taille de qualité fait de celle-ci une ville de brique [39].

Lors de la révolution industrielle, les briqueteries se regroupent, et forment de véritables usines. Des fours à charbon permettent d'augmenter la capacité de production : des fours plus grands, plus efficaces (le Four Hoffmann, où la production de brique se fait en continu, le four Bull, etc.) et de grandes cheminées de briques deviennent les éléments caractéristiques de ces briqueteries. En France, Toulouse et ses 170 briqueteries devient un important producteur de briques. Aujourd'hui, les briqueteries ont pratiquement disparu en Europe [39].

En 1830, Auguste Virebent dépose le brevet d'invention d'un système de presse à briques. Ceci est un jalon de l'industrialisation de la brique. Il met au point aussi la « plinthotomie », invention fonctionnant comme un emporte-pièce, pour découper diverses formes dans de la glaise fraîche. Cette technique permet de s'affranchir des sculpteurs, et d'industrialiser la fabrication. L'après-guerre marque le remplacement progressif de la brique par le béton de ciment et l'acier [41].

À la fin du XX^e siècle, les chocs pétroliers à répétition, la prise de conscience écologique consécutive au dérèglement climatique, conduisent l'industrie à briqueterie à des innovations majeures pour réduire la consommation énergétique et l'impact environnemental liés à la fabrication des produits :

- La récupération de l'air chaud lors du refroidissement des produits dans le four qui est redirigé vers les séchoirs, permet d'économiser près de la moitié de la consommation en énergie de ces derniers,
- L'utilisation de sources d'énergie alternatives : la biomasse (ex : déchets de bois), le biogaz (issu de centre d'enfouissement) et l'énergie photovoltaïque ou éolienne en cours de développement permettent de réduire de moitié la consommation en énergie fossile de nombreuses usines,
- Le suivi rigoureux du cycle de cuisson par voie informatique et la réalisation de bilans thermiques ont permis d'optimiser le processus.

Au niveau européen, l'énergie nécessaire à la fabrication des briques (1 m² de mur) a ainsi diminué de 39% entre 1990 et 2007 [42].

Enfin dans les pays industrialisés, les coûts d'approvisionnements énergétiques poussent certaines briqueteries à se diversifier dans la fabrication de briques en terre crue.



Figure II.3 : Un ragment de brique à décor floral exposé au musée de Louvre [42].

II.6.Définition de l'argile :

Le mot argile est issu de latin "Argilla" ou de grec "Argollos" « terre du potier », dérivé du mot "Argos" qui veut dire blanc [43].

En géologie et science du sol, le terme **argile** correspond à l'ensemble des minéraux présentant une taille inférieure à 2 μm dans une roche. Cette coupure granulométrique invisible à l'œil est héritée des études pétrographiques effectuées par microscopie optique à la fin du XIX^e siècle. Les cristaux présentant alors une taille inférieure à 2 μm n'étaient pas reconnaissables et classés sous l'appellation argile [44].

Au début du vingtième siècle (1919), Atterberg avait donné un sens granulométrique au mot argile, elle est définie actuellement comme étant la fraction passant au tamis de deux microns [45].

Tableau II.1 : Classification granulométrique d'une particule argileuse, selon le critère dimensionnel des grains de sol (Atterberg, 1919).

200 mm	20 mm	2 mm	80 μm	20 μm	2 μm	0.2 μm
Cailloux	Gravier	Sable gros	Sable fin	Limon	Argile	Colloïdales

Aujourd'hui, l'appellation argile diffère en fonction des domaines d'étude. Ainsi, en géotechnique, où l'on s'intéresse avant tout au comportement mécanique des sols, En science des argiles, l'argile ne correspond pas à une coupure granulométrique, mais à des minéraux.

Le terme est alors utilisé pour décrire les phyllosilicates et plus particulièrement les minéraux argileux [44].



Figure II.4 : Photo des différents minéraux argileux [44].

II.7. Les roches argileuses

Les roches argileuses sont des roches sédimentaires ou résiduelles à grains très fins contenant au moins 50% de minéraux argileux. Ce sont des roches exogènes principalement formés à partir des minéraux préexistants, par réaction de la croûte terrestre au contact de l'hydrosphère ou l'atmosphère.

Elles se divisent en argiles calcaires, argiles sableuses, micacées. Elles peuvent être déposées en horizon ou couches de faible puissance, alternant avec d'autres couches rocheuses telles que calcaires, grès, évaporites...etc [46].

Elles peuvent aussi constituer des masses par empilement quasi-continus de couches épaisses, parfois même sans stratification apparente (argilite). En présence de minéraux détritiques, les argiles contiennent souvent des débris, morceaux ou clastes de roches divers.

Des études par diffraction des rayons X ont permis de décrire ces minéraux comme un empilement de feuillets unitaires, formant une structure du type de jeu de cartes [47].

II.8. Structure des argiles

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par la juxtaposition des couches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium).

Ces derniers sont classés en trois grandes familles selon l'épaisseur des feuillets (0,7 ; 1,0 ou 1,4 nm), qui correspondent à un nombre de couches d'oxydes tétraédriques (Si) et octaédriques (Al, Ni, Mg, Fe²⁺, Fe³⁺, Mn, Na, K, etc.). L'interstice entre feuillets peut contenir de l'eau ainsi que des ions. Il en résulte des variations de la distance entre feuillets, et donc des variations dimensionnelles macroscopiques de l'argile quand elle s'hydrate (dilatation) ou s'assèche (contraction) pouvant provoquer des fissures. Un matériau sec qui contient beaucoup de minéraux argileux « happe à la langue » (absorbe de l'eau en formant une pâte plastique) [48].

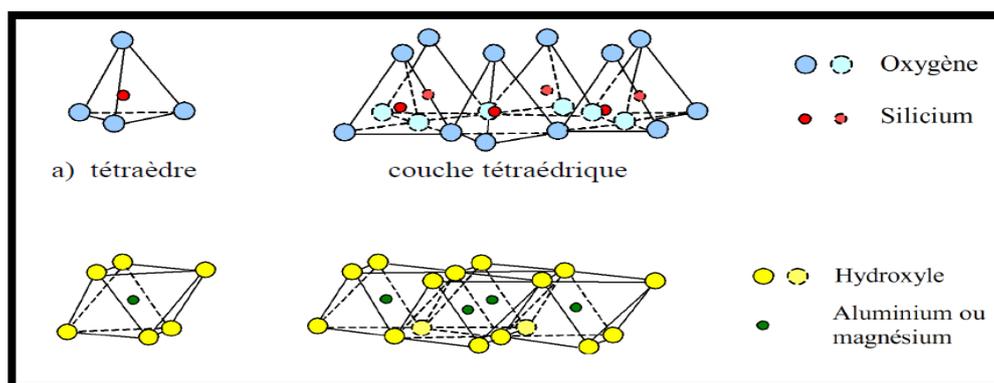


Figure II.5 : Structure des argiles (couche tétraédrique et octaédrique) [43].

Les phyllosilicates se présentent sous forme de petits cristaux micrométriques, en plaquettes hexagonales ou en (micro)fibres.

Ce sont les minéraux phylliteux halloysite, kaolinite, montmorillonite, illite et bravaisite, la glauconite, les smectites, les interstratifiés comme les vermiculites, les minéraux fibreux tels que les attapulgites ou les sépiolites, enfin les chlorites et les micas, ces dernières en très petits morceaux souvent altérés pour être assimilés à des argiles[48].

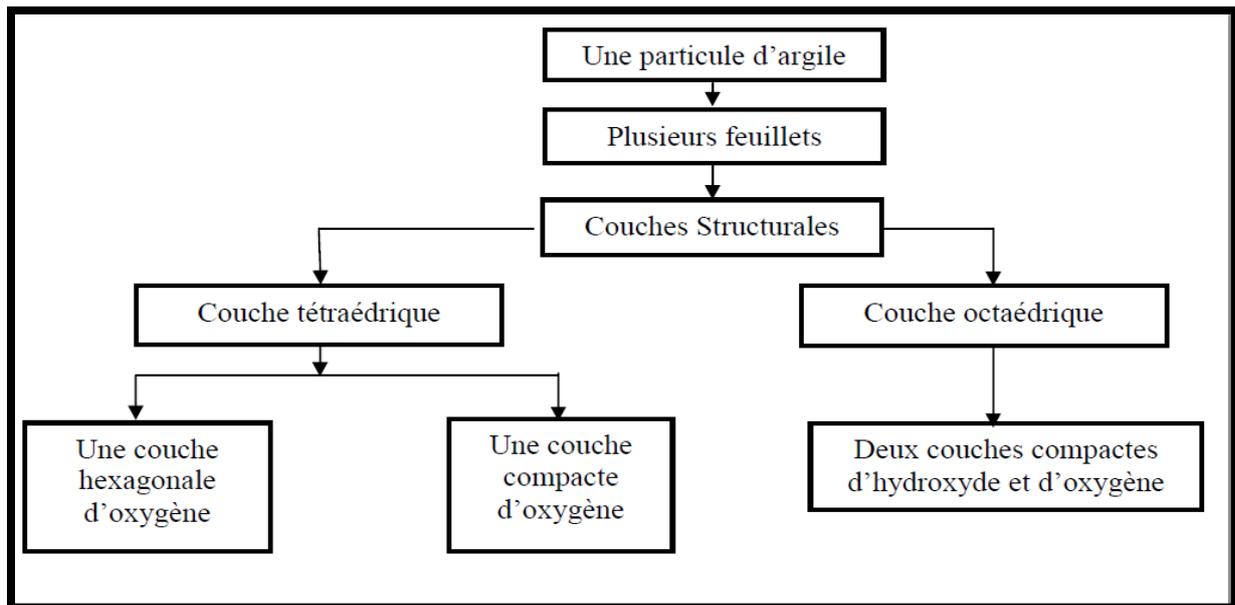


Figure II.6 : Schéma représentatif de la structure des minéraux argileux [48].

II.9. La classification des minéraux argileux

L'arrangement des deux types de feuillets et leurs différentes combinaisons (T.O ; T.O.T ; T.O.T.O), le remplacement partiel de la silice dans le feuillet tétraédrique et/ou de l'aluminium dans le feuillet octaédrique, la nature du cation (Na, Ca, K...) qui compense la charge des feuillets, conduisent à distinguer entre les différents groupes d'argiles : les Kaolinites (Serpentine), les micas (illites), les smectites et les chlorites. Chaque groupe minéralogique se caractérise par une structure en couches avec divers cations remplissant l'espace interfoliaire [49].

Les trois structures principales sont :

1. Les minéraux T.O ou 1/1 sans inter feuillet, l'équidistance basale est alors de $7,1\text{\AA}$ (la Kaolinite). Avec de l'eau comme inter feuillet, l'équidistance basale est de $10,1\text{\AA}$ (l'halloysite).
2. Les minéraux T.O.T ou 2/1 sans inter feuillet, l'équidistance basale varie de $9,2$ à $9,3\text{\AA}$ (la pyrophyllite). Avec inter feuillet constitué de cations, l'équidistance basale varie de 14 à 15\AA (les vermiculites et les smectites).

3. Les minéraux T.O.T.O ou 2/1/1 avec un inter feuillet constitué d'octaèdres de type brucite, l'équidistance basale est de 14.2\AA (les chlorites).

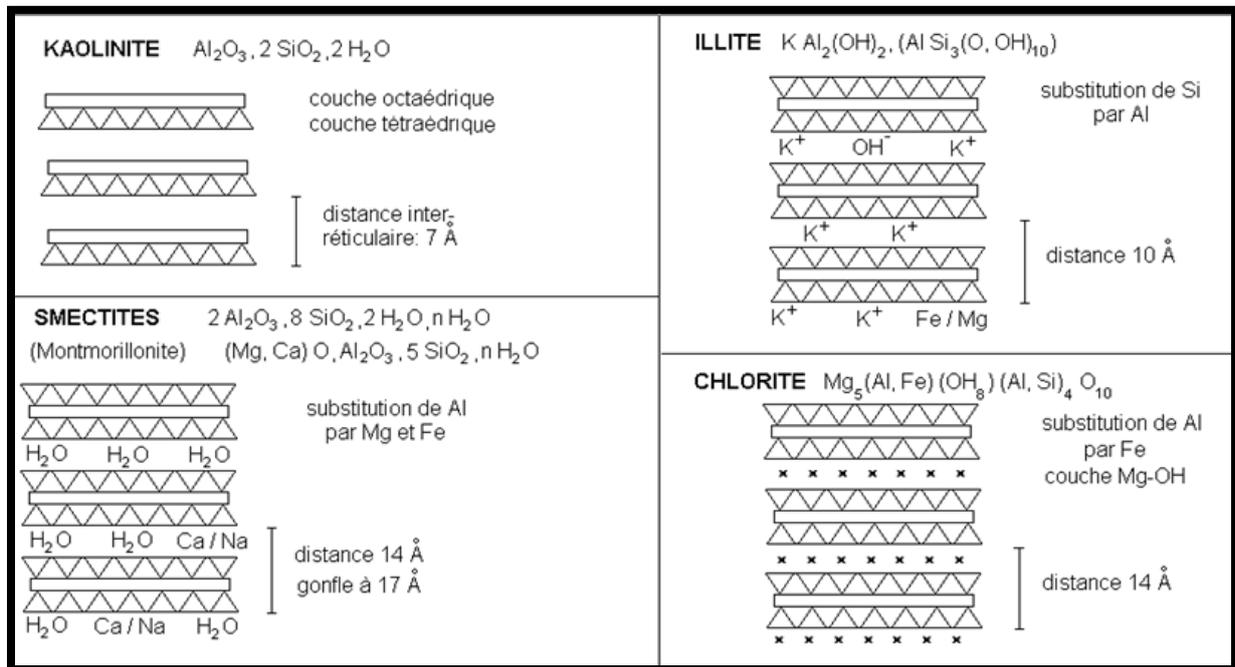


Figure II.7 : Structure des minéraux argileux [49].

II.10. Propriétés des argiles :

Ces roches tendres, rayables à l'ongle (fragiles à l'ongle), fragiles à sec et durcissantes à la chaleur ou à la cuisson, imperméables et faisant pâte à l'eau, sont abondantes dans les formations sédimentaires, tant continentales que marines.

Les minéraux argileux se caractérisent par quatre propriétés principales :

II.10.1. Forme et surface spécifique :

Les argiles se présentent sous trois formes (Figure II.8) :

- **En flocons** : caractérisés par une même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à 1/20^{ième} de la longueur.
- **En latte** : avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à 1/20^{ième} de la longueur.
- **En aiguilles** : deux dimensions identiques et la 3^{ième} beaucoup plus grande (assez rare) [46].

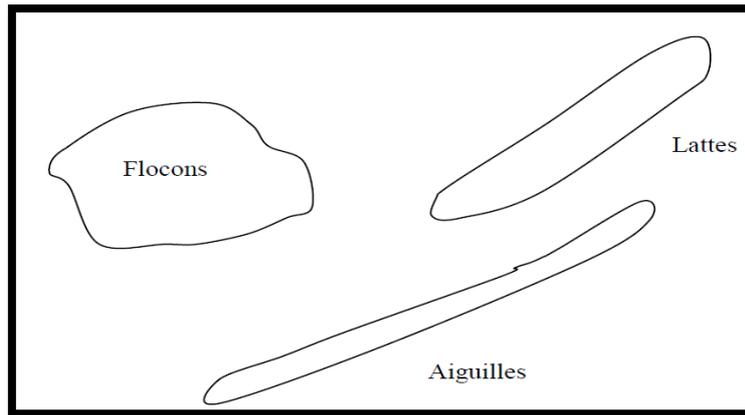


Figure II.8 : Les trois formes principales des minéraux argileux [50].

La petite taille des particules argileuses et leurs formes particulières confèrent aux argiles une surface spécifique importante. D'après de nombreux auteurs (Bolt, 1956, Giroud et Bottero, 1972), la dimension des particules est définie par le concept de surface spécifique [50].

La surface spécifique des argiles est très grande et elle varie suivant la nature des cations compensateurs. Cette dernière est exprimée par la relation ci-dessous :

$$S_s = S/P$$

Avec :

S_s : surface spécifique ;

S : surface totale de l'ensemble des grains constituant l'échantillon ;

P : son poids propre ;

Les particules d'argiles présentent des surfaces spécifiques très importantes et peuvent de ce fait attirer un grand nombre de molécules d'eau et d'ions, et exercer entre elles d'importantes forces d'interactions. Ces forces influent amplement sur le comportement mécanique des argiles. L'intensité de la charge électrique est liée à la surface spécifique de la particule.

Dans le cas des argiles, cette surface varie entre 10 à 20 m²/g et peut atteindre 800 m²/g dans le cas de la montmorillonite sodique. Warkentin et Bozozuk (1961), ont noté que le gonflement est d'autant plus fort que la surface spécifique de l'argile est grande.

Le tableau II.2 : indique les valeurs caractéristiques des surfaces des grandes familles argileuses. La surface totale comprend la surface externe, comprise entre les particules

argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace inter foliaire. Les smectites ont les surfaces totales maximales :

Surface Smectites > Surface Vermiculites >> Surface Illites > Surface Kaolinites = Surface Chlorites.

Tableau II.2 : surface spécifique des particules argileuses [51].

Familles d'argiles	Surface spécifique		
	Interne	Externe	Total
Smectite	750	50	800
Vermiculite	750	<1	750
Chlorite	0	15	15
Kaolinite	0	15	15
Illite	5	25	30

II.10.2. Plasticité :

Cette propriété traduit la malléabilité bien connue des matériaux argileux. Ce qui veut dire que l'argile est capable de se déformer à l'échelle macroscopique sous l'action d'une force externe [49].

II.10.3. Bonne capacité de compaction :

Cela signifie qu'on peut obtenir des matériaux de formes variées et de grande densité en comprimant la pâte d'argile dans un moule.

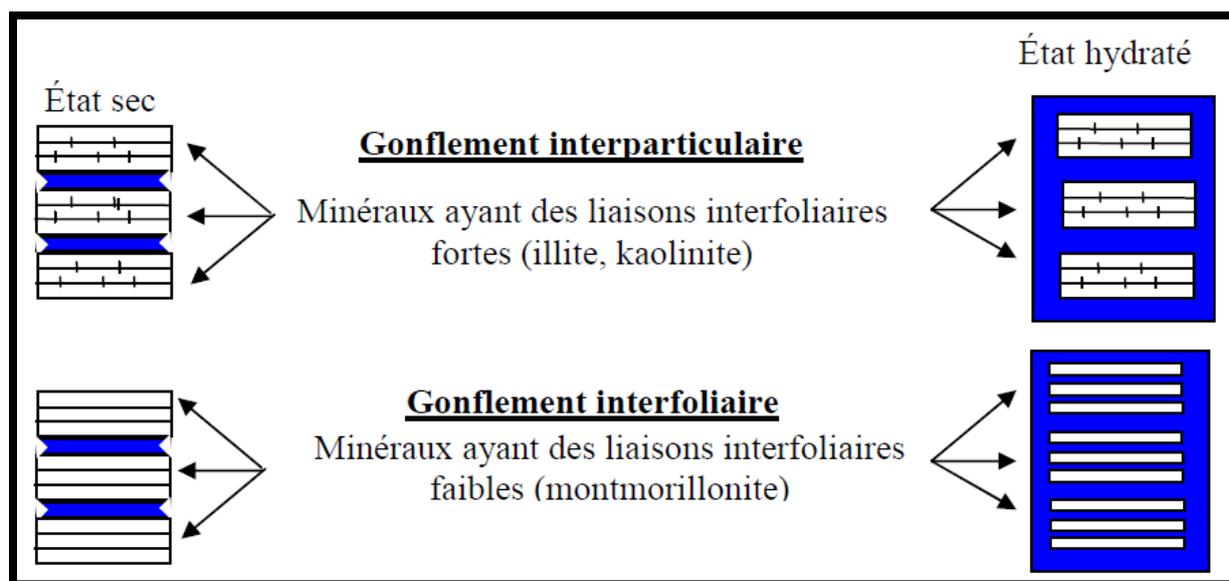
Il y'a aussi à souligner d'autres propriétés des minéraux argileux qui sont dues à leur forme et à leur surface spécifique, leur capacité d'échange cationique et leurs possibilités d'adsorption d'eau [51].

II.10.4. Degré d'hydratation :

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau.

Certains minéraux argileux comme les smectites, vermiculite et minéraux interstratifiés offrent des capacités d'expansion beaucoup plus importantes que celles des autres espèces argileuses. L'incorporation d'eau est réversible à la pression atmosphérique et dépend de la température et de la pression de vapeur. Plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer de l'eau [51].

L'eau exerce une influence remarquable sur les argiles, elle modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflantes [51].



Figures II.9 : Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation [52].

Ainsi que la variation de la teneur en eau se traduit par une augmentation de la limite de plasticité. Atterberg (pédologue suédois) définit en 1911 les différents états d'un sol en fonction de sa teneur en eau à laquelle marque le passage d'un état à un autre. Les deux limites utilisées sont : la limite de liquidité (w_l), la limite de plasticité (w_p), et l'indice de plasticité (I_p) [53].

L'eau est une molécule dipolaire, les feuillets d'argiles qui sont chargés négativement à leur base attirent la charge positive du dipôle de cette molécule. Ainsi une première couche d'eau si fortement liée se forme et que nous considérons généralement comme rigide.

Les extrémités négatives de ces dipôles peuvent à leur tour capter la partie positive d'autres dipôles d'eau et ainsi de suite.

La théorie de Gouy et Chapman postule que la particule argileuse et l'eau qui l'entoure peuvent être assimilées à une double couche ; l'une d'elle est représentée par l'ensemble de la particule argileuse avec la mince couche d'eau adsorbée (se comportant ainsi comme une couche unique) et l'autre est représentée par le reste d'eau faiblement liée.

II.10.5. Capacités d'échange cationique :

Les liaisons entre les particules des sols formant les minéraux argileux sont influencés par la magnitude de la charge négative résiduelle des minéraux (dus aux substitutions isomorphiques) dans le réseau cristallin, de la concentration et de la distribution des cations disponibles pour équilibrer cette charge.

La charge négative des particules argileuses est compensée par l'adsorption des cations, essentiellement le sodium et le calcium dans le cas des smectites.

Ces cations sont localisés sur les surfaces externes des particules ainsi qu'entre les feuillets et ils peuvent être échangés par d'autres cations présents dans le système. Par contre pour les illites, la charge est majoritairement compensée par le potassium dans l'espace interfeuillelet liant très étroitement les feuillets entre eux et empêchant ainsi le minéral de gonfler en présence d'eau.

Les cations peuvent être substitués par d'autres et la valence est toutefois le facteur déterminant dans la capacité d'échange cationique. Les cations de valence plus élevées peuvent remplacer facilement les cations de valence plus faible. Il s'établit un classement par ordre de capacité de substitution croissante tel que : $Li^+ < Na^+ < H^+ < NH_4^+ \ll Mg^{++} < Ca^+ \ll Al^{+++}$.

Ces diverses possibilités d'échanges cationiques sont à la base d'essais pour amélioration des caractéristiques mécaniques d'argile [54].

II.10.6. Activité des argiles :

Skempton (1953), a considéré que les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et à la quantité d'argile présente dans le sol. Cet auteur a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité (I_p) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ($C_2 < 2\mu M$).

$$A_1 = I_p / C_2$$

Skempton a proposé la nomenclature suivante :

- Argiles inactives : ces argiles ont une activité inférieure à 0.75 (< 0.75), elles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux ;
- Argile normale : ces argiles ont une activité comprise entre 1.25 et 2 ;
- Argile active : l'activité est comprise entre 1.25 et 2 ;
- Argile très active : l'activité est supérieure à 2 (> 2).

En ce qui concerne les argiles compactées, Seed a introduit une modification à la définition de Skempton sous la forme suivante [55] :

$$A_1 = I_p / C_2 - n$$

Avec n : constantes qui caractérise la nature du sol

- n =5 cas des sols naturels ;
- n = 10 : cas des sols reconstitués ;

L'activité d'un sol dépend essentiellement de sa composition minéralogique : le type et la quantité du minéral argileux, de sa teneur et des ions échangeables. [52]

Les deux définitions citées ci-dessus indiquent que l'activité est proportionnelle à l'indice de plasticité et inversement proportionnelle à la teneur en éléments inférieure à deux microns.

Tableau II.3 : Minéral prédominant dans la matrice argileuse basant sur l'activité, proposé par Skempton et Al (1953).

Minéral argileux	Activité
Montmorillonite Na ⁺	4-7
Montmorillonite Ca ⁺	1.5
Illite	0.5-1.3
Kaolinite	0.3-0.5
Calcite	0.2
Quartz	0

II.11. Définition de la brique :

La brique est un bloc de céramique utilisé pour la construction des murs et les revêtements décoratifs. On distingue les briques crues, séchées au soleil, des briques cuites dans des fours (briqueteries). Les briques sont généralement bon marché, résistent à l'humidité et à la chaleur, et peuvent durer plus longtemps que la pierre, et elles sont souvent dégraissées par le sable [56].

Leur couleur varie selon l'argile employée, elles peuvent être revêtues d'une pâte colorée (briques vernissées) à fonction décorative. Certaines briques d'argile réfractaire servent pour le revêtement des conduites de cheminées ou les fours. D'autres types comprennent les briques en verre et les briques texturées ou vitrifiées. C'est un matériau courant, facile à mettre en œuvre, la brique ordinaire s'emploie pour les murs intérieurs, en parement ; on préfère une brique plus imperméable et moins gélive pour les murs extérieurs.

La brique est l'un des matériaux de construction le plus utilisé et connus dans le monde. Elle est facile à fabriquer, résistante, durable, et elle s'est toujours adaptée à l'évolution de la construction et à ses impératifs [56].

Elle est aussi demandée pour les avantages qu'elle présente : d'une part par sa caractérisation de bon isolant et d'autres parts, ses déchets issus de fabrication peuvent être valorisés ou recyclés...etc.



Figure II.10 : Différentes formes de briques [57].

II.12.Procédé de fabrication de la brique.

L'argile est la matière première utilisée dans la fabrication de la brique. Le processus de fabrication de la brique reste toujours le même et il n'a fondamentalement pas changé malgré la diversité de ses formes et le type d'argile utilisée.

L'extraction et la préparation de l'argile, le moulage, le séchage et la cuisson de la brique demeurent les cinq étapes-clés du procédé de fabrication [56,58].

II.12.1.Extraction :

L'extraction se fait dans des carrières à ciel ouvert à l'aide des pelles mécaniques, d'excavateurs, des bulldozers, des pelles chargeuses ou encore des explosifs quand l'argile est trop dure.

Après l'élimination de la découverte, la terre est extraite et transportée à l'usine à l'aide des wagonnets téléphériques, des camions, des bandes transporteuses selon la distance. Elle sera mise dans un lieu de stockage pour pourrissage car l'argile contient des débris organiques nuisibles à la qualité du produit fini et nous ne pouvons l'éliminer que par l'action bactériologique. Un tas bien conçu permet une première uniformisation de la matière [56].

II.12.2.Préparation de la matière première :

La préparation comprend deux opérations principales :

a). Le broyage et le malaxage :

Cette phase préparatoire très importante s'effectue dans des broyeurs mécaniques à meules verticales qui tournent et qui pressent l'argile au travers d'un fond perforé formant un tamis ou encore dans un broyeur à cylindres horizontaux où l'argile est laminée. Cette opération est effectuée dans le but de rendre l'argile bien homogène et lui donner la plasticité nécessaire pour le moulage. Certains usines effectuent le stockage des terres, après avoir subies un début de préparation (fragmentation et préparation), sont stockés durant des mois au des années.

L'intérêt de telle opération est de constituer un stock de sécurité en cas d'impossibilité temporaire d'exploiter la carrière [56].

b). Le dosage et le mélange :

Cette opération s'effectue dans des machines à doser. Elles sont constituées de réservoirs ou silos contenant les différents éléments qui alimentent régulièrement à des proportions requises des mélanges assurant ainsi la mixture intime et homogène de la pâte.

Le but du mélange est d'obtenir une pâte suffisamment plastique et homogène pour permettre de façonner, de sécher et de cuire les produits dans des conditions optimales. Par ailleurs les argiles demandent d'autant plus d'eau pour le façonnage qu'elles sont plus plastiques : les argiles très plastiques renferment environ 20 à 30% d'eau et les argiles peu plastiques 15 à 20%. Ainsi la pâte est amenée à la plasticité voulue 20 à 30% à la limite du collage aux doigts.

La plasticité est la propriété que possède l'argile de pouvoir être sans rupture, déformées sous un certain effort et de garder la forme acquise quand cet effort est éliminé [58].

c). Façonnage des produits :

On utilise principalement deux produits pour la mise en forme des produits de terre cuite : l'étirage et le pressage.

Une fois la pâte est préparée, il faut lui donner des formes appropriées. La brique dite ordinaire est fabriquée par étirage. L'étirage correspond, en fait à un processus d'extrusion. Le pressage peut intervenir directement ou, dans la majorité des cas, en complément de l'héritage.

Certaines briques pleines sont directement formées par pressage d'une terre relativement maigre dans un moule métallique [56].

d). Séchage :

Avant de passer à la cuisson, il faut que les briques perdent l'eau de moulage, cela est réalisé par le séchage pour but d'éliminer le taux d'humidité à 90 % sans fissure les briques.

Il existe deux types de séchages :

✚ Séchage naturel :

Les produits sont exposés dans des hangars à l'air libre. C'est un processus très long à réaliser et il comporte de sérieux risques. Les hangars protègent bien de la pluie mais pas de basses températures. Il suffit d'un gel pour voir toute production perdue.

Le séchage naturel se fait sous 3 km de hangars ouverts. Les briques y restent un certain temps au minimum une semaine en été et au maximum 8 mois pour celles qui ont été moulées en hiver et enfermées au cœur d'un hangar et qui seront cuites au printemps suivant. Ce séchage très long à réaliser est très irrégulier. Actuellement il est abandonné [56].

✚ Séchage artificiel :

Il s'effectue dans des installations permettant d'assurer à la fois un chauffage progressif et une ventilation régulière. Le séchage s'opère dans des chambres ou des tunnels où circule un train de wagonnets transportant des briques crues à sécher, dans le sens inverse de l'air chaud d'une manière régulière et rapide.

La durée de l'opération de séchage est très variable. On distingue deux groupes de séchoirs :

- les séchoirs statiques ou séchoirs à chambres à grande ventilation (temps de séchage de 11 à 72h).
- les séchoirs à circulation continue des produits (temps de séchage de 1 à 48h), ces séchoirs peuvent être classés en 03 catégories :
 - 1. Les séchoirs tunnels traditionnels :** ils sèchent dans des temps variant de 12 à 48h. Ils ont une ventilation longitudinale ou transversale.
 - 2. Les séchoirs semirapides :** ils sèchent en 3 à 12h.
 - 3. Les séchoirs rapides :** ils sèchent en 1 à 13h.

Ces variations de temps pour chaque catégorie dépendent de l'argile employée ainsi que le type de produits fabriqués [56].

e). Cuisson :

C'est la dernière opération que les produits façonnés et séchés doivent subir pour avoir finalement les briques en terre cuite. C'est donc une phase extrêmement importante qui doit se dérouler progressivement dans le four.

Les briques sont alors chauffées progressivement jusqu'à la température de cuisson (950°C et 1050°C selon l'argile utilisée), ensuite elles se refroidissent graduellement.

Il existe diversité de fours qu'on peut classer en deux catégories :

- ✚ Les fours où le mode opératoire comprend le chargement du four, sa mise à feu et son extinction à la fin de la cuisson.
- ✚ Les fours continus où le chargement est introduit et extrait du four selon un cycle régulier et ininterrompu.

Le four le plus utilisé actuellement est le four tunnel. Dans celui-ci les produits sont chargés dans des wagonnets qui parcourent un tunnel rectiligne et passent successivement par une zone d'échauffement (une zone de cuisson) où se trouvent le foyer fixe et une zone de refroidissement. La durée de la cuisson varie de 18 à 48h selon le type de produit [56].

La figure ci-dessous représente un schéma récapitulatif du procédé de fabrication de la brique.

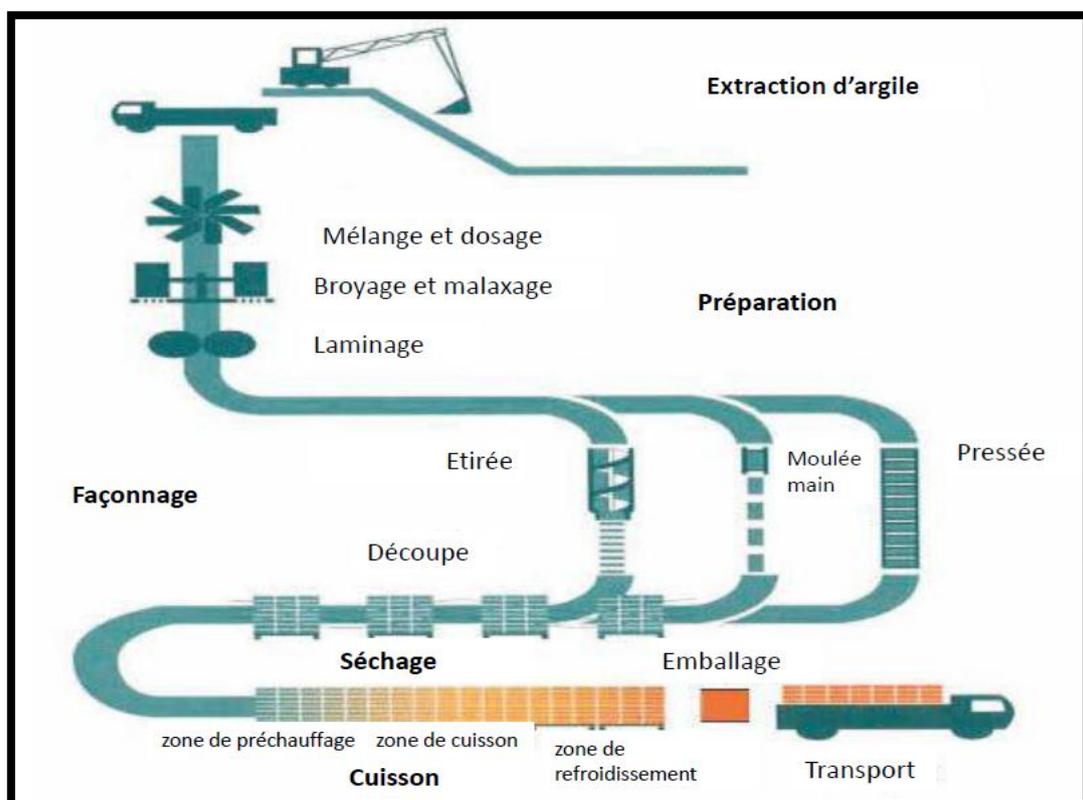


Figure II.11 : Schéma récapitulatif du processus de fabrication de la brique [57].

II.13. Formes des briques :

Il existe plusieurs types de briques en terre cuite : la brique alvéolaire, la brique pleine et la brique réfractaire pour des utilisations plus spécifiques (hautes températures). Notons que la brique alvéolaire se distingue pour ses performances accrues en matière d'isolation [59].

II.13.1. Les briques pleines :

Ces briques sont comme leur nom l'indique, entièrement fermées. Elles sont soit directement moulées à la presse soit à la filière [59].

II.13.1.1. Les briques de parement :

Une fois les briques pleines sont obtenues à la presse ou à la filière, on les laisse sécher légèrement puis on les fait passer encore une fois à la presse. On obtient ainsi des briques plus compactes avec des arêtes vives [59].

II.13.2. Les briques creuses :

La pâte est comprimée avant de la passer dans la filière. Les étireuses ou les mouleuses utilisent des palettes, des pistons, des cylindres ou des hélices pour la compression d'argile. Ce sont des briques comportant des alvéoles représentant globalement plus de 40 % de la section totale. Les plus courantes ont des alvéoles parallèles à la grande face [59].

II.13.3. Les briques perforées :

L'étireuse permet une production rapide, elle est parfaitement adaptée au façonnage des briques perforées. On incorpore à la filière des noyaux qui réalisent diverses perforations dans le pain de la pâte d'argile pour obtenir ainsi un produit plus léger perforé à des dimensions variables. Ce sont des briques comportant des alvéoles perpendiculaires aux grandes faces dont le total des sections représente moins de 40 % de l'aire de la grande face [59].



Figure II.12 : Différents modèles des briques [56].

I.14. Conclusion :

- ✚ Le plus important a retiré dans ce chapitre, c'est que l'argile restera toujours une bonne et importante matière première dans les matériaux de construction, spécifiquement dans le domaine des briques.
- ✚ Dans ce contexte une recherche générale sur les argiles est menée pour mieux définir et connaître cette matière.
- ✚ La bonne qualité de la brique et son amélioration dépendent de cette matière, à vrai dire l'homogénéisation et la plasticité de la pâte argileuse, non seulement de la quantité et de la qualité d'argile utilisée mais aussi il faut prendre compte de la quantité d'eau a ajouté.
- ✚ En dernier lieu l'élaboration du produit finis, passe par des étapes diverses, bien définies, chacune ayant un rôle précis et important, qu'on ne doit pas négliger.

Chapitre III

Caractérisation des matières premières

III.1. Introduction :

Ce chapitre a pour objectif de caractériser les matières premières utilisées dans la confection des briques : l'argile, les sédiments de dragage.

Donc cette caractérisation possède une analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX), une analyse chimique par fluorescence X (FX), analyse thermique différentielle et analyse thermique gravimétrique (ATD/ATG) et l'analyse par microscope électronique à balayage (MEB), en dernier lieu d'autres opérations de caractérisation.

III.2. Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X :

Pour cette caractérisation, les échantillons se présentent le plus généralement sous forme de poudres ou de pastilles. La diffraction des rayons permet d'analyser la pureté de l'échantillon, le cas échéant d'identifier les impuretés présentes et de délimiter le domaine d'existence des différentes solutions solides étudiées. Cette analyse est réalisée à l'aide d'un diffractomètre de rayons X générés par une anticathode généralement en cuivre (**voir figure III.1**).

Le rayonnement $K\alpha$ de l'anticathode dans le domaine angulaire choisi [60].

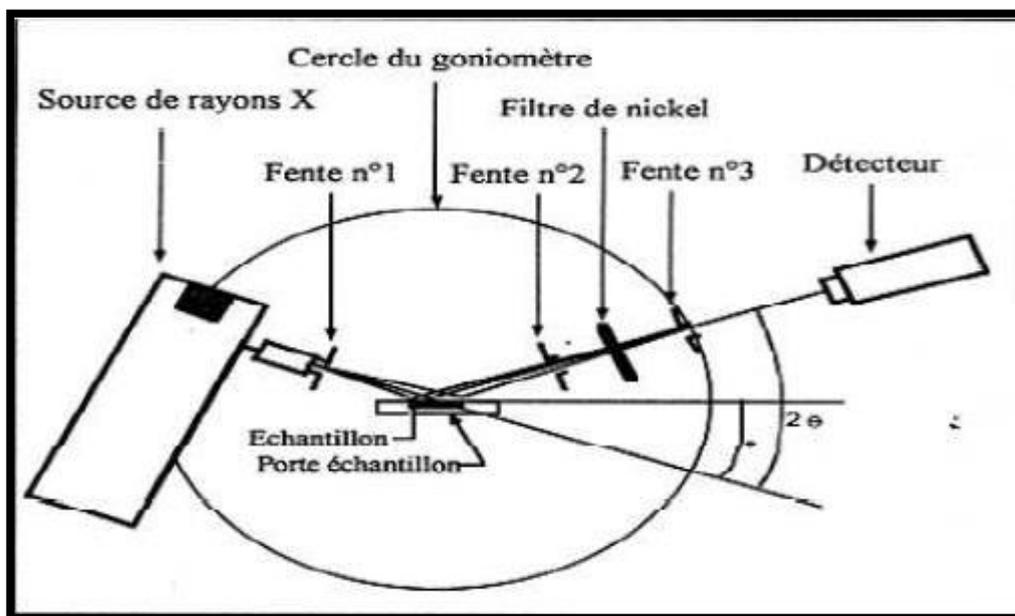


Figure III.1. : Schéma du principe du diffractomètre des rayons X [60].

III.2.1. Principe :

La méthode générale consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X et à regarder l'intensité du rayon X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace. Les rayons X diffusés interfèrent entre eux, l'intensité présente donc des maxima dans certaines directions. L'échantillon est une poudre homogène et isotrope.

La source de rayons X est un tube sous vide muni d'un dispositif permettant de ne sélectionner qu'une seule longueur d'onde. Les cristaux constituent des réseaux naturels dont les intervalles caractéristiques (entre plans réticulaires) sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des RX. En conséquence, les RX sont diffractés par les cristaux comme la lumière l'est par les réseaux, ce qui induit des phénomènes d'interférence identiques. Les conditions de diffraction d'un rayonnement X par une famille de plans réticulaires sont définies par la loi de Bragg (1).

$$n \cdot \lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

Avec :

n : le nombre entier désignant l'ordre de la réflexion,

λ : désigne la longueur d'onde du rayon x.

d_{hkl} : sont les distances entre les plans réticulaires d'une même famille désignée conventionnellement par les indices de Miller.

θ : L'angle de diffraction.

III.3. Analyse chimique par la spectrométrie de fluorescence X (FX) :

La spectrométrie de fluorescence X (FX ou XRF pour X-ray fluorescence) est une technique d'analyse élémentaire utilisant une propriété physique de la matière et qui exploite la fluorescence des atomes dans le domaine des rayons X.

D'une part elle permet de quantifier les éléments chimiques présents dans un échantillon et d'autre part elle vient en complément de la diffraction des rayons X en permettant de mieux identifier les phases majoritaires. Lorsqu'un échantillon est irradié avec

une source de photons à grande énergie (5 à 60 keV), une photoluminescence située dans le domaine des rayons X, caractéristique des éléments présents, est émise par ce dernier.

Les éléments concernés sont : SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O ...etc [61].

III.3.1. Principe :

L'échantillon est excité avec un rayonnement standard et ensuite le rayonnement émis est analysé par un détecteur qui identifie les raies composant le spectre. Ceci permet d'identifier les éléments car chaque atome a des niveaux d'énergie qui lui sont propres.

III.3.2. Mode opératoire :

- On pèse 12 g de ciment cru.
- On ajoute 5 comprimés de cellulose (équivalent de 1g).



Figure III.2 : Échantillons préparés pour réaliser la pastille.

- Puis on fait passer le mélange dans un broyeur afin de broyer la cellulose.



Figure III.3 : Appareil à broyeur à boulet.

- A l'aide de mélange broyé on réalise la pastille.



Figure III.4 : Matériels utilisée pour la réalisation de la pastille.

- On met la pastille dans une machine à compression.



Figure III.5 : Appareil à compression.

- Une fois que la pastille est réalisée, on lui fait une analyse chimique par appareil à fluorescence X.



Figure III.6 : La forme de la pastille préparée.

- On met la pastille dans l'appareil à fluorescence X.



Figure III.7 : Appareil à fluorescence X à gauche et à droite les moules dont on met les échantillons (la pastille) pour l'analyse.

- À l'aide d'un logiciel on définit la position dont on a met la pastille et ce nom, c'est-à-dire en la classé parmi la marne (argile) ou bien gypse ou ciment cru ...etc. Puis on clique sur mesurer ;

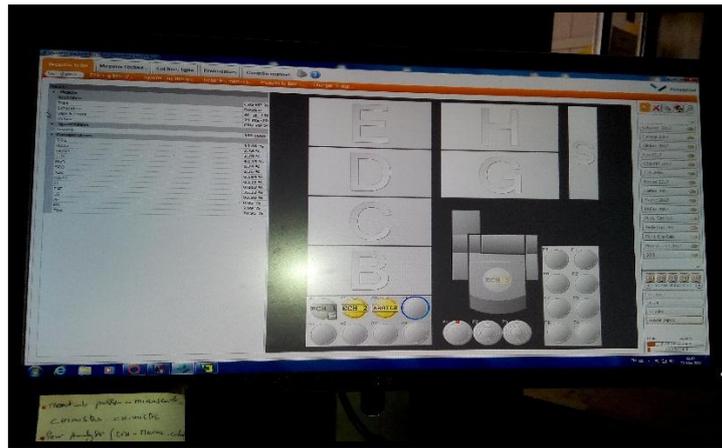


Figure III.8 : Logiciel d'analyse par fluorescence X.

III.4. Analyse thermique :

Une substance soumise à un traitement thermique peut subir des modifications de ses propriétés physico-chimiques.

L'analyse thermique permet d'observer ces modifications en fonction de la température. Parmi les techniques mises en œuvre, on peut citer l'analyse thermique différentielle (ATD) et l'analyse thermogravimétrique(ATG).

III.4.1. Analyse thermique différentielle :

La méthode d'analyse thermique différentielle permet, d'étudier les transformations internes des échantillons ou les réactions de l'échantillon avec l'extérieur, le transfert de masse étant associé à une libération ou une adsorption d'énergie. la méthode ATD est une technique dans laquelle la différence de température entre une substance et un matériau de référence est mesurée comme une fonction de la température.

La substance et le matériau de référence sont soumis à un même programme de température contrôlée. Comme résultats, on reçoit une information énergétique sur l'échantillon qui nous renseigne sur les réactions de l'échantillon avec le milieu environnant mais aussi sur ses transformations structurales internes.



Figure III.9 : Appareil d'analyse ATD/ATG.

III.4.1.1. Principe :

Le principe de la méthode ATD consiste à chauffer dans une enceinte de température programmée un échantillon actif et un échantillon témoin, en générale inerte, disposés symétriquement. Un dispositif à thermocouples mesure la différence de température entre les deux échantillons. En l'absence de réaction ou de transformation, l'écart de température est faible et régulier.

C'est la ligne de base. Lorsqu'une transformation de l'échantillon actif intervient, elle met en jeu une quantité d'énergie et sa température s'écarte alors de celle du témoin. La température différentielle DT est enregistrée sous forme d'un pic ou d'une succession de pic en fonction du temps [62].

III.4.2. Analyse thermogravimétrique :

Le principe consiste à suivre en continu la variation de la masse d'un échantillon en fonction de la température de traitement thermique. Cette variation de masse peut être une perte de masse (telle que l'émission de vapeurs) ou un gain de masse lors de la fixation de gaz par exemple [62].

III.5. Analyse par la microscopie Electronique à balayage (MEB) :

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM (Scanning Electron Microscopy)) est une technique d'observation microscopie électronique basée sur le principe des interactions électron-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.



Figure III.10 : Microscope électronique à balayage [63].

III.5.1. Principe :

Le principe du MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface. Aujourd'hui, la microscopie électronique à balayage est utilisée dans des domaines allant de la biologie aux sciences des matériaux et un grand nombre de constructeurs proposent des appareils de séries équipés de détecteurs d'électrons secondaires et dont la résolution se situe entre 0,4 nanomètre² et 20 nanomètre².

Les photos MEB ont été prises par un type d'appareil appelé ESEM XL 30 à filament de tungstène. Couplé à un système complet de microanalyse par dispersion d'énergie EDS X. [61]

III.6. Essai au bleu de méthylène :

Cet essai permet de faire la distinction entre les différents types d'argiles contenues dans un sable ; le bleu de méthylène étant absorbé préférentiellement par les argiles du types Montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques, les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu [64].

L'essai a pour but de révéler la présence de fines particules de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.

On peut déterminer la valeur de bleu de méthylène selon l'absorbance et la turbidité :

Donc si le rapport des valeurs de bleu à la tâche est :

-  ≤ 2 : Absence de kaolinite.
-  < 2 : Apparition de l'argile gonflante.
-  > 7 : Présence que de montmorillonite.

III.6.1. Principe :

Le principe de cette méthode consiste à contrôler l'adsorption du bleu de méthylène injecté dans un bain aqueux contenant la prise d'essai, en observant le comportement d'une goutte de suspension déposée sur une feuille de papier filtre.

La tâche formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. L'excès de bleu de méthylène se traduit par la formation d'une auréole bleu clair persistante autour du dépôt central.

III.6.2. Appareillage :

- Une burette.
- Une tige de verre.
- Un bécher de 1L ou 2L.
- **Un agitateur à ailettes** : il est capable d'une vitesse de rotation contrôlée pouvant atteindre 600 tr/min avec une balance.
- Un chronomètre.
- Papier filtre.

III.6.3. Mode opératoire :

- On prélève une masse $M=30\text{g}$ d'un échantillon d'argile.
- Mettre en suspension dans 500 ml d'eau minéralisé.
- On le met dans un bicher (environ 5min), pour agitation à une vitesse de 600 tr/min jusqu'à la disparition visuelle de tout agglomérat de particules dans la suspension et de toute accumulation sur les parois.
- On remplit la burette avec le bleu de méthylène.
- On allume le Heating magnetic stirrer (avec un aimant); heating (250°C), stirrer (8).
- Pendant toute la durée du dosage maintenir l'agitation à une vitesse de 400 tr/min.
- Introduire dans la suspension 5ml de solution de bleu de méthylène, et on va attendre 2 minute.
- A l'aide d'une baguette en verre on extrait une goutte de mélange, on la pose dans le papier-filtre, et elle doit former un dépôt central compris entre 8 et 12mm de diamètre.
- On procède à des injections successives, on ajoute 5ml pendant chaque 5 min ; le test s'achève quand l'auréole périphérique bleu clair persiste autours de la zone humide de la tâche.
- Après deux minutes (2min), on prend une goutte pour confirmer la saturation..



Figure III.11 : Matériels de bleu de méthylène.

III.7. Caractérisation physico-mécanique des matières premières :

III.7.1. Détermination des limites d'Atterberg :

Le mélange d'argile avec l'eau présente trois états différents : états liquide, plastique et solide. Il en résulte le phénomène de consistance, qui peut être modifié en fonction de la teneur en eau du mélange [65].

III.7.1.1. La limite de plasticité (W_P) :

Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau (exprimée en %) du fuseau qui se brise en petits tronçons de 10 à 15cm de long au moment où son diamètre atteint 3cm.

La limite de plasticité est atteinte si la rupture se fait pendant le soulèvement du cylindre :

- ✚ S'il se brise avant d'atteindre les 3mm, la teneur en eau est trop faible.
- ✚ S'il ne se brise pas en le soulevant en son milieu de 15 à 20mm, on diminue la teneur en eau.

III.7.1.2. La limite de liquidité (W_L) :

C'est la limite qui sépare l'état plastique de l'état liquide ; elle sera déterminée selon deux procédures différentes : limite de liquidité à la Coupelle de Casagrande « NF P 94-051 » ou limite de liquidité au cône « NF P 94-051-1 ».

Les limites de liquidité et de plasticité (W_L et W_P), fixent conventionnellement le passage d'un état à un autre. Elles sont déterminées avec des essais effectués sur une fraction d'argile passant à travers le tamis de 400 μ m.

On exprime l'étendue du domaine de plasticité, l'étendue des teneurs en eau pour lesquelles le sol garde une consistance plastique par un paramètre qui est l'indice de plasticité (I_P), cet indice marque l'étendue du domaine plastique, c'est-à-dire la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

L'indice de plasticité est défini par la relation suivante :

$$I_P = W_L - W_P$$

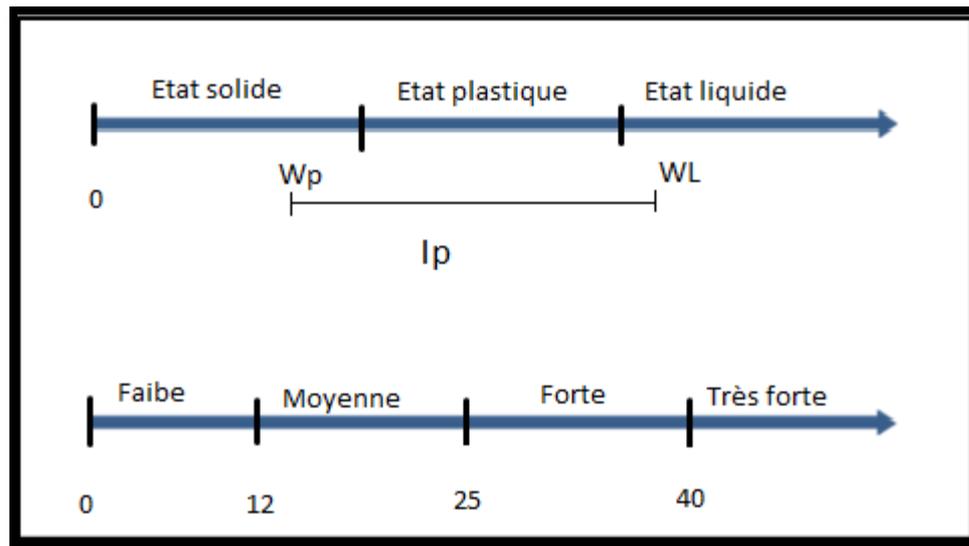


Figure III.12 : Classification d'argile selon l'indice de plasticité.

Tableau III.1 : Estimation de la plasticité d'un sol.

I_p	Degré de plasticité
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
>40	Très plastique

III.7.1.3. Détermination de la limite de plasticité :

Il s'agit de faire une boulette (environ 12mm de diamètre), et faire un cylindre en le roulant sur la plaque de marbre propre, lisse et sèche. Le cylindre doit avoir 10cm à 15cm de longueur, ne doit pas être creux et doit être de 0.5mm d'épaisseur.

✚ Matériels utilisés :

- Tamis d'ouverture.
- Balance.
- Etuve.
- Plaque en verre.

III.7.1.4. Détermination de la limite de liquidité W_L :

✚ Mode opératoire :

- On pèse 200g d'argile et le mouiller avec de l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte molle.

- L'échantillon ainsi préparé est mis en place à l'aide d'une spatule, sur l'appareil de Casagrande d'une façon homogène, l'épaisseur au centre est de 15 à 20mm, le porteur étant sensiblement horizontal.
- À l'aide de l'outil de rainure, on creuse une rainure dans la pâte contenu dans la coupelle, puis on tourne la manivelle afin de provoquer le choc de celle-ci au contact avec le bois dur.
- On compte le nombre de chocs nécessaires pour que celle-ci referme sur 1cm environ.
- L'opération est effectuée 3 à 4 fois avec des teneurs en eau différentes, pour que le nombre de choc à chaque essai soit compris entre 15 et 35 :
 - ✚ Si le nombre de choc « n » est inférieur à 15, laissé sécher.
 - ✚ Si le nombre de choc « n » est supérieur à 35, humidifié légèrement, homogénéisé et reprendre l'essai ;



Figure III.13 : Appareil de Casagrande [66].

On détermine pour chaque essai, la teneur en eau W par la méthode ci-dessous :

- On prélève un peu de matière humide à chaque opération et la pèse.
- La matière est mise dans l'étuve à 105°C durant 24 heures, jusqu'à l'obtention d'un poids stable.
- Après 24 heures, on pèse la matière sèche à la sortie de l'étuve.
- On calcule la teneur en eau par la méthode suivante :

$$W = [P - P_d / P_d - T]$$

Avec :

W : la teneur en eau.

T : poids de la tare.

P : poids de l'échantillon humide.

P_a : poids de l'échantillon sec.

La détermination de la limite de liquidité se fait à partir de la représentation graphique de la teneur en eau *W* mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant.

III.8. Détermination de la masse volumique absolue :

La masse volumique c'est la masse de l'unité de volume absolue du corps c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume du vide « NF P 18-555 »

III.8.1. Principe :

Il s'agit de mesurer le déplacement de niveau d'un liquide contenu dans un récipient, lorsqu'on y introduit une masse donnée d'un matériau, ainsi de déterminer le poids spécifique, qui est le poids du matériau par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains.

III.8.2. Equipements utilisés :

- Une éprouvette graduée.
- Une balance.
- Eau.



Figure III.14 : Equipements utilisés pour la masse volumique.

III.8.3. Mode opératoire :

- On remplit l'éprouvette d'un volume d'eau de $V_1 = 400$ ml.
- On pèse 100g de matière première (argile).
- On introduit une quantité de la masse dans l'éprouvette, jusqu'à le niveau du liquide soit de la partie utile de la graduation, et on lit la lecture du volume V_2 .



Figure III.15 : L'éprouvette graduée remplie d'argile.

III.9. Mesure du PH :

Le potentiel hydrogène, plus connu sous le nom de PH mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution en fonction de sa concentration en ions hydrogènes et suivant une échelle logarithmique de 1 à 14.

III.10. Détermination des matières organiques :

Cette mesure permet, de connaître le taux de carbonate et en carbone. Pour cela, la norme NF X 31-409 est utilisée, elle consiste à l'acidification de l'échantillon afin de libérer la totalité des carbonates pour en fin de compte n'avoir que du carbone organique. L'analyse élémentaire permet de donner le taux de carbone organique mais ne permet pas de donner le pourcentage exact de matière organique dans les sédiments. Pour calculer le taux de carbone organique, la procédure suivante a été suivie.

III.11. Conclusion :

- ✚ Les méthodes d'analyses et de caractérisation des matières premières réalisées nécessitent un traitement préalable et des manipulations délicates pour obtenir des résultats satisfaisant
- ✚ Ces méthodes permettent de bien définir les différentes propriétés propres des matières, et cela avant de procéder à l'élaboration des briques.

Chapitre IV

Résultats et discussion

V.1. Introduction :

Ce chapitre englobe tous nos résultats sur la caractérisation des matières premières selon les différentes méthodes d'analyse, leurs représentations graphiques et leurs interprétations.

IV.2. Résultats d'analyse par diffraction des rayons X (DRX) :**IV.2.1. Analyse par DRX d'échantillon d'argile de Remila :**

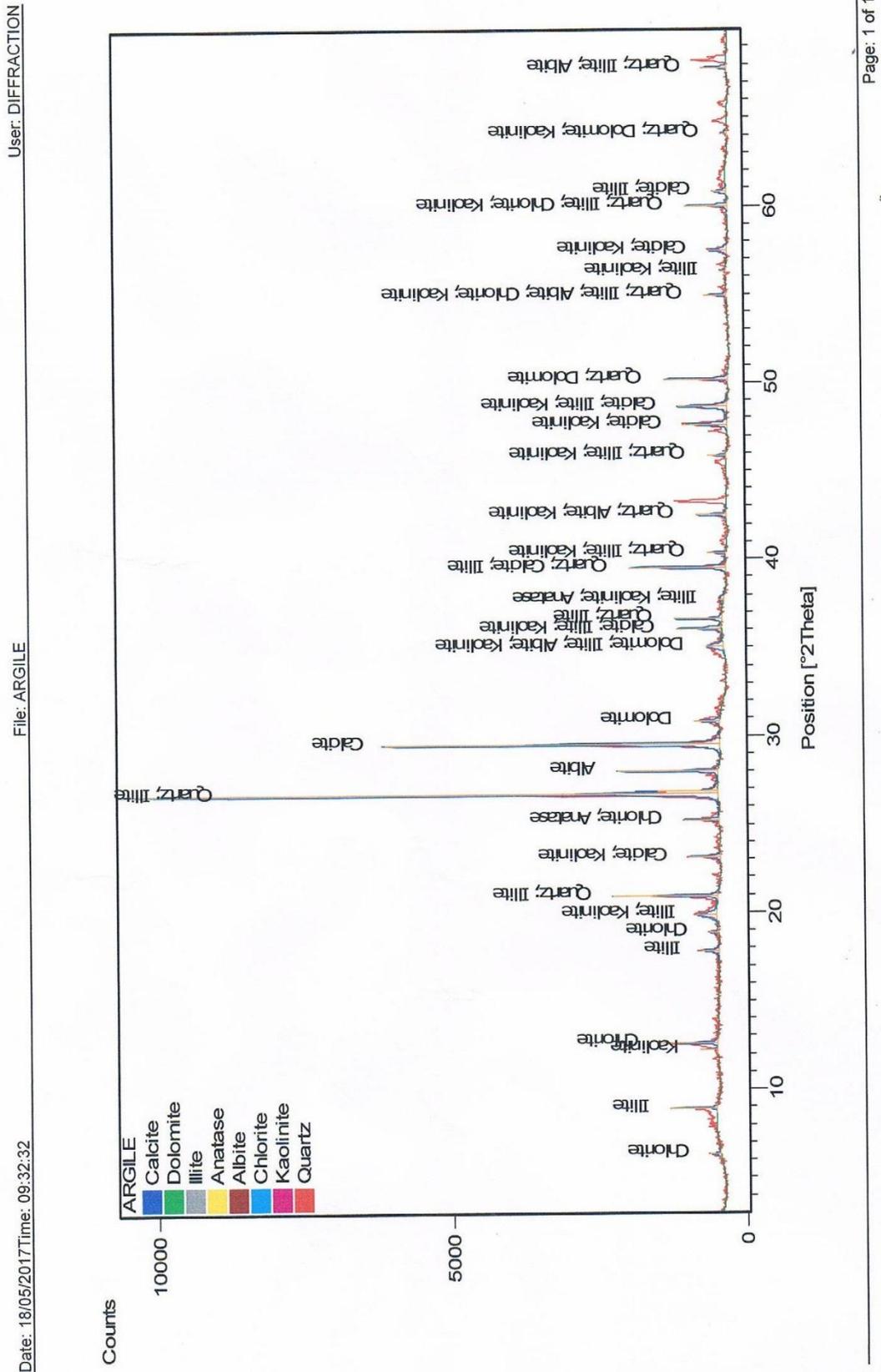


Figure IV.1 : Spectre DRX d'échantillon de l'argile de Remila.

La composition minéralogique par diffraction des rayons X est déterminée sur les échantillons à différentes températures.

Les diffractogrammes des rayons X représentés sur la figure (IV.1) correspondent à la composition minéralogique d'argile d'Oued Remila. Ce diffractogramme met en évidence l'existence des phases minéralogiques principales, qui sont le quartz et illite observées à des pics de diffractions : $7,60^\circ$; $23,75^\circ$; $21,20^\circ$; $39,37^\circ$; $50,20^\circ$; 60° , $2^\circ\theta$.

La seconde phase importante est la calcite qui a des pics de diffractions : $29,37^\circ$; $39,73^\circ$ et l'albite 28° , $2^\circ\theta$. D'autres phases minérales apparaît sur le diffractogramme correspond à la kaolinite, chlorite, et la dolomite : $12,5^\circ$; $50,20^\circ$, $2^\circ\theta$; l'anatase se laisse apparaître dans ce diffractogramme.

IV.2.2. Analyse par DRX des sédiments de dragage :

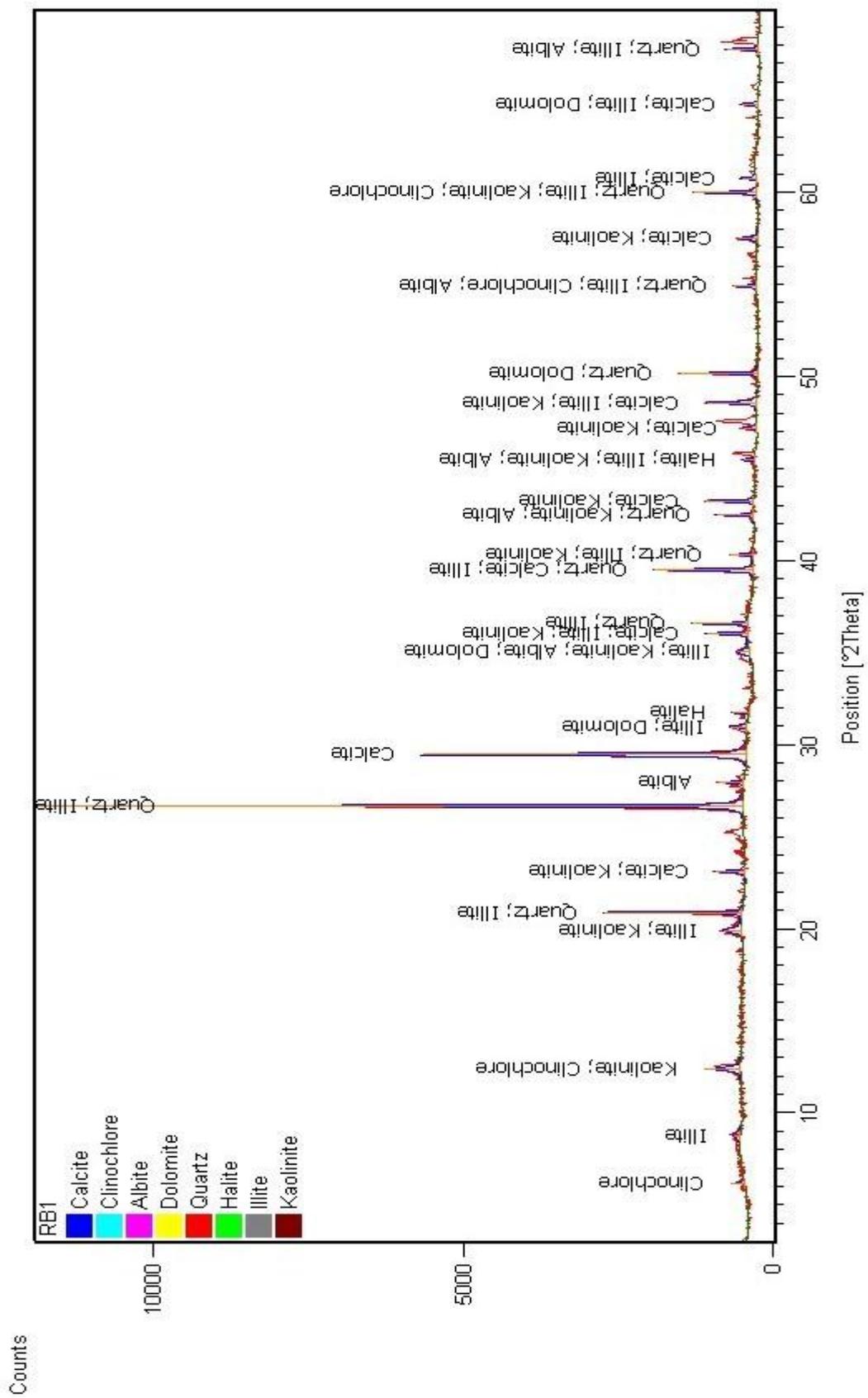


Figure IV.2 : Spectre DRX des sédiments de dragage.

La composition minéralogique par diffraction des rayons X est déterminée sur les échantillons à différentes températures.

Les diffractogrammes des rayons X représentés sur la figure (IV.2) correspondent à la composition minéralogique des sédiments de dragage du port de Bejaia.

Ce diffractogramme met en évidence l'existence des phases minéralogiques principales, qui sont le quartz et illite observées à des pics de diffractions : 21° ; $26,5^\circ$; $39,37^\circ$; $50,20^\circ, 2^\circ\theta$.

La seconde phase importante est la calcite qui a des pics de diffractions : $29,37^\circ$; $39,73^\circ$ et la dolomite $50,20^\circ$, suivit de la kaolinite et le clinochlore : $60^\circ, 2^\circ\theta$

. D'autres phases minérales apparait sur le diffractogramme correspond à l'halite se laissent apparaitre dans ce diffractogramme.

IV.3. Résultats d'analyses par spectrométrie de fluorescence X :

IV.3.1. Composition chimique d'argile :

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'argile de Remila.

Oxydes	% en masse
SiO₂	40,12
Al₂O₃	12,50
Fe₂O₃	4,71
CaO	15,96
MgO	2,31
SO₃	0,34
K₂O	2,014
Na₂O	0,932
Cl	0,020
PAF	21,08
LSF	12,26
AF	2,66
MS	2,33
Titre	33,30

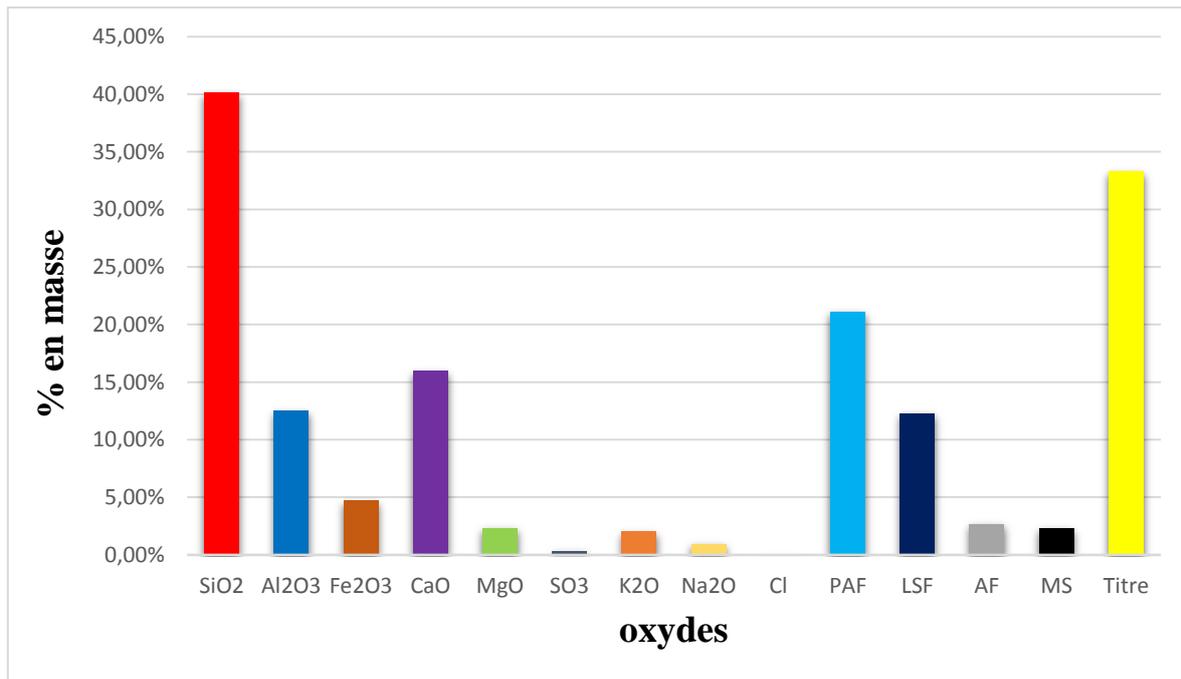


Figure IV.3 : Histogramme représentatif de la variation des oxydes en fonction du % masse d'échantillon d'argile.

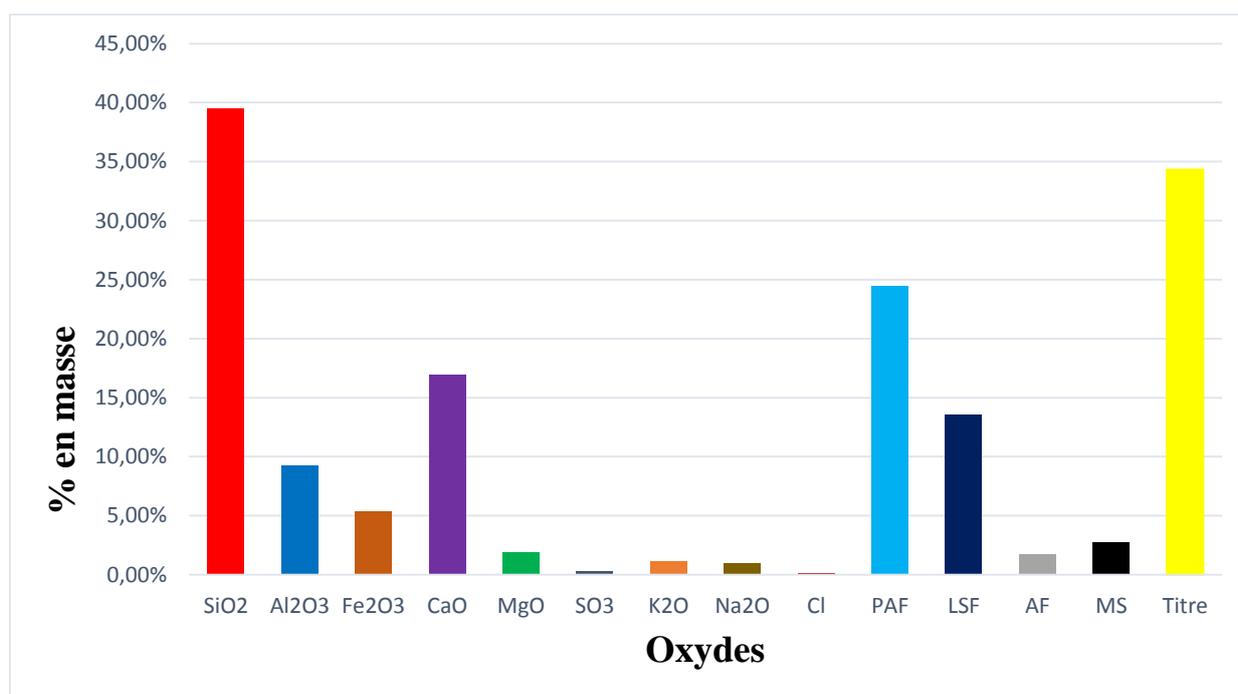
Ce graphe nous permet de constater que l'argile se compose majoritairement de silice (SiO_2) qui est de 40 %, suivit du titre : de 33,30 %. On remarque aussi un pourcentage moyen pour la chaux CaO de 15,96 et l'oxyde d'alumine 12,5%, et Fe_2O_3 de 4,71%, et les autres considérés comme oxydes mineurs.

L'analyse chimique par fluorescence X nous a permis aussi de déterminer la perte au feu (PAF) d'un pourcentage moyen 21,08 %, assez importante puis est sûrement dû à la présence de calcite ou dépend des carbonates et des sulfures.

IV.3.2. Composition chimique des sédiments de dragages :

Tableau IV.2 : Composition chimique des sédiments de dragages.

Oxydes	% en masse
SiO ₂	39,47
Al ₂ O ₃	9,27
Fe ₂ O ₃	5,33
CaO	16,97
MgO	1,93
SO ₃	0,31
K ₂ O	1,165
Na ₂ O	0,99
Cl	0,09
PAF	24,46
LSF	13,59
AF	1,74
MS	2,70
Titre	34,32

**Figure IV.4** : Histogramme représentatif de la variation des oxydes en fonction du % masse des sédiments de dragage.

Ce graphe nous permet de constater que l'argile se compose majoritairement de silice (SiO₂) qui est de 39,97 %, suivit du titre : de 34,32 %. On remarque aussi un pourcentage moyen pour la chaux CaO de 16,97 et l'oxyde d'alumine 9,7%, et Fe₂O₃ de 5,71%, et les autres considérés comme oxydes mineurs.

L'analyse chimique par fluorescence X nous a permis aussi de déterminer la perte au feu (PAF) d'un pourcentage moyen 24,06 % assez importante puis est sûrement dû à la présence de la calcite ou dépend des carbonates et des sulfures.

Remarque :

L'analyse chimique par fluorescence X nous donne quatre modules d'analyse dont le Titre, AF et MS, qui sont déterminés par les formules suivantes :

$$\text{LSF} = \text{CAO} / [(\text{SiO}_2 * \text{Fe}_2\text{O}_3) + (\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Fe}_2\text{O}_3) + (\text{FeO}_3 * \text{FeO}_3)]$$

$$\text{AF} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3.$$

$$\text{MS} = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3).$$

$$\text{Titre} = \% \text{CAO} / (2.8 * \% \text{SiO}_2 + 1.18 * \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 * \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

IV.4. Résultats d'analyse thermique:

IV.4.1. Analyse thermique de l'argile :

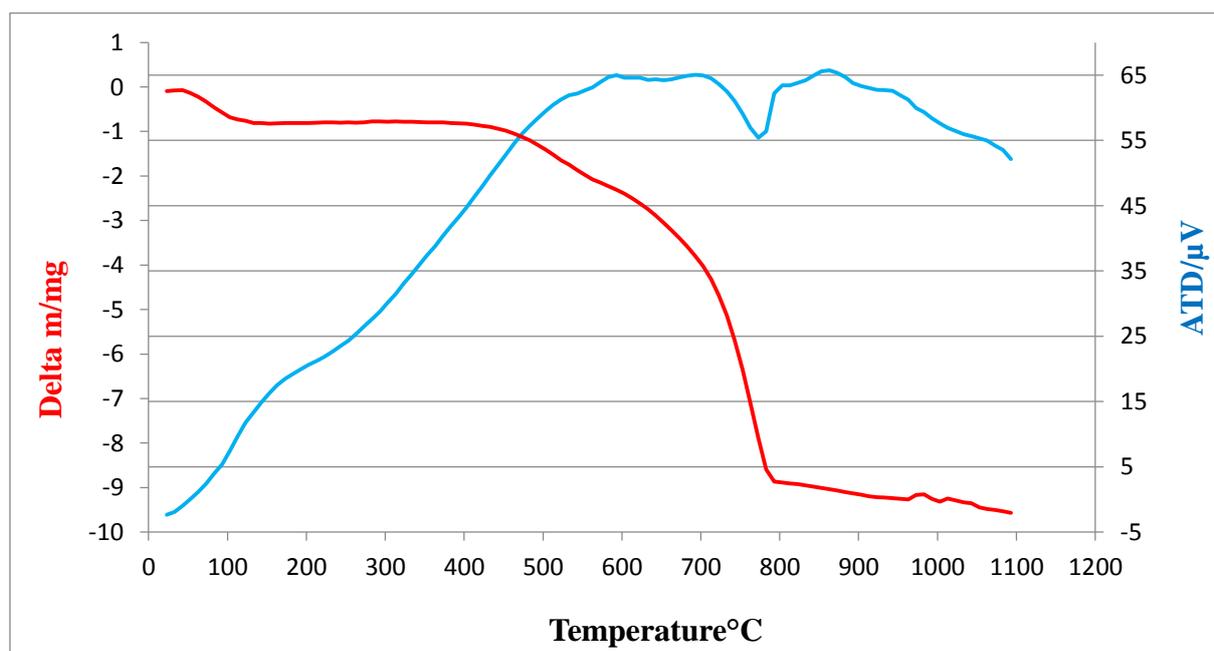


Figure IV.5: Graphe représentatif d'ATD/ATG de l'argile.

Dans ce graphique, l'ATD révèle la présence de deux pics endothermiques et un pic exothermique.

Le pic endothermique se manifeste entre 33°C et 100°C, qui se rapporte au départ de l'eau d'hydratation, le premier pic exothermique se manifeste entre 103°C et 183°C, se

rapporte à la combustion des matières organique, le deuxième pic endothermique se manifeste entre 713°C et 813°C, décarbonatation (la décomposition thermique de la calcite).

L'ATG dévoile une perte de masse importante de la matière argileuse en fonction de l'augmentation de la température.

La matière perd 0,8% à 35°C, relative aux pertes des eaux d'hydratation.

A 413°C la matière perd 1,5%, relative à la combustion des matières organiques, une perte de 7,5% à 803°C, relative à la décarbonatation (décomposition thermique de la calcite).

IV.4.2. Analyse thermique des sédiments de dragage :

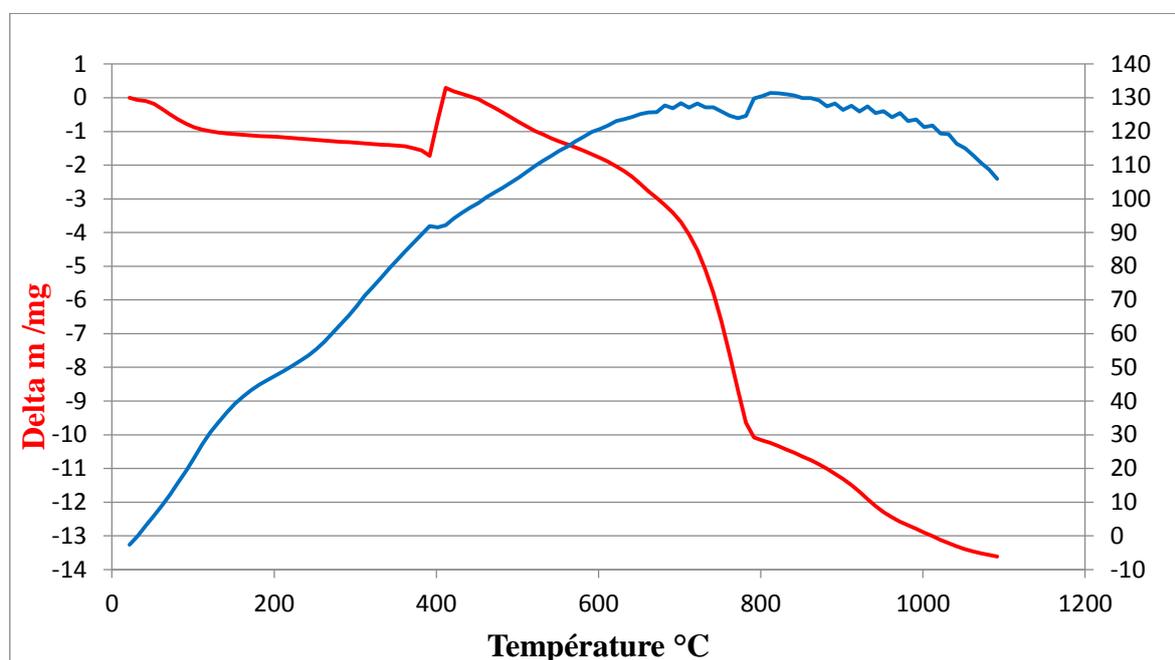


Figure IV.6 : Graphe représentatif d'ATD/ATG des sédiments de dragage.

Dans ce graphe, l'ATD révèle la présence de deux pics endothermique et deux pics exothermiques.

Le pic endothermique se manifeste entre 121°C et 231°C, qui se rapporte à la perte d'eau d'hydratation, le premier pic exothermique se manifeste entre 401°C et 411°C, se rapporte à la combustion des matières organique, le deuxième pic endothermique se manifeste entre 741°C et 800°C, décarbonatation (la décomposition thermique de la calcite).

L'ATG dévoile une perte de masse importante de la matière argileuse en fonction de l'augmentation de la température.

La matière perd 1% à 121°C, relative aux pertes des eaux d'hydratation.

La matière perd 1,2% à 391°C, relative à la combustion des matières organiques.

Une perte de 8% à 801°C, relative à la décarbonatation (décomposition thermique de la calcite).

IV.5. Analyse au microscope électronique à balayage :

IV.5.1. Analyse d'échantillon d'argile au MEB :

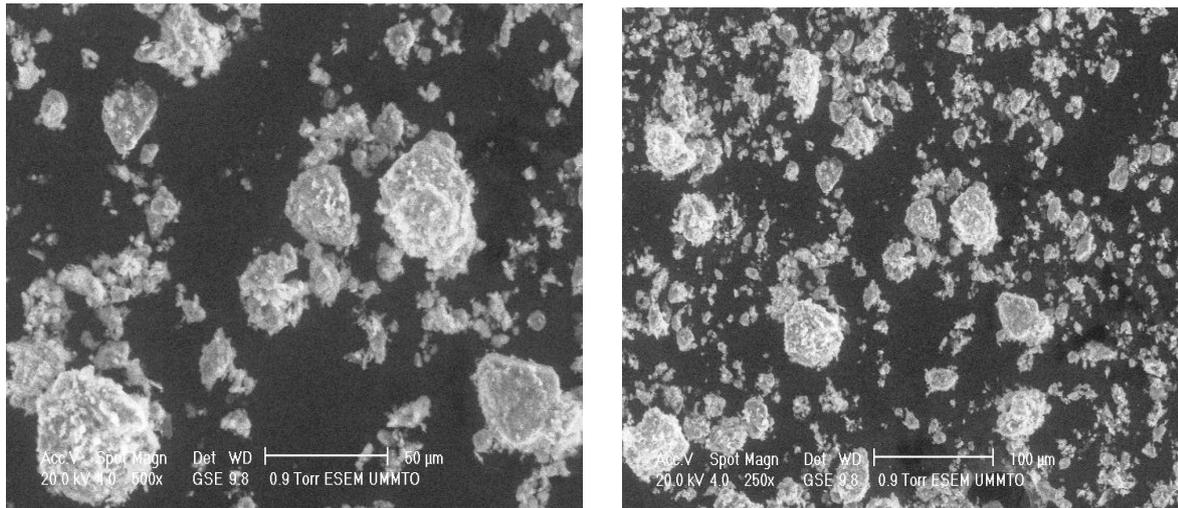


Figure IV.7 : Cristaux d'argile vus MEB de dimension 50μM à droite, à gauche de dimension de 100μM.

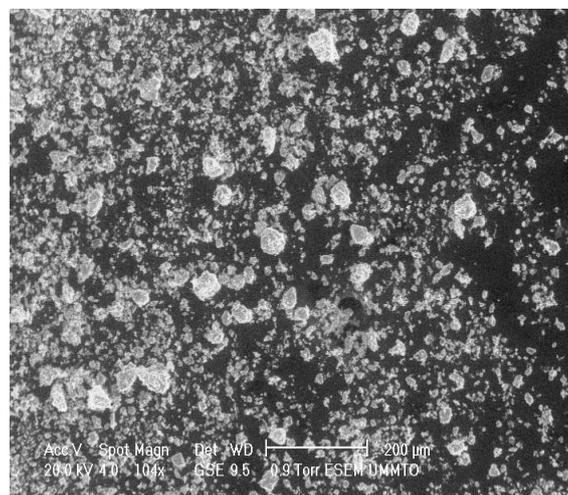


Figure IV.8 : Cristaux d'argile vus au MEB de dimension de 200μM.

L'analyse de l'argile par MEB laisse apparaître majoritairement la présence de quartz et de calcite et des grains de formes hexagonales qui sont de la kaolinite.

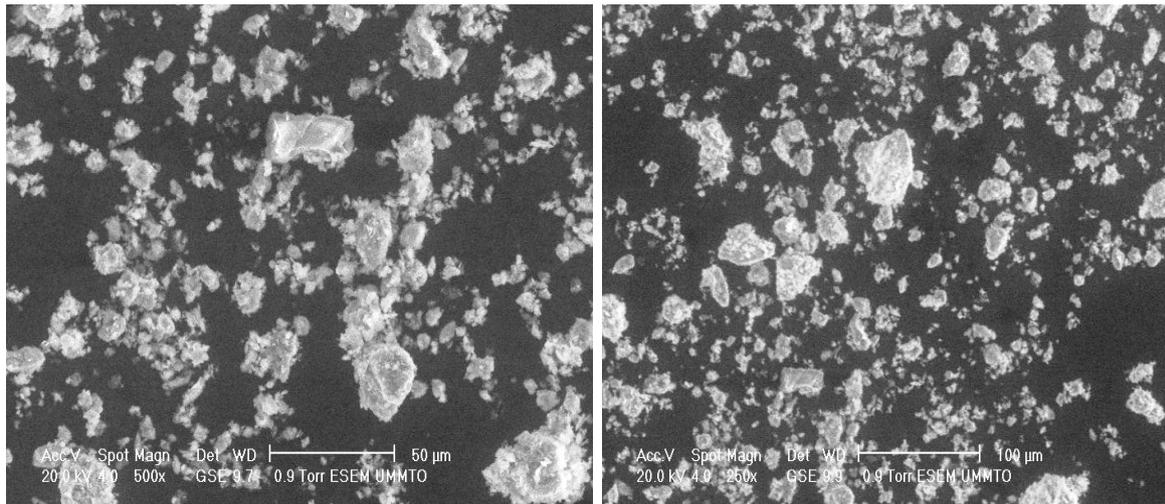
IV.5.2. Analyse d'échantillon de sédiment de dragage au MEB:

Figure IV.9 : Cristaux des sédiments de dragage vus (MEB) de dimension 50µM à droite, à gauche de dimension de 100µM.

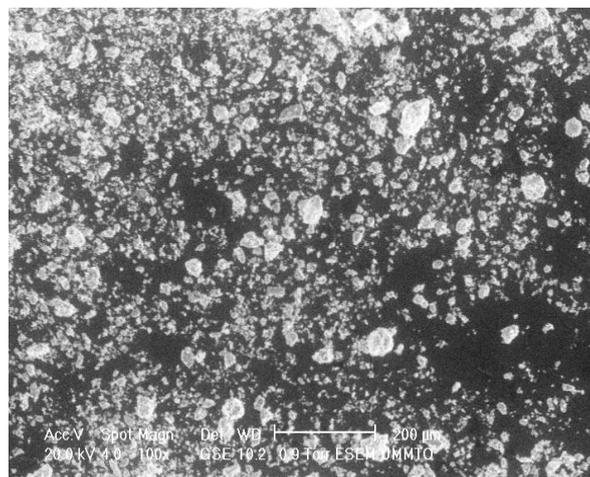


Figure IV.10 : Cristaux des sédiments de dragage vus au MEB de dimension de 200µM.

L'analyse morphologique du rejet nous montre qu'un aspect hétérogène de la matière, elle est essentiellement composée de grains très fins d'argile et des cristaux de forme anguleuse qui sont relatifs qui grains quartz. A ces cristaux s'ajoutent des grains bien arrondis de particules de calcite.

IV.6. Résultats d'essai au bleu de méthylène :

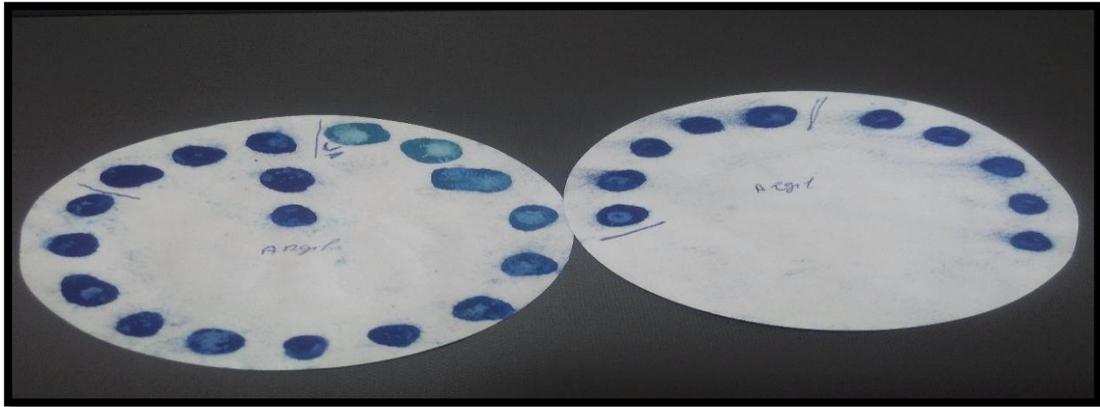


Figure IV.11 : Essai au bleu de méthylène d'argile.

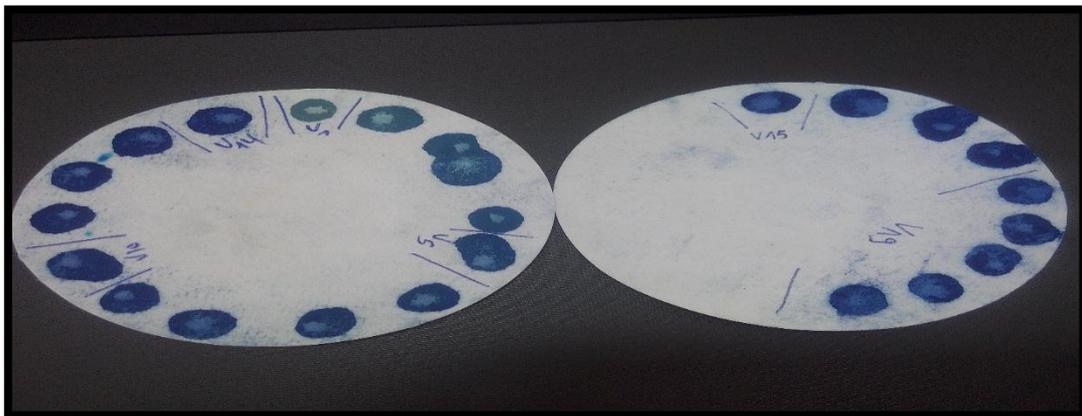


Figure IV.12 : Essai au bleu de méthylène des sédiments de dragage.

IV.6.1. Discussion des résultats :

Tableau IV.3 : Résultats du bleu de méthylène de l'argile.

	Essai d'argile
Masse sèche d'échantillon	$M_1=30g$
Quantité totale de solution de colorant ajoutée	$V_1=75ml$
Valeur de bleu de méthylène	$VB = 25$

✚ Méthode de calcul :

$$VB = \frac{V_1}{M_1} \times 10$$

Tableau IV.4 : Résultats du bleu de méthylène des sédiments de dragage.

	Essai de Sd
Masse sèche d'échantillon	$M_1=30g$
Quantité totale de solution de colorant ajoutée	$V_1=95ml$
Valeur de bleu de méthylène	$VB = 31,6$

✚ Le bleu de méthylène, révèle que l'argile et les sédiments sont des sols très argileux.

IV.7. Résultats de la masse volumique absolue :

Tableau IV.5 : Masse volumique d'argile

	Masse volumique (g/cm^3)	Moyenne
Essai 1	1,87	1,87
Essai 2	2	
Essai 3	1,87	

Tableau IV.6 : Masse volumique absolue des sédiments de dragage.

	Masse volumique (g/cm^3)	Moyenne
Essai 1	1,66	1,66
Essai 2	1,66	
Essai 3	1,66	

D'après les résultats, on constate que la masse volumique d'argile est supérieure à celle des sédiments de dragage.

IV.8. Résultats de la plasticité :

IV.8.1. La plasticité de l'argile :

Tableau IV.7 : Les résultats de la plasticité pour l'échantillon d'argile :

	Limite de liquidité		Limite de plasticité
N° de la tare	79	59	68
Masse du sol humide + tare	13,6	17,3	8,1
Masse du sol sec + tare	11,8	14,2	8
Masse de la tare	7,4	7,4	7,4

Masse du sol sec	4,4	6,8	0,6
Masse d'eau évaporée w%	1,8	3,1	0,1
Teneur en eau	40,91	45,58	16,67
Nombre de coups	30	19	

$$W_P(\%) = 16,66 \%$$

La limite de liquidité est calculée par loi suivante :

$$W_L = W_P * (N/25) * 0,121$$

$$W_L(\%) = 42,95\%$$

$$I_P = W_L - W_P(\%) \longrightarrow I_P = 26,29 \text{ donc } 15 < I_P < 40 : \text{ c'est l'état plastique.}$$

IV.9.2. La plasticité des sédiments de dragage :

Tableau IV.8 : Les résultats de la plasticité des sédiments de dragage.

	Limite de liquidité		Limite de plasticité
	66	46	
N° de la tare			78
Masse du sol humide + tare	13,1	14,7	7,8
Masse du sol sec + tare	11,3	12,4	7,7
Masse de la tare	7,4	7,4	7,4
Masse du sol sec	3,9	5	0,3
Masse d'eau évaporée w%	1,8	2,3	0,1
Teneur en eau	46,15	46	33,33
Nombre de coups	21	33	

$$W_P(\%) = 33,33\%$$

$$W_L(\%) = 46,37\%$$

$$I_P = W_L - W_P(\%) \text{ donc } I_P = 13,04 \longrightarrow I_P = 13,04 \text{ donc } 5 < I_P < 15 : \text{ c'est peu plastique.}$$

IV.9. Détermination du pH :

Tableau IV.9 : Le pH des matières premières.

Désignation des échantillons	Argile	Sédiments de dragage
PH	9	10

D'après les résultats du tableau, on constate que le pH correspond au milieu basique, ceci est dû du fait de la présence des teneurs en carbonates.

IV.10. Détermination des matières organiques :

Tableau IV.10 : Teneur en matières organiques des matières premières.

Désignation des échantillons	Argile	Sédiments de dragage
% des matières organiques	1,46	1,43

D'après les résultats du tableau, on constate que la valeur de la matière organique obtenue pour l'argile et les sédiments de dragage sont relativement faible, alors qu'elle est légèrement élevée pour l'argile par rapport aux sédiments de dragage et.

La matière organique, possède d'importantes propriétés indésirables du fait qu'elle retient d'eau, ce qui fait que nos matières premières utilisées demandent d'eau.

IV.11. Conclusion :

Ces résultats d'analyse nous permettent de conclure que :

- ✚ La masse volumique de l'argile est supérieur à celle des sédiments de dragages, du fait de la finesse de ces derniers, ce qui fait dire que ces derniers nécessitent beaucoup d'eau.
- ✚ Les limite de plasticité et de liquidité, montre que l'argile est dans état plastique, alors que les sédiments sont peu plastique.
- ✚ Le bleu de méthylène, révèle que l'argile et les sédiments sont des sols très argileux.
- ✚ L'analyse par DRX, révèle que l'argile et les sédiments possèdent une composition minéralogique variée, mais d'une différence non négligeable, dont le quartz, l'illite, la calcite sont les minéraux prédominants.

- ✚ La FX, complète l'analyse minéralogique, du fait que ces minéraux prédominant ont un % masse élevé par rapport aux autres minéraux.
- ✚ D'après l'analyse thermogravimétrique (ATG), on distingue la présence de trois phases importantes du processus de fabrication de la brique, la perte d'eau d'hydratation, la combustion des matières organiques et la décarbonatation.
- ✚ La teneur en matière organiques, permet de déduire aussi que l'argile est les sédiments absorbe plus d'eau.



Chapitre V
Propriétés des briques
élaborées

V.1. Introduction :

Ce chapitre traite la méthode qu'on a suivie pour la confection des briques.

Notre travail consiste à utiliser les rejets dans le but de la fabrication des briques.

Donc dans ce chapitre nous allons étudier les aspects suivants :

- ✚ Le retrait au séchage et à la cuisson.
- ✚ La masse au séchage et à la cuisson.
- ✚ La perte au feu.
- ✚ Le coefficient d'absorption d'eau.
- ✚ La résistance à la compression et à la flexion.

V.2. Préparations des éprouvettes :

La brique est le matériau de construction le plus fragile et difficile à confectionner, elle présente des caractéristiques qui sont en fonction de celles des composantes. Ces derniers sont essentiellement :

1. L'argile : qui est le composant essentiel dans la confection.
2. Eau : pour l'obtention de la pâte.

Avant de procéder à la méthode adéquate de la confection des briques, nous avons réalisé plusieurs essais au laboratoire, afin de déterminer les quantités suffisante, nécessaire et d'arriver au procéder de confection convenable. Donc, d'après ces expérience nous avons constaté qu'il faut prendre compte des allures suivantes :

La brique nécessite un bon mélange des matières premières, pour cela le mélange « argile et sédiment de dragage » a été remué durant 15min, afin d'assurer une bonne mixture entre les grains d'argile avec les sédiments de dragage et une bonne homogénéisation de la pâte. Cela on a utilisé le malaxeur, et le mélange entre nos mains.

L'homogénéisation de la pâte à brique est l'étape la plus délicate, importante qui demande du temps et de la patience, pour avoir un mélange parfait.

L'ensemble du mélange « argile et sédiment de dragage », nécessite une quantité d'eau adéquate pour avoir une pâte maniable et souple. Pour cela nous avons pu déterminer que

pour l'ensemble des % de sédiments utilisés, on doit ajouter un volume d'eau de (130ml à 150ml) ; et cette quantité varie selon la quantité des rejets ajouté.

La pâte ainsi préparée est met dans des moules, alors pour chaque moule de trois prismes en confectionne seulement deux prismes, cela afin de faciliter la technique de démoulage. Le moule est rempli complètement de la pâte, dont il faut bien compacter la brique, pour cela nous avons utilisé le matériels de compactage (cric auto) ancien à cause du manque d'appareil à presse dans le laboratoire.

La brique après qu'elle soit bien compactée, elle doit être démoulée sur place pour le séchage, car s'elle reste dans le moule elle prend un long temps de séchage et la pâte colle aux parois du moule. Puis la brique est séchée à l'air libre durant 72h et à l'étuve durant 24h.

Les briques sont cuites dans un four électrique à une température maximale de 950°C.

V.3. Méthode de la confection des briques :

V.3.1. Matériaux et matériels utilisés :

- Matières premières : argile de REMILA.
- **Ajout** : Sédiment de dragage du port de Bejaia.
- L'eau.
- **Broyeur** : d'une ouverture de 1mm.
- Tamis de 0.125mm (125µm).
- Récipient.
- Spatule.
- Balance.
- **Malaxeur** : appareil servant à malaxer (pétrir une matière pour la rendre plus molle), diverse matières, comme le béton, l'argile, le mortier... etc.
- **Moules de trois prisme** : Hauteur = 4cm.
Largeur = 4cm.
Longueur = 16cm.
- **Etuve** : pour le séchage de la matière première avant le broyage, et séchage de la brique.
- **Four** : pour la cuisson.
- Matériel pour le compactage.

V.3.2. Mode opératoire :

V.3.2.1. Préparation mécanique des matières premières :

Les matières premières utilisées sont d'abord séchées à l'étuve pour enlever le taux d'humidité, afin d'éviter le colmatage du broyeur.

a). Broyage :

C'est une opération qui consiste à réduire les dimensions des grains de la matière première à une granularité assez fine, atteignant quelques micromètres.

L'argile et les sédiments sont broyés à l'aide d'un broyeur d'un calibre de 1mm.

b). Tamisage :

Les matières premières ainsi broyées sont tamisées dans un tamis de 125µm.

V.3.2.2. Façonnage de la brique :

- ✚ Exemple de la méthode du façonnage pour une brique de 0 % d'ajout, c'est-à-dire 100% d'argile.
- On pèse 450 g d'argile dans un récipient.
- On ajoute 130 ml d'eau.



Figure V.1: Préparation de matériel nécessaire.

- A l'aide d'un malaxeur, on mélange bien l'argile et l'eau durant 5 min ou plus, jusqu'à l'obtention d'une pâte parfaitement homogène et plastique.



Figure V.2: Un malaxeur utilisé pour le mélange de la pâte.

- La pâte préparée ainsi est mise dans un moule de (4cm*4cm*16cm), le moule doit être bien remplis et bien compacté.
- Puis la brique est démoulée juste après le compactage.

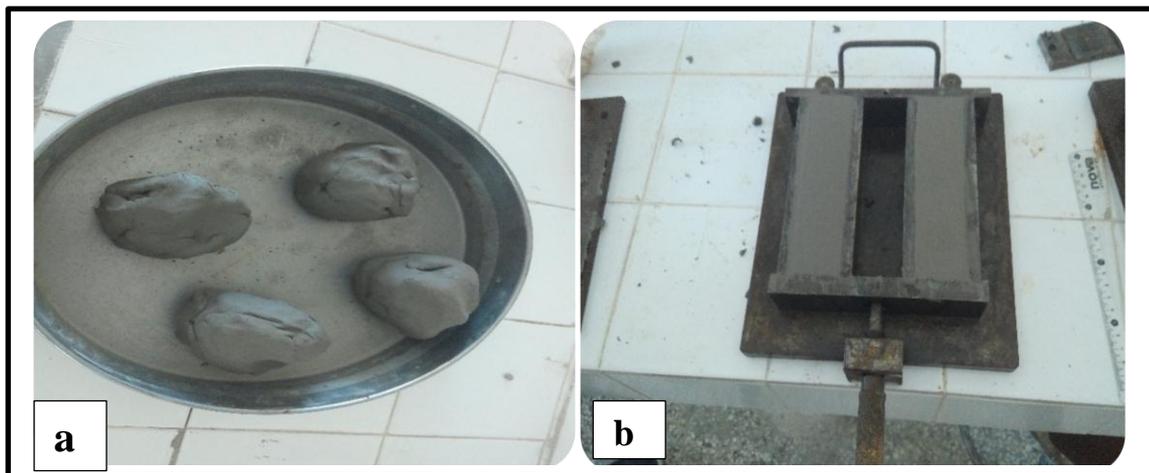


Figure V.3: a)- La pâte préparée; b)- Sa mise dans le moule à droite.

Remarque :

Pour les différents pourcentages d'ajouts, on suit la même méthode de façonnage, et pour chaque masse on confectionne six briques (2* le moule), alors que trois prismes sont utilisés pour la mesure des retraites et les poids, et les trois derniers prismes qui reste sont utilisés pour la détermination de la résistance à la compression/ flexion.

V.4. La composition des éprouvettes :

Les tableaux suivants donnent la composition du mélange de chaque série aux différents pourcentages sur cités (03 éprouvettes pour chaque échantillon).

Tableaux V.1 : Composition du mélange pour 0 % d'ajout.

0 % d'ajout	
% d'argile	100 %
Masse en (g)	450 g
% d'ajout	0
% en masse	0
Volume d'eau	130 ml

Tableau V.2 : Composition du mélange pour 5 % d'ajout.

5 % d'ajout	
% d'argile	95 %
Masse en (g)	427,5 g
% d'ajout	5 %
% en masse	22,5 g
Volume d'eau	130 ml

Tableau V.3 : Composition du mélange pour 10 % d'ajout.

10 % d'ajout	
% d'argile	90 %
Masse en (g)	405 g
% d'ajout	10 %
% en masse	45g
Volume d'eau	130 ml

Tableau V.4 : Composition du mélange pour 15 % d'ajout.

15 % d'ajout	
% d'argile	85%
Masse en (g)	382,5 g
% d'ajout	15%
% en masse	67,5 g
Volume d'eau	130 ml

Tableau V.5 : Composition du mélange pour 20 % d'ajout.

20 % d'ajout	
% d'argile	80 %
Masse en (g)	360g
% d'ajout	20 %
% en masse	90 g
Volume d'eau	140 ml

Tableau V.6 : Composition du mélange pour 100 % d'ajout.

100 % d'ajout	
% d'argile	0
Masse en (g)	0
% d'ajout	100 %
% en masse	450 g
Volume d'eau	150 ml

🔧 Méthode de calcul

➤ Exemple pour 5 % d'ajout :



Donc la masse d'argile est : $M_A = M_T - M_{SD} = 450 - 22,5 = 427,5g$.

V.3.2.3. Séchage :

Le séchage de la brique a pour but d'éliminer au maximum la quantité d'eau présente c'est-à-dire à 90%, afin d'éviter le choc thermique et la fissuration de la brique.

Le séchage est effectué selon deux parties :

- a). Séchage à l'air libre : durant 72 heures ;
- b). Séchage à l'étuve : durant 24 heures à 105°C ;



Figure V.4: L'ensemble des briques confectionnées après le séchage à l'étuve.

V.3.2.4. Cuisson :

Une fois la brique cuite est séchée, on passe à la cuisson qui est réalisée dans un four, programmé d'un temps exacte et des températures convenable pour avoir une bonne cuisson de la brique présentée dans le tableau suivant.

Tableau V.7 : Le programme de cuisson de la brique le temps en fonction de la température.

Température	Temps de cuisson
$0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 600\text{ }^{\circ}\text{C}$	5 heures
$600\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 950\text{ }^{\circ}\text{C}$	2 heures 30
$T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$	Pendant 1 heure



Figure V.5: Le four utilisé pour la cuisson des briques.

V.6. Les résultats du retrait des briques :

Les mesures du retrait sont présent en fonction de (la longueur, largeur et la hauteur) du 1^{ier} jour jusqu'au 21^{ieme} jour, mais pour voir la variation du retrait, on a calculé la variation en volume DV/V_0 .

- **Pied à coulisse** : instrument permettant de mesure dimensionnelle. Il se compose d'une règle fixe graduée en millimètres, et d'une partie coulissante



Figure V.6 : La mesure du retrait de la brique à l'aide du pied à coulisse.

Tableau V.8 : Le retrait des briques d'argile.

Jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DV/V ₀	0	5,78	12,30	13,97	14,15	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10

Tableau V.9 : Le retrait des briques de 5% d'ajout.

Jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DV/V ₀	0	2,78	16,67	17,61	17,86	18,20	18,64	18,64	18,64	18,64

Tableau V.10 : Le retrait des briques de 10 % d'ajout.

Jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DV/V ₀	0	11,20	15,41	16,56	16,85	16,96	16,96	16,96	16,96	16,96

Tableau V.11 : Le retrait des briques de 15 % d'ajout.

Jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DV/V ₀	0	10,14	15,65	16,21	16,53	16,71	16,62	16,62	16,62	16,62

Tableau V.12 : Le retrait des briques de 20 % d'ajout.

Jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DV/V ₀	0	5,34	13,49	16,48	17,18	17,10	17,02	17,02	17,02	17,02

Tableau V.13 : Le retrait des briques de 100% d'ajout.

Jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DV/V ₀	0	7,97	17,68	18,53	18,90	19,55	19,55	19,55	19,55	19,55

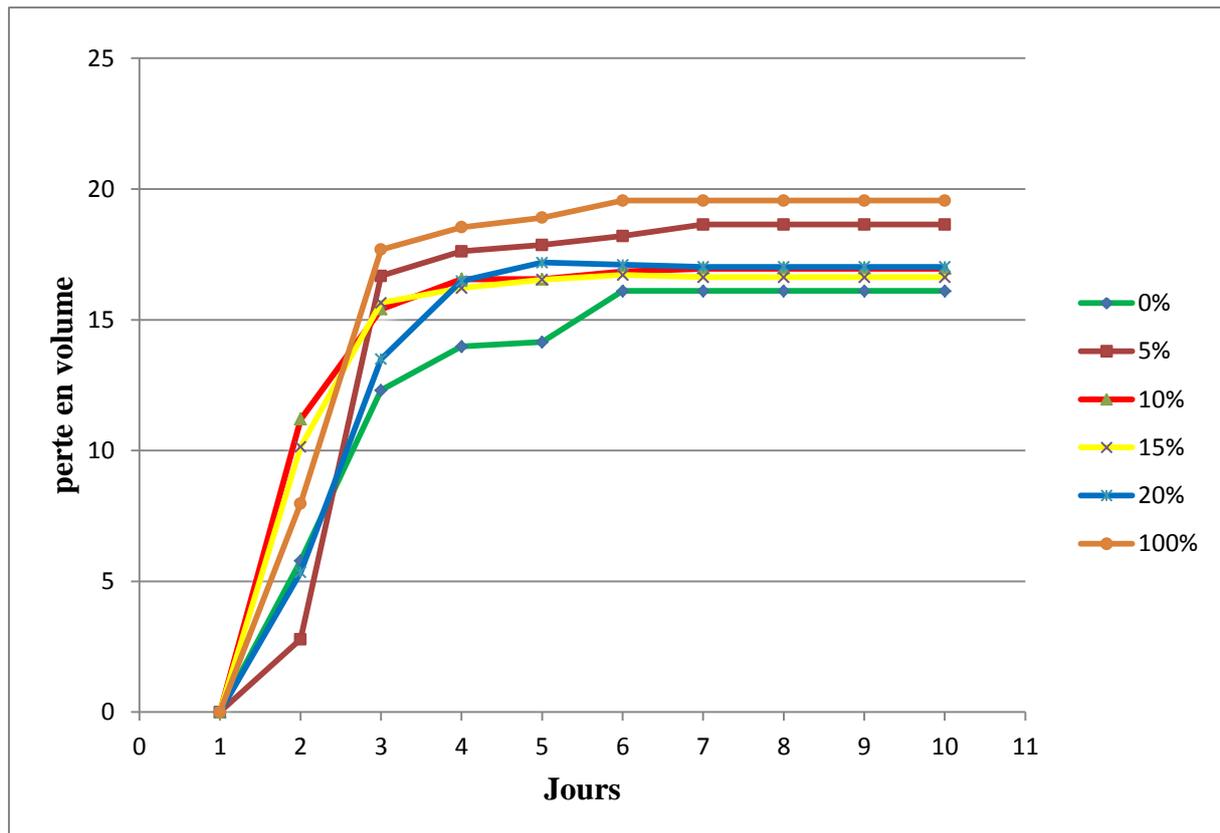


Figure V.7: Graphe représentatif de la variation de la perte en volume pour chaque % d'ajout.

Ce graphique nous permet de constater que la totalité de la perte en volume importante dès la phase du séchage jusqu'à la phase de la cuisson des briques, puis au-delà de cette phase on remarque une stabilisation du retrait des briques.

Plus précisément, cette perte en volume importante qui augmente du 1^{er} jour jusqu'au 3^{ème} jour jusqu'au 12,30cm³ pour l'argile, suivit 13,49cm³ à 16,67cm³ pour 5% à 20%, mais qui est très supérieure pour 100% de 17,68cm³ qui s'explique par la perte d'eau d'hydratation lors de la phase du séchage à l'air libre. Du 3^{ème} au 4^{ème} jour la perte de volume augmente toujours mais avec une certaine légèreté, à cause aussi de la perte d'eau lors du séchage à l'étuve pareille même pour le 4^{ème} et 5^{ème} jour qui révèle sur la phase de la cuisson, dès le 6^{ème} jour cette perte de volume se stabilise pour toutes les compositions des briques mais avec des valeurs qui varient selon la quantité des sédiments ajoutés.

Pour les différentes compositions la perte de masse est remarquable pour à chaque fois que la quantité des sédiments augmente, par exemple : $(DV/V_0)_{\text{sédiments}} > (DV/V_0)_{\text{argile}}$

Cette perte de volume est relative à la perte d'eau des briques, à cause de la variation de la quantité d'eau utilisée pour chaque % d'ajout des sédiments de dragage, à chaque fois que la quantité des sédiments augmente, ils demandent plus d'eau voir les tableaux des différentes compositions des éprouvettes (tableaux V.1, 2, 3, 4, 5, 6), aussi que les sédiments sont plus fins que l'argile, ce qui mène à une grande surface spécifique des sédiments de dragage ce qui réduit le volume).

V.7. Les résultats de la perte en masse des briques :

Tableau V.14 : Pertes en poids des briques de 0 %.

		0%								
Jours		1	2	3	4	5	6	7	8	21
Moyenne DM/M		14,06	20	32,46	32,66	32,60	32,56	32,56	32,56	32,56

Tableau V.15 : Pertes en poids des briques de 5 %.

		5%								
Jours		1	2	3	4	5	6	7	8	21
Moyenne DM/M		14,06	20,89	33,33	33,26	33,20	33,23	33,26	33,26	33,26

Tableau V.16 : Pertes en poids des briques de 10 %.

		10%								
Jours		1	2	3	4	5	6	7	8	21
Moyenne DM/M		7,62	20,95	33,49	33,35	33,35	33,36	33,38	33,38	33,38

Tableau V.17 : Pertes en des briques de 15%.

		15%								
Jours		1	2	3	4	5	6	7	8	21
Moyenne		10,77	19,83	32,53	32,84	32,49	32,51	32,51	32,51	32,51
DM/M										

Tableau V.18 : Pertes en poids des briques de 20 %.

		20%								
Jours		1	2	3	4	5	6	7	8	21
Moyenne		5,98	13,83	17,26	18,32	17,37	17,37	17,37	17,37	17,37
DM/M										

Tableau V.19 : Pertes en poids des briques de 100 %.

		100%									
Jours		1	2	3	4	5	6	7	8	9	21
Moyenne		11,07	19,56	32,49	32,48	32,48	32,48	32,45	32,42	32,44	32,44
DM/M											

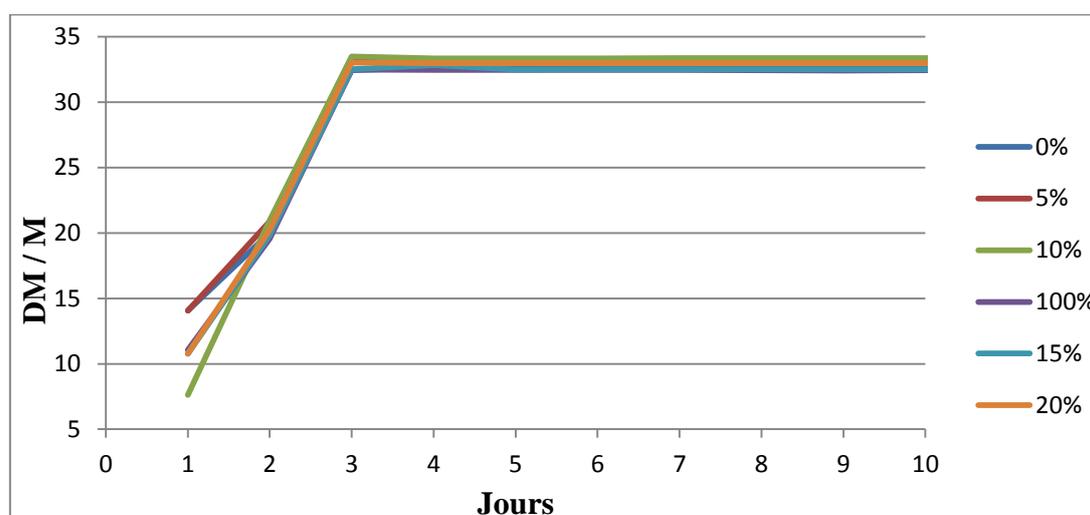


Figure V.8 : Graphe représentatif de la variation de la perte en masse pour les différentes briques.

D'après ce graphe, on constate que les six courbes ont la même allure, à vrai dire la même perte en masse pour différentes compositions des briques. Nous remarquons que :

- Du 1^{ier} au 2^{ième} jours la perte de masse se différencie pour chaque composition de la brique.
- Du 2^{ième} au 4^{ième} jours, une perte de masse importante de 20g à 27,5g qui est la même augmentation de la perte en masse des différentes compositions, c'est la phase du séchage (à l'air libre et à l'étuve) ; au-delà du 4^{ième} jours une perte en masse non négligeable c'est la phase de cuisson, qui se stabilise juste après la cuisson des briques.

Cette perte de masse s'explique par le départ d'eau d'hydratation, c'est par rapport à la quantité d'eau qu'on a utilisée pour chaque quantité des sédiments utilisées ; ainsi que la perte en volume (diminution du retrait des briques).

V.8. Caractéristiques mécaniques :

L'objectif de la détermination des résistances mécaniques de la brique confectionnée, permet de voir si le matériau est résistant.



Figure V.9 : Appareil de la résistance à la compression et à la flexion.

V.8.1. La résistance à la flexion :

L'essai consiste à soumettre le plan d'une éprouvette de dimensions (16*4*4) cm à une charge uniforme au moyen d'un vérin doté d'indicateurs de charge (capteurs de force) pour la lecture des forces appliquées.

Le but de l'essai est la détermination de la résistance à la flexion sous l'action des forces appliquées perpendiculaire au plan de l'éprouvette. La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée en augmentant progressivement la charge appliquée [66].

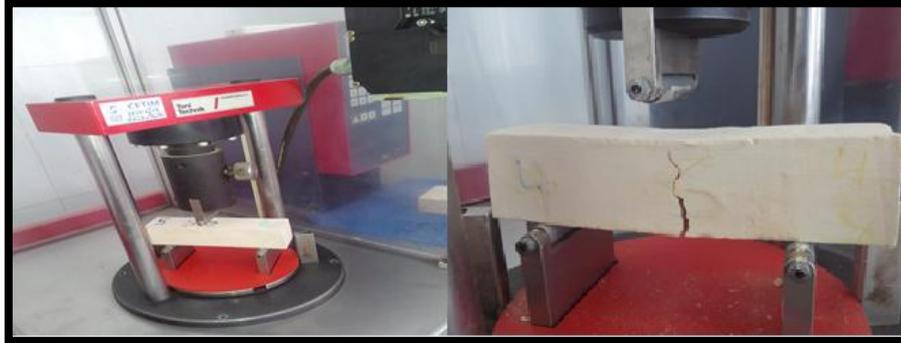


Figure V.10 : Essai de flexion.

V.8.2. La résistance à la compression :

Cet essai est effectué sur les demi-échantillons obtenus après la rupture à la flexion. La compression doit être appliquée toujours en sens perpendiculaire sur la surface sur laquelle reposera la brique.

Pour un seul prisme de brique, on obtient de valeurs de résistance à compression, donc on fait la moyenne des deux demi-échantillons [49].



Figure V.11 : Essai de compression.

V.9. Résultats de la résistance à la flexion et à la compression :

V.9.1. La résistance à la flexion :

Tableau V.20 : Récapitulatif de l'essai à la flexion pour l'ensemble des essais.

% d'ajout	0%	5%	10%	15%	20%	100%	Norme
RF (MPa)	4,1	2,9	2,6	2,2	2,2	1,6	-

V.9.2. La résistance à la compression :

Tableau V.21 : Récapitulatif de l'essai à la compression pour l'ensemble des essais.

% d'ajout	0%	5%	10%	15%	20%	100%	Norme
RC (MPa)	33,4	27,7	27,2	25,8	25,20	20,4	28

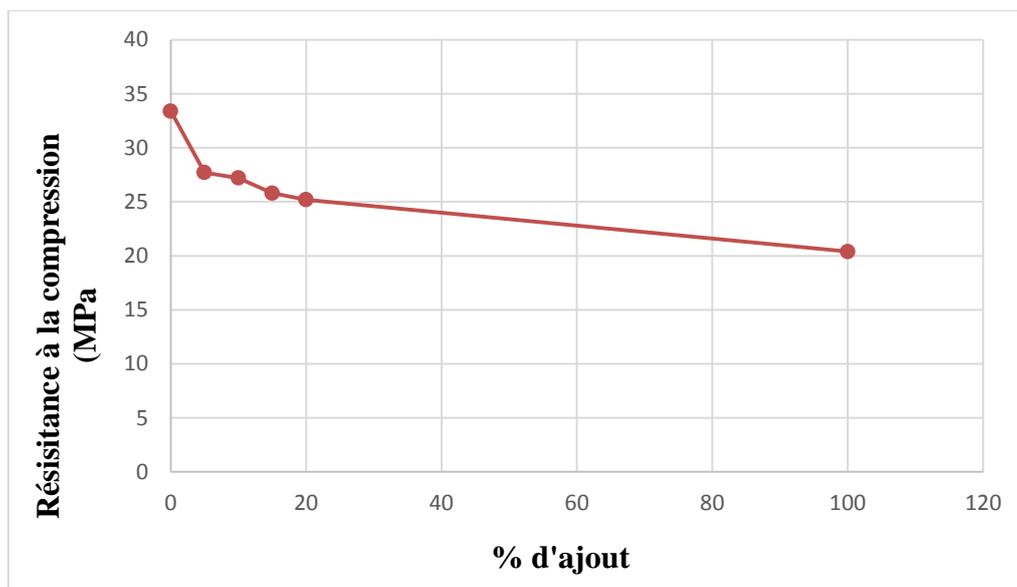


Figure V.12 : Graphe représentatif de la résistance à la compression des briques.

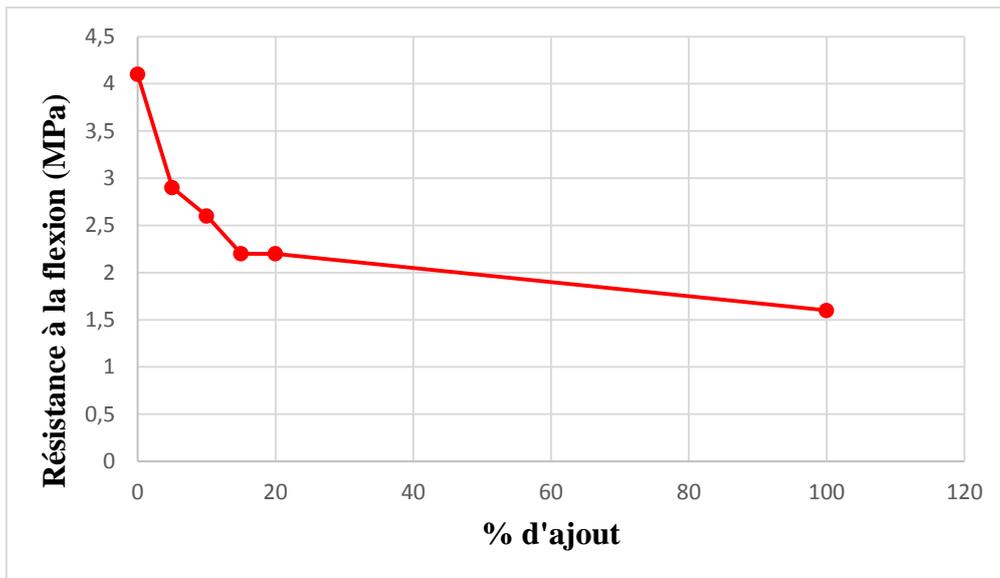


Figure V.13 : Graphe représentatif de la résistance à la flexion des briques.

V.9.3. Discussion des graphes de la résistance à la flexion et à la compression :

Ces courbes nous permettent de constater que la résistance à la flexion et à la compression diminue à chaque fois que la quantité des sédiments de dragage augmente.

La première courbe nous montre aussi que la résistance à la compression d'argile est élevée de 33,4MPa, alors qu'elle diminue de 5% à 20% légèrement, dont la compression est très remarquable pour les briques en sédiments de dragage par rapport aux autres compositions beaucoup plus celle d'argile.

La deuxième courbe nous montre que la résistance à la flexion d'argile est élevée de 4.1MPa, qui diminue de 5% à 20% légèrement de 2,9MPa à 2,2MPa, alors que pour la brique en sédiments remarquable de 1,6MPa par rapport aux différentes compositions des briques, beaucoup plus celle d'argile.

V.10. Détermination des caractéristiques physiques des différentes briques :

V.10.1. Coefficient d'absorption :

L'absorption en eau est déterminée par immersion d'une éprouvette de brique dans l'eau jusqu'à une masse constante. Cette dernière est calculée par la loi suivante :

$$A(\%) = [(M_h - M_s) / M_s] * 100$$

V.10.1.1. Mode opératoire :

- On pèse les briques pour chaque pourcentage d'ajout.
- On met les briques dans un bassin d'eau, et les laisser pendant 48h.

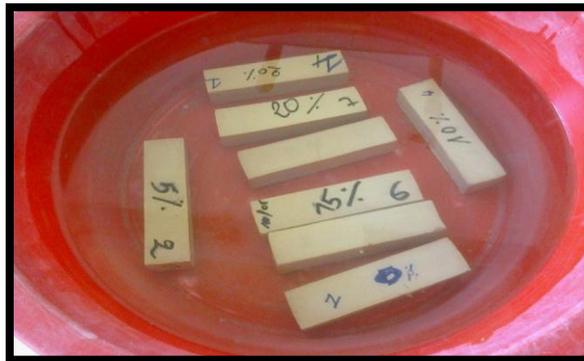


Figure V.14 : Les briques dans l'eau.

- Après 48h on pèse encore les briques, et on calcule le coefficient d'absorption d'eau.

Donc les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.22 : Coefficient d'absorption en eau des différentes compositions.

Composition	Coefficient d'absorption d'eau C%
0%	19,25
5%	21,00
10%	20,00
15%	20,39
20%	20,53
100%	20,67

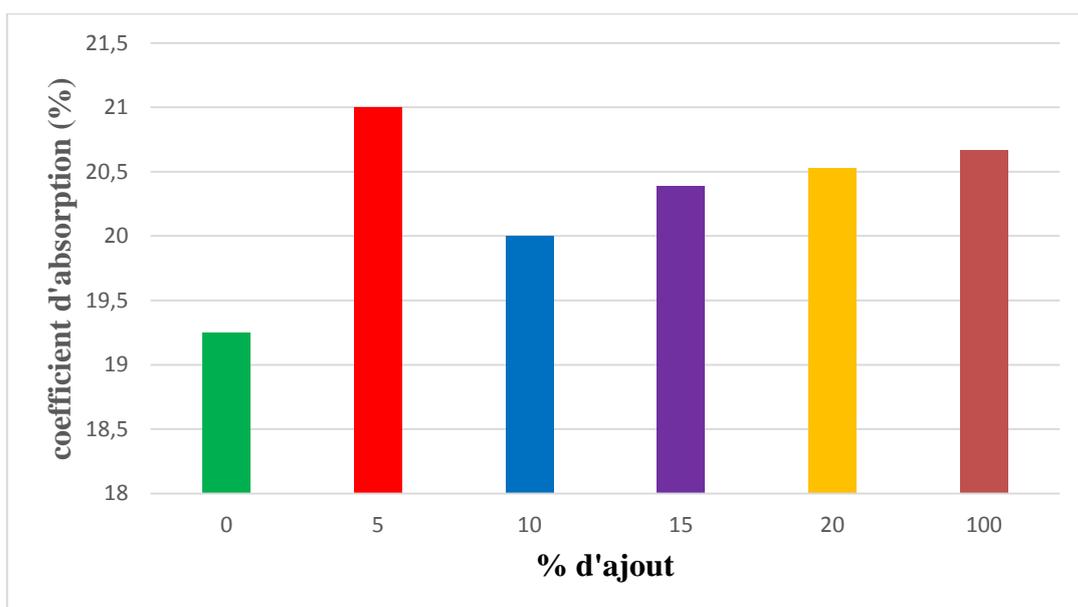


Figure V.15 : Histogramme représentatif de la variation d'absorption en eau des briques.

L'histogramme, nous permet de constater que le coefficient d'absorption en eau augmente lors de l'augmentation de la quantité des sédiments de dragages pour toutes les compositions des briques, Cela s'explique que les sédiments de dragages demandent une grande quantité d'eau beaucoup plus que l'argile, du fait que les sédiments de dragages sont plus fins que l'argile et que la porosité est importante.

V.10.2. La masse volumique apparente des briques :

Les résultats de la masse volumique apparente sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau V.23 : La masse volumique apparente des briques en fonction de la composition.

Composition	Masse volumique apparente (g/cm ³)
0%	1,64
5%	1,62
10%	1,60
15%	1,59
20%	1,58
100%	1,57

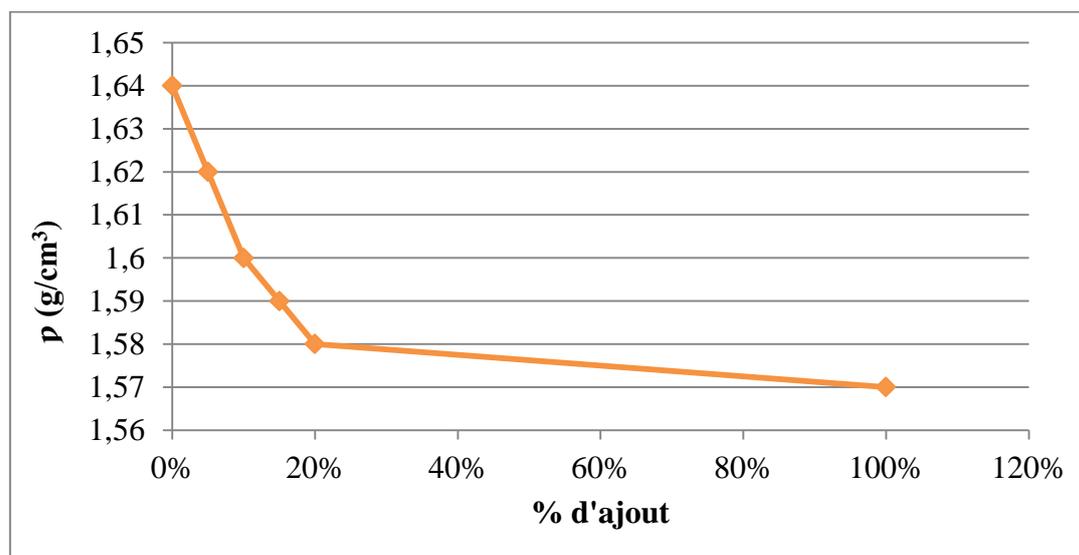


Figure V.16 : Graphe représentatif de la variation de la masse volumique apparente des briques.

D'après ce graphe, on constate que la masse volumique diminue à chaque fois que le pourcentage d'ajout augmente ; par exemple pour % : $p = 1,64 \text{ g/cm}^3$; pour 15% : $p = 1,59$ et pour 100% des sédiments : $p = 1,57 \text{ g/cm}^3$. On peut donc justifier ces résultats de mesures, du fait la masse volumique d'argile est supérieure à celle des sédiments de dragages.

V.11. Conclusion :

L'ajout des sédiments de dragages pour l'élaboration des briques, nous à permet de déduire que :

- ✚ Les briques dévoilent sur une perte en masse et une perte en volume importante lors de la phase du séchage.
- ✚ Les sédiments de dragages sont des matières qui nécessitent beaucoup d'eau plus que l'argile, à cause de leur finesse.
- ✚ Les briques possèdent une importante, forte résistance à la compression et à la flexion, du fait du bon compactage et de l'existence d'une connexion forte entre les grains.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Durant notre travail qui consiste à préparer des briques contenant des sédiments de dragage nous avons conclu ce qui suit :

- ✚ L'analyse par DRX, révèle que l'argile et les sédiments possèdent une composition minéralogique variée, à savoir le quartz, l'illite, calcite sont les minéraux prédominant.
- ✚ La FX, complète l'analyse minéralogique, du fait que ces minéraux prédominant ont un % masse élevé par rapport aux autres minéraux.
- ✚ D'après l'analyse thermogravimétrique (ATG), on distingue la présence de trois phases importantes du processus de la fabrication de la brique, la perte d'eau d'hydratation, la combustion des matières organiques et la décarbonatation.
- ✚ L'ATD révèle sur une perte de masse importante durant les phases du processus de fabrication de la brique.
- ✚ La teneur en matière organiques, permet de déduire aussi que l'argile est les sédiments absorbe plus d'eau.
- ✚ Les limite de plasticité et de liquidité, montre que l'argile est dans état plastique, alors que les sédiments sont peu plastique.
- ✚ Le bleu de méthylène, révèle que l'argile et les sédiments sont des sols très argileux.

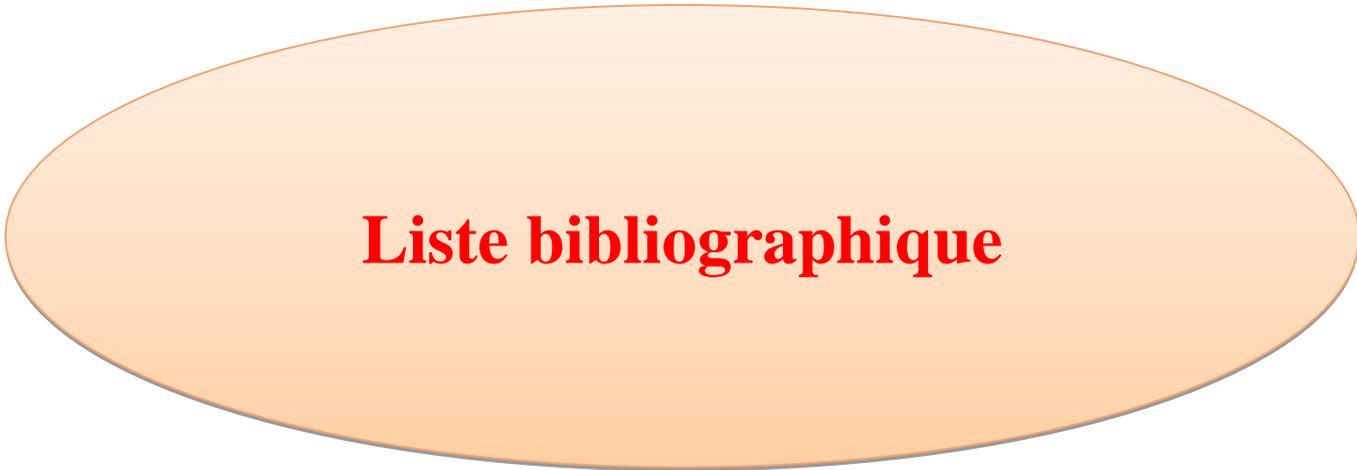
La confection des briques avec les sédiments nous permet de conclure que :

- ✚ Les briques dévoilent sur une perte en masse et une perte en volume importante lors de la phase du séchage.
- ✚ Les sédiments de dragages sont des matières qui nécessitent beaucoup d'eau plus que l'argile, à cause de leur finesse ce qui fait que les brique en sédiment absorbe plus d'eau.
- ✚ Les briques possèdent une importante, forte résistance à la compression et à la flexion, du fait du bon compactage.
- ✚ La brique avec des sédiments de dragages sont plus légère, et moins résistante par rapport à celle d'argile et elles ont le même mode de cuisson.
- ✚ La couleur de la brique d'argile et les sédiments ont une même couleur (jaune).

Cette étude expérimentale, nous a permet de conclure que la caractérisation des sédiments de dragages sont des déchets qu'on peut valoriser, cela de les utilisée comme ajout dans le

Conclusion générale

domaine de la brique en argile jusqu'à 20%. En effet à 20% la brique en sédiment de dragage possède les mêmes propriétés physico-chimiques que la brique en argile par rapport à la norme.



Liste bibliographique

Références bibliographiques

- [1] L.DUFOURNI. "Terre cuite et construction". Revue trimestrielle n°105, étudié par la fédération Belge de la brique, 2003.
- [2] J.RAMAROSON. "Calcination des Sédiments de Dragage Contaminés". Etudes des Propriétés Physico-chimiques à l'Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.
- [3] Agostini, F. " Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins ", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2006.
- [4] P.Y SCORDIA. "Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers" ; Thèse de doctorat 2008. Ecole Centrale de Lille, France.
- [5] G. SCHNEIDER. "Boues de curage des cours d'eau", Le courrier de l'Environnement de l'INRA, vol, 43, pp146-147, 2001.
- [6] MAC FARLANE F, "Méthodologie de gestion des matériaux de dragage maritime, application au port Dunkerque". Thèse de doctorat, Université d'Artois– Ecole des Mines de Douai, 2004.
- [7] P.YSCORDIA. "Caractérisation et Valorisation des sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers".2008.
- [8] Kenneth O, Hardy.A.J. "Impact of Navigational Dredging on Fish and Wildlife. A Literature" Review. US Department of the Interior. 1980.
- [9] E. Ottman. " Un problème controversé pour l'environnement marin : les dragages et leurs conséquences". Actes du 1^{ier} colloque d'océanologie côtière, Bordonner 85, Bordeaux, 8-11 Octobre 1985.
- [10] Babut, M. "Sediment quality assessment of three rivers and streams in France " the Rhône and the Seine Berlin, 1999.
- [11] J.CIARK.Coastal Ecosystems Management.New York, John Wiley.1997
- [12] Dia, M. "Traitement et valorisation de sédiments de dragage en technique routière ", Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Douai, 169 pages, 2013.
- [13] N.TAN. "Etude pour une utilisation des sédiments comme les matériaux routiers". Thèse de doctorats-Douai : université d'Artois.2009.
- [14] D. DARMENDRAIL, "Filtration géochimique de métaux lourds lors de leur transfert d'une rivière vers une nappe alluviale" ; applications à la nappe des alluvions du Rhône (69) et de la Deûle (59), Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux III, 450p, 1987.

Références bibliographiques

- [15] T. RAMESSUR, T. RAMJEAWON, Determination of lead, chromium and zinc insediments from an urbanized river in Mauritius Environment International, Edition2002.
- [16]R.G.FOX, D.DENNIS-FLAGER, D.C.COWGILL. "Sediment assessment Approach of U.S", 1993.
- [17] N.KETNTENER.O.KRONE, R.ALTENKAMP, neither Environmental contaminants in liver and kidney of neither free-ranging nor themgoshawks (accipiter gentiles) from the region of Germany.Arch.Environ.Contam.Toxicol.45, 128-135, 2003.
- [18] T.ZOUMIS, A.SCHMIDT, The science of the total environment, 266, 195-202, 2001.
- [19] C.CAPLAT, H.TEXIER, D.BARILLIER, C.LELIEVRE, Heavy metal mobility in harbour contaminated sediments: The case of Port-en-bassin.Marine Pollution Bulletin, 50, 504-51, 2005.
- [20] F.MAROT, "Caractérisation et traitement des sédiments de dragage contenant des polluants métalliques". Paris:BRGM, 330p, 1998.
- [21] A.BATTAGLIA, S.GHIDINI, G.CAMPANINI, R.SPAGGIARI, Heavy metal contamination in little owl(Athena noctua) and common buzzard (buteobuteo) from northern Italy.Ecotoxicol.Environ.Safe, 60, 61-6, 2005.
- [22] R.W.CANAVAN, P.VAN CAPPELLEN, J.J.G.ZWOLSMAN, G.A.VAN DEN BERG, C.P.SLOMP and Geochemistry of trace metals in fresh water sediment: Field results and digenetic modeling, science of the total environment, 381, issues 1-3, 263-27, 2007.
- [23] C.ALZIEU, C.ANDRAL, P.BASSOULLET, B.BOUTIER, Bio évaluation de la qualité environnementale des sédiments portuaires et des zones d'immersion. Plouzané : Edition Ifremer, 2003.
- [24] M.PEREZ-LOPEZ, F.CID, A.L.OROPESA, L.E.HIDALGO, A.LOPEZ BECHEIRO, F.SOLER, Heavy metal and arsenic content in sca birds affected by the prestige oil spill on the Galician coast (NW S pain).Sci.Total Environ, 359(1-3), 209-220, 2006.
- [25] N.KETN TENER, O.KRONE, R.ALTEN KAMP, F.TTARUCH, Environmental contaminants in liver and kidney of free-ranging northern goshawks(Accipiter gentiles)from the region of Germany.Arch.Environ.Contam.Toxical.45, 128-135, 2003.
- [26] Bonnet. " 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, 2000

Références bibliographiques

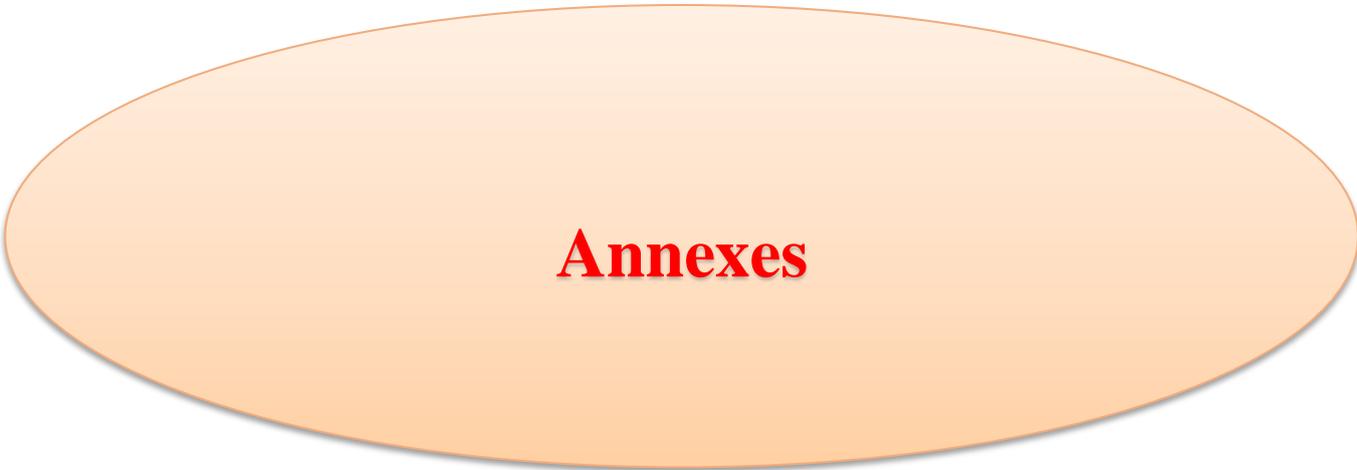
- [27] M.PETTINE, S.CAPRI, Digestion treatments and risks of Cr(III)-Cr(VI) interconversions during Cr(VI) determination in soils and sediments –a review analytic chemical act, 540, 231-238, 2005.
- [28] H.SANEI, F.GOODARZI, Relationship between organic matter and mercury in recent lake sediments: The physical-geochemical aspects. Applied geochemistry, Volume 21, 1900-1912, 2006.
- [29] D.LIDE, Handbook of chemistry and physics, CRC Press, 2002.
- [30] F.MAROT, Caractérisation et traitement des sédiments de dragage contenant des polluants métalliques. Paris: BRGM, 330p, 1998.
- [31] J.HARMSSEN, Bioremediation of polluted sediments: a matter of time or effort proceedings of the sixth international in situ and on site bioremediation symposium, 4-7june 2001, San Diego, California, 5, 279-287, 2001.
- [32] H.NAKATA, Y.SAKAI, T.MIYA WAKI, A.TAKEMURA, Bioaccumulation and toxic potencies of PCB and PAH in tidal flat and castellecosystems of the ariake sea, Japan, Environmental Science and Technology, 37(16), 3513-352, 2003.
- [33] MAC FARLANE F.- Méthodologie de gestion des matériaux de dragage maritime - Application au port de Dunkerque. Thèse de doctorat, Université d'Artois– Ecole des Mines de Douai, 2004.
- [34] ZRI A. - Valorisation des sédiments marins et fluviaux : Etude bibliographique.- DOUAI 2005.
- [35] BRAKNI S. - Première approche vers une valorisation de granulats artificiels à base de sédiments de dragage portuaire : application en génie côtier : Thèse. - université d'Artois– Ecole des Mines de Douai, 2008.
- [36] Document technique. « Plan de développement de l'exploitation du gisement d'argile d'Oued Remila », année2016
- [37] Jean –pierre. Adam la construction romaine. Matériaux et techniques. Sixième édition. Grands manuels picards, 2011
- [38] Louis Alphonse Salvétat. Leçons de céramique professées à l'Ecole centrale des arts et manufactures, ou Technologie céramique : comprenant les notions de chimie, de technologie et de pyrotechnie, applicables à la fabrication, à la synthèse, à l'analyse et à la décoration des poteries. Mallet-Bachelier, 1857

Références bibliographiques

- [39] Sandrine Banes y et Jean-Jacques Germain, la brique, l'or rouge du Midi Toulousain, Tourisme Médias Editions, juin 2004.
- [40] Philippe Roi et Tristan Girard, le moule à briques normalisé et à la main, la Théorie Sensorielle, Les Analogie Sensorilles, First Edition Design Publishing, septembre 2013.
- [41] La briqueterie de Virebent, Archive, Mairei de Launaguet, consulté le 30 septembre 2007.
- [42] Transfert de Technologies Écologiquement Rationnelles: Études de Cas Extraites du Portefeuille de Projets du FEM sur le Changement Climatique. Global Environment Facility, 15 novembre 2012. Des fours à brique haut rendement énergétique pour le Bangladesh.
- [43] J. PICOCHÉ. "Dictionnaire étymologique du français". Editions, Les usuels du Robert, 1984.
- [44] B.VeldeetA.Meunier, The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks, Springer, 2008
- [45] F. BOUZID. "Etude de l'aspect chimico-physique des caractéristiques mécaniques d'une argile gonflante : Bentonite". Mémoire de magistère, USTHB, Alger, 1997.
- [46] M.E. TUCKER. "Sedimentary Petrology". An introduction Blackwell, 1981.
- [47] R.D. HOLTZ et W.D. KOVACS. "Introduction à la Géotechnique" Editions de l'école polytechnique de Montréal, 1991.
- [48] R. MOREL. "Les Sols Cultivés. Lavoisier", édition Lavoisier, Paris, 1996.
- [49] S. CAILLERE, S. HENIN, M. RAUTUREAU. "Minéralogie des argiles". Edition Masson, Paris, 1982.
- [50] Grégoire, P., 2012 : " Stratégie de dragage et de gestion des sédiments du port de Dunkerque" Paris, 1982. , Congrès écotecnologies pour le futur – Atelier sédiments –13 juin 2012.
- [51] N. FAGEL. "Cours Géologie des Argiles", Département Géologie, Université de Liège. Belgique 2005.
- [52] R. GRAS. "Physique des Sols pour l'Aménagement". Edition Masson. Paris, 1988.

Références bibliographiques

- [53] R.DUPAIN, R.LANCHON, J-C.SAINT-ARROMAN." Granulats, Sols, Ciments, et Bétons ". Caractérisation des matériaux de génie par des essais de laboratoire. Edition Casteilla, Paris, 1995.
- [54] P. ANTOINE, D.FABRE." Géologie Appliquée en Génie Civil". Edition Masson, Paris, 1984.
- [55] M.K.GUEDDOUDZ, Stabilisation des Argiles Gonflantes par Ajout du Sable (cas de la région de Laghouat). Mémoire de Magistère. U.S.T.Oran, 2004
- [56] G.PIERS. La brique : fabrication et traditions constructives. Editions, Groupe Eyrolles, 2005.
- [57] L.AMVISET. "Matériaux de Terre Cuite", Techniques de l'Ingénieur N°2-85978-184-6, 1994.
- [58] L.DUFOURNI. Terre cuite et construction. Revue trimestrielle N°105, éditée par la fédération Belge de la brique, 2003.
- [59] AREZKI née DJADOUF SAMIA« Thèse étude de l'influence des ajouts (grignon d'olive et foin) sur les caractéristiques physico-mécaniques de la brique de terre cuite ».P :31, thèse doctorat U.Bejaia.2017.
- [60] S.GUTIERREZ. «Granulométrie laser mastersizer 2000 Malvern », professionnel en caractérisation des matériaux LCG/CCM/IMSI/U, Ed. Le Griffon d'argile, livre, 2000.
- [61] Power, E.A "Assessing sediment quality", SEDIMENT Toxicity Assessment, 1992.
- [62] B.HARDBUZARU, préparation des structurants organiques et leur engagement en synthèse hydrothermale de zéolithes, thèse doctorat, haute alsace, 2003.
- [63] HADJ MEKATEL, « Utilisation des zéolites de type A et X dans la récupération des métaux par réaction d'échange d'ion », mémoire de magistère, université de Boumerdes, 2008.
- [64] F.Gabrysiak, Les granulats, starsbourg, Academie de nancy-Metz, p27.
- [65] J.Coset, G.Sanglerat. Cours pratique de mécanique des sols. Plasticité et calcul des tassements. Tome 1, 3° Edition Donod, 1983.
- [67] R.Dupain, R.Lanchon. « Granulats, Sols, Ciments et Béton. Caractérisation des matériaux de génie civil par essai de laboratoire ». Edition CASTELLA, année 1995.



Annexes

Annexe

Annexe 01.a : Résistance à la flexion des essais des briques en argile.

	Numéros des prismes	Résistance à la flexion (MPa)	la flexion moyenne (MPa)
Série 01 à 0% d'ajouts	5	56	41
	6	38	
	7	29	

Annexe 01.b : Résistance à la flexion des essais des briques avec 5% des sédiments.

	Numéros des prismes	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la flexion moyenne (MPa)
Série 02 à 5% d'ajouts	1	17	24
	4	29	
	5	26	

Annexe

Annexe 01.c: Résistance à la flexion des essais des briques avec 10% des sédiments.

	Numéros des prismes	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la flexion moyenne (MPa)
Série 03 à 10% d'ajouts	2	26	38
	5	38	
	7	50	

Annexe 01.d : Résistance à la flexion des essais des briques avec 15% des sédiments.

	Numéros des prismes	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la flexion moyenne (MPa)
Série 04 à 15% d'ajouts	3	36	31
	4	33	
	6	22	

Annexe 01.e : Résistance à la flexion des essais des briques avec 20% des sédiments.

	Numéros des prismes	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la flexion moyenne (MPa)
Série 05 à 20% d'ajouts	2	28	22
	3	16	
	5	22	

Annexe

Annexe 01.f : Résistance à la flexion des essais des briques avec 100% des sédiments.

	Numéros des prismes	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la flexion moyenne (MPa)
Série 06 à 100% d'ajouts	4	22	23
	6	30	
	7	16	

Annexe 02.a : Résistance à la compression des essais des briques en argile.

	Numéros des Prismes	Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression moyenne (MPa)
Série 01 à 0% d'ajouts	5	1	3,37	3,34
		2	3,91	
	6	1	3,43	
		2	3,67	
	7	1	2,85	
		2	2,78	

Annexe 02.b : Résistance à la compression des essais des briques avec 5% des sédiments.

	Numéros des Prismes	Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression moyenne (MPa)
Série 02 à 5% d'ajouts	1	1	3,91	2,77
		2	2,93	
	4	1	2,36	
		2	2,84	
	5	1	2,35	
		2	2,21	

Annexe

Annexe 02.c : Résistance à la compression des essais des briques avec 10% des sédiments.

	Numéros des Prismes	Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression moyenne (MPa)
Série 03 à 10% d'ajouts	2	1	3,12	2,72
		2	3,01	
	5	1	2,28	
		2	2,68	
	7	1	2,81	
		2	2,39	

Annexe 02.d : Résistance à la compression des essais des briques avec 15% des sédiments.

	Numéros des Prismes	Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression moyenne (MPa)
Série 04 à 15% d'ajouts	3	1	2,58	2,98
		2	2,71	
	4	1	2,60	
		2	3,87	
	6	1	2,87	
		2	3,24	

Annexe

Annexe 02.e: Résistance à la compression des essais des briques avec 20% des sédiments.

	Numéros des Prismes	Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression moyenne (MPa)
		1	2	
Série 05 à 20% d'ajouts	2	1	1,70	2,52
		2	3,24	
	3	1	1,60	
		2	2,34	
	5	1	3,19	
		2	3,03	

Annexe 02.f : Résistance à la compression des essais des briques avec 100% des sédiments.

	Numéros des Prismes	Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression moyenne (MPa)
		1	2	
Série 06 à 100% d'ajouts	4	1	158	204
		2	192	
	6	1	240	
		2	204	
	7	1	233	
		2	196	

Annexe

Annexe 03.a : Le retrait volumique des essais des briques de l'argile.

Jours	Volume du prisme 01	Volume du prisme 02	Volume du prisme 03	Volume du prisme 04
1	0	0	0	0
2	7,91	4,33	4,33	6,54
3	14,82	9,60	12,39	12,40
4	16,33	10,75	14,60	14,21
5	16,44	11,05	14,88	14,21
6	18,69	13,26	17,10	15,34
7	18,69	13,26	17,10	15,34
8	18,69	13,26	17,10	15,34
9	18,69	13,26	17,10	15,34
10	18,69	13,26	17,10	15,34

Annexe 03.b : Le retrait volumique des essais des briques avec 5% des sédiments.

Jours	Prisme 01	Prisme 02	Prisme 03	Prisme 04
1	0	0	0	0
2	1,25	3,94	2,29	3,64
3	14,77	18,20	16,22	17,49
4	16,61	18,96	16,61	18,26
5	17,11	19,40	16,66	18,26
6	17,16	20,05	16,88	18,70
7	17,38	20,05	17,55	19,57
8	17,38	20,05	17,55	19,57
9	17,38	20,05	17,55	19,57
10	17,38	20,05	17,55	19,57

Annexe 03.c : Le retrait volumique des essais des briques avec 10% des sédiments.

Jours	Prisme 01	Prisme 02	Prisme 03	Prisme 04
1	0	0	0	0
2	10,08	9,47	12,84	12,40
3	16,51	14,68	14,45	16,00
4	16,84	16,83	16,22	16,33
5	16,84	15,63	17,38	16,33
6	17,06	15,96	18,04	16,33
7	17,06	15,96	18,26	16,56
8	17,06	15,96	18,26	16,56
9	17,06	15,96	18,26	16,56
10	17,06	15,96	18,26	16,56

Annexe

Annexe 03.d : Le retrait volumique des essais des briques avec 15% des sédiments.

Jours	Prisme 01	Prisme 02	Prisme 03	Prisme 04
1	0	0	0	0
2	14,61	14,32	7,49	4,13
3	19,24	16,44	13,83	13,08
4	19,46	16,88	14,95	13,53
5	19,46	17,32	15,23	14,10
6	19,67	17,76	15,29	14,10
7	19,67	17,76	14,95	14,10
8	19,67	17,76	14,95	14,10
9	19,67	17,76	14,95	14,10
10	19,67	17,76	14,95	14,10

Annexe 03.e : Le retrait volumique des essais des briques avec 20% des sédiments.

Jours	Prisme 01	Prisme 02	Prisme 03	Prisme 04
1	0	0	0	0
2	7,50	4,19	6,26	3,40
3	16,17	11,07	14,17	12,56
4	17,56	15,56	17,74	15,05
5	17,67	17,22	17,90	15,94
6	17,88	16,67	17,90	15,94
7	17,88	16,33	17,90	15,94
8	17,88	16,33	17,90	15,94
9	17,88	16,33	17,90	15,94
10	17,88	16,33	17,90	15,94

Annexe 03.f : Le retrait volumique des essais des briques avec 100% des sédiments.

Jours	Prisme 01	Prisme 02	Prisme 03	Prisme 04
1	0	0	0	0
2	6,55	7,09	8,28	9,96
3	17,76	16,72	17,21	19,02
4	17,76	17,49	19,85	19,02
5	17,98	17,60	20,07	19,94
6	19,29	18,48	20,50	19,94
7	19,29	18,48	20,50	19,94
8	19,29	18,48	20,50	19,94
9	19,29	18,48	20,50	19,94
10	19,29	18,48	20,50	19,94

Résumé :

Cette étude porte sur la détermination des propriétés physico-chimiques des briques en argile, dont on a ajouté différents taux de sédiments de dragage. Les masses volumiques apparentes, les plasticités et les propriétés mécaniques ont été étudiés.

L'ajout des sédiments de dragage pour la confection des briques et leurs caractérisations physico-chimiques montre que les briques à 20% d'ajouts sont avérées très efficaces. En conséquent les sédiments de dragage peuvent être utilisés en tant substitution d'argile pour la fabrication des briques.

Mots clés : Argile, Sédiments de dragage, Briques, Caractéristiques, Propriétés mécaniques.

Abstract:

This study has provided us with an interesting opportunity to study and determine the physicochemical properties of clay bricks, to which dredged sediments have been added to different composition (5%, 10%, 15%, 20%, 100%), Compared to that of clay bricks. Bulk density, plasticity and mechanical properties were studied. All bricks are baked at 950 ° C.

The addition of dredged sediments for brick making and their physicochemical characterization shows that bricks with 20% additions are very effective. Consequently, dredged sediments can be used as an addition to the bricks.

Keywords:

Clay, dredged sediments, bricks, characteristics, properties.

ملخص

هذه الدراسة فرصة مثيرة لدراسة وتحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للطوب الطيني، مع اضافة الرواسب المجروفة بنسب مختلفة، (5%، 10%، 15%، 20%، 100%) و مقارنتهم مع نظيراتهم من طوب الطين، حيث تمت دراسة الكثافة الظاهرية، اللدونة و الخواص الميكانيكية. تم طهي كل الطوب في 950 درجة حرارة مئوية.

إضافة الرواسب المجروفة لصنع الطوب مع خصائصها الفيزيائية و الكيميائية ، اثبتت ان الطوب مع 20% من الاضافات فعالة جدا. ونتيجة لذلك الرواسب المجروفة يمكن استخدامها كإضافات لصناعة الطوب.

الكلمات المفتاحية

الطين، الرواسب المجروفة، الطوب، المواصفات، الخصائص.

Résumé

Résumé :

Cette étude porte sur la détermination des propriétés physico-chimiques des briques en argile, dont on a ajouté différents taux de sédiments de dragage. Les masses volumiques apparentes, les plasticités et les propriétés mécaniques ont été étudiés.

L'ajout des sédiments de dragage pour la confection des briques et leurs caractérisations physico-chimiques montre que les briques à 20% d'ajouts sont avérées très efficaces. En conséquent les sédiments de dragage peuvent être utilisés en tant substitution d'argile pour la fabrication des briques.

Mots clés : Argile, Sédiments de dragage, Briques, Caractéristiques, Propriétés mécaniques.

Abstract:

This study deals with the determination of the physical and chemical properties of clay bricks, to which different sediment dredging rates have been added. Apparent densities, plasticities and mechanical properties were studied.

The addition of dredged sediments for brick making and their physico-chemical characterization shows that bricks with 20% additions are very effective. Consequently, dredged sediments can be used as substitutes for clay for the manufacture of bricks.

Keywords: Clay, Dredged sediments, Bricks, Characteristics, Mechanical properties.

ملخص

هذه الدراسة تحدد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للطوب الطيني الذي أضيفت إليه معدلات تجريف مختلفة للرسوبيات. تمت دراسة الكثافات الظاهرية، اللدائن والخصائص الميكانيكية

إضافة الرواسب المجففة لصنع الطوب وتوصيفها الفيزيائي والكيميائي تبين أن الطوب مع إضافات 20% هي فعالة جدا. وبالتالي، يمكن استخدام الرواسب المجففة كبديل للصناعة الطوب

كلمات المفتاحية: الطين، الرواسب الجرف، الطوب، الخصائص، الخواص الميكانيكية