



École doctorale n°417

Unité de recherche : Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil

# Thèse de doctorat

Présentée en vue de l'obtention du grade de docteur

de

CY Cergy Paris Université

Spécialité : Génie Civil

par

**Mohamedou BRAHIM**

**VALORISATION DE SÉDIMENTS DE DRAGAGE DANS LA  
FABRICATION DE BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE  
STABILISÉE PAR DES LIANTS GÉOPOLYMÈRES**

Présentée et soutenue publiquement le 05/12/2022

Devant le jury composé de :

Salima	AGGOUN	Pr., CY Cergy paris Université	Directrice de thèse
Khadim	NDIAYE	MCF., CY Cergy paris Université	Encadrant
Mahdia	HATTAB	Pr., Université de Lorraine	Président
Mahfoud	BENZERZOUR	Pr., IMT Nord Europe	Rapporteur
Stéphane	GINESTET	Pr., UPS - INSA Toulouse	Rapporteur
Walid	MAHERZI	MCF., IMT Nord Europe	Invité

---

## **REMERCIEMENTS**

---

Je souhaite remercier ici tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail.

Mes premiers remerciements s'adressent à ma directrice de thèse Mme Salima AGGOUN, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire, pour son soutien et la confiance qu'elle m'a témoignée pour la réalisation de ce travail de thèse. Je suis très reconnaissant.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Mr Khadim NDIAYE, pour son soutien continu, ses précieux conseils, sa contribution. Je vous dis grand merci.

Je remercie particulièrement les membres de jury de thèse qui m'ont fait l'honneur d'évaluer mon travail et pour leurs collaborations scientifiques. Merci donc, à Professeur Mahfoud BENZERZOUR et Professeur Stéphane GINESTET d'avoir été les rapporteurs de cette thèse. Merci également à Docteur Walid MAHERZI d'avoir accepté de participer à ma soutenance en tant qu'invité. Et bien évidemment, je remercie Professeure Mahdia HATTAB qui a présidé la soutenance de ma thèse.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues du L2MGC, qui ont contribué, directement ou indirectement, à mon travail, en apportant aides, conseils et bonne humeur. Parmi ceux-ci, je remercie particulièrement Emmanuel ELAT.

Je remercie également l'équipe technique pour leur disponibilité et leur appui technique de tous les jours.

Je remercie également les collègues doctorants du L2MGC et je leur souhaite bonne chance.

Enfin, je ne saurais trouver les mots pour dire merci et exprimer à quel point je suis reconnaissant du soutien inconditionnel de ma famille. Un immense merci à vous tous, et particulièrement à mon frère El-hacen BRAHIM, pour le soutien affectif et moral dont j'avais besoin.

Merci à tous

---

## ***RESUME***

---

Cette étude vise à évaluer la valorisation des sédiments de dragage dans la fabrication de briques de terre comprimée (BTC). Les BTC ont été stabilisées avec des cendres volantes activées par une solution d'hydroxyde de sodium. La stabilisation a été réalisée par substitution partielle des sédiments par des cendres volantes activées avec six pourcentages différents : 0, 10, 20, 30, 40, 50% des sédiments. Les résultats montrent que l'augmentation de la teneur en cendres volantes améliore significativement la résistance mécanique des briques avec une résistance à la compression à sec allant de 2,47 MPa à 11 MPa et une résistance à la compression humide variant de 0,95 MPa à 6,9 MPa. Toutes les BTC stabilisées sont également résistantes à l'eau avec un coefficient d'absorption par capillarité compris entre 8,36 et 21,18 g/cm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>. Les performances mécaniques sont liées à la formation de gels géopolymères, qui assurent la liaison entre les grains de sédiments et rendent la BTC plus compacte et plus résistante. Le dosage optimal de cendres volantes pour remplacer les sédiments se situe entre 20 et 30%. Dans cette gamme de substitution, la performance mécanique, les propriétés physiques et la durabilité se sont améliorées de manière significative.

**Mots-clefs** Sédiments, Valorisation, Briques de terre comprimée, Cendres volantes.

---

## ***ABSTRACT***

---

The valorization of dredged sediments is a promising solution to reduce the strain on natural resources, which is in line with sustainable development goals. This study aims to evaluate the potential valorization of dredged sediment in manufacturing compressed earth blocks (BTCs). The BTCs were stabilized by a combination of fly ash (FA) with sodium hydroxide (NaOH). The stabilization was achieved by partial substitution of sediment for fly ash with six different percentages 10, 20, 30, 40, and 50% by weight. The BTCs samples were characterized in terms of structural, microstructural, mechanical, and thermal properties. The results showed that increasing FA content significantly improves the mechanical strength of BTCs, dry compressive strength ranges from 2.47 MPa to 11 MPa, whereas wet compressive strength ranges from 0.95 MPa to 6.9 MPa. The mechanical performance is related to the amount of alkali-activated fly ash gels, which bind the sediment grains and makes the BTCs more compact and resistant. The optimal dosage of alkali-activated fly ash to replace the sediment was between 20 and 30%. In this substitution range, physical properties, mechanical performance and durability improved significantly. In addition, the thermal properties varied slightly with alkali-activated FA content.

**Keywords:** Dredged sediments, Valorization, Compressed earth blocks, fly ash.

---

## *Listes des figures*

---

Figure 1. 1.Opération de dragage de sédiments (baie de Seine 2016)[38].....	6
Figure 1. 2.Modes de transport des particules dans un courant d'eau [15]. .....	7
Figure 1. 3.Représentation schématique des différentes fractions de sédiment [42].....	8
Figure 1. 4. Diagramme de classification des sédiments [42].....	10
Figure 1. 5.Proportions des sédiments dragués par les différents gestionnaires [51]. ....	11
Figure 1. 6.Techniques de dragage utilisées dans les ports français en 2017 [51]. .....	12
Figure 1. 7.Principaux éléments métalliques présents dans les sédiments .....	14
Figure 1. 8.Blocs en béton à base de sédiments [63] .....	20
Figure 1. 9.Brique de terre – © AM-Batiactu .....	21
Figure 1. 10.Cinva Ram, la première presse pour blocs de terre comprimée[20] .....	21
Figure 1. 11.Différents produits de briques de terre comprimée[32].....	22
Figure 1. 12. Exmples de construction en BTC[78] .....	26
Figure 1. 13.diagramme de granularité des sols [21].....	27
Figure 1. 14.Diagramme de plasticité des sols[21] .....	28
Figure 1. 15.Principaux facteurs influençant la géopolymérisation.....	31
Figure 1. 16.Géopolymère poly (sialate-siloxo) résultant d'une géosynthèse[93].....	33
Figure 2. 1.SITE DE PRELEVEMENT DE SEDIMENT MEL.....	42
Figure 2. 2. L'état de sédiment MEL à l'arrivée au laboratoire L2MGC .....	42
Figure 2. 3. Cendres volantes de classe F .....	43
Figure 2. 4. Hydroxyde de sodium extra pur de Acros Organics.....	44
Figure 2. 5. Pycnomètre à hélium e type Accupyc 1330 (Microméritics).....	45
Figure 2. 6. Principe de l'analyse granulométrique par diffraction laser [124].....	46
Figure 2. 7.Granulométrie laser (Analyse par diffraction laser) COULTER.....	46
Figure 2. 8.Coupelle de Casagrande .....	47
Figure 2. 9. Spectromètre de fluorescence X BRUKER S4.....	49
Figure 2. 10.Phénomène de diffraction selon la loi de Bragg.....	50
Figure 2. 11.diffraction de rayons X BRUKER AXS D8 ADVANCE.....	50
Figure 2. 12.Spectroscopie Infrarouge BRUKER Tensor 27.....	51
Figure 2. 13.microscopie électronique à balayage (MEB) ZEISS GeminiSEM 300 .....	52
Figure 2. 14. Lixiviation à l'eau : Agitateur .....	53
Figure 2. 15.Analyse ICP-OES.....	53
Figure 2. 16.Préparation des échantillons .....	54

Figure 2. 17. Préparation des éprouvettes au test de compression : (A) Echantillons BTC ,(B) Presse INSTRON,(D) Immersion dans l'eau pendant 2h.....	56
Figure 2. 18.Saturation à l'éthanol.....	57
Figure 2. 19.Dispositif de détermination de la capillarité des échantillons de BTC.....	59
Figure 2. 20. Détermination de l'VP .....	60
Figure 2. 21.Mesure des propriétés thermiques des échantillons de BTC.....	61
Figure 2. 22.Diagramme de la piste cyclable Humidification/séchage .....	62
Figure 2. 23.Déformomètre pour la mesure des variations de longueur .....	63
Figure 3. 1.Perte au feu de sédiment.....	67
Figure 3. 2.Distribution de la taille des sédiments .....	69
Figure 3. 3.Diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture[140]. .....	69
Figure 3. 4.Limites d'Atterberg de sédiment et plage de recommandations. ....	70
Figure 3. 5.Distribution de la taille des mélanges sédiments et cendres volantes.....	72
Figure 3. 6.Limites d'Atterberg du mélange et plage de recommandations.....	72
Figure 3. 7.localisation des sédiments étudiés dans le diagramme CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (adapté par Nonat et al [145]).....	74
Figure 3. 8.Analyse SEM-EDS avec balayage de surface du sédiment.....	74
Figure 3. 9.Phases cristallines de sédiment de MEL .....	75
Figure 3. 10.Image MEB des cendres volantes.....	77
Figure 3. 11.Distribution de la taille des cendres volantes .....	78
Figure 3. 12.Teneur en eau optimale des mélanges secs. ....	79
Figure 3. 13.Confection des échantillons.....	81
Figure 4. 1.images meb des BTC .....	85
Figure 4. 2.Spectres FTIR des sédiment,cendres volantes et des différents BTC.....	86
Figure 4. 3.Diffractionogrammes des rayons X de BTC.....	87
Figure 4. 4.La porosité et la densité apparente des échantillons de BTC en fonction de la teneur en cendres volantes.....	88
Figure 4. 5.Coefficient d'absorption d'eau par capillarité de différents BTC .....	89
Figure 4. 6.Coefficient d'absorption d'eau par capillarité en fonction de la porosité .....	90
Figure 4. 7.La vitesse de propagation des ondes des BTC. ....	91
Figure 4. 8.Relation entre la porosité et la VP .....	91
Figure 4. 9.Relation entre la densité et la VP .....	92

Figure 4. 10.Résistance à la compression à l'état sec et à l'état humide du BTC après 28 jours.....	93
Figure 4. 11.Résistance à la traction du BTC.....	94
Figure 4. 12.Relation entre la résistance à la compression et la densité. ....	95
Figure 4. 13.Relation entre la résistance à la compression et la VP. ....	95
Figure 4. 14.Relation entre la résistance à la traction et la VP .....	96
Figure 4. 15.Evolution de la conductivité thermique avec les propriétés physiques .....	97
Figure 4. 16.Rélation entre la conductivité thermique et la densité des BTC.....	98
Figure 4. 17.Conductivité thermique et Chaleur spécifique. ....	98
Figure 5 1.histogramme des concentrations des differents lixiviats .....	102
Figure 5 2.Sensibilité du BTC à l'eau (immersion pendant 24 heures).....	103
Figure 5 3.Résistance à la compression après les cycles.....	104
Figure 5 4.Evolution de la perte de masses lors des cycles séchage moilliage.....	105
Figure 5 5.Retrait de séchage des BTC .....	106
Figure 5 6.Suivi de masse des BTC.....	107

---

## *Listes des tableaux*

---

Tableau 1. 1.Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les métaux (mg/kg de MS) [60].....	17
Tableau 1. 2.Valeurs guides des niveaux de polychlorobiphényles (mg/kg) [60].....	17
Tableau 1. 3.Teneurs limites admissibles d avant épandage[60].....	18
Tableau 1. 4.Synthèse bibliographique sur les BTC stabilisées au ciment.....	38
Tableau 2. 1.Composition des conceptions de mélange de la BTC.....	55
Tableau 2. 2. Catégories de blocs pleins de terre crue stabilisée [17].....	56
Tableau 3. 1.Mesure de la teneur en eau de sédiment.....	67
Tableau 3. 2.Synthèse des caractéristiques physiques de sédiment.....	71
Tableau 3. 3.Composition chimique de sédiment.....	73
Tableau 3. 4.comportement à la lixiviation de sédiment MEL.....	76
Tableau 3. 5.Composition chimique de cendres volantes.....	78
Tableau 3. 6. Composition des mélanges .....	82
Tableau 5. 1.Résultats d'analyse des lixiviats des briques.....	101

---

## **TABLE DES MATIERES**

---

REMERCIEMENTS .....	II
RESUME.....	III
ABSTRACT .....	IV
LISTES DES FIGURES .....	V
LISTES DES TABLEAUX.....	VIII
TABLE DES MATIERES.....	IX
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
1.1 Les sédiments de dragage .....	5
1.1.1 Nature et Origine .....	6
1.1.2 Composition .....	7
1.1.3 Dragage.....	10
1.1.4 Polluants existants dans les sédiments.....	12
1.1.5 Règlementation relative au dragage et aux matériaux dragués.....	15
1.1.6 Valorisation des sédiments .....	19
1.2 Briques de terre comprimée (BTC) .....	21
1.2.1 Technique de production .....	22
1.2.2 Avantage des BTC.....	23
1.2.3 Inconvénients des BTC.....	25
1.2.4 Construction moderne en BTC.....	25
1.2.5 Critère de choix et matière première de base pour BTC.....	27
1.2.6 Stabilisation des BTC .....	28
1.2.7 Propriétés des BTC .....	35
1.3 Bilan et orientation des travaux de recherche .....	40
CHAPITRE 2. MATIERES PREMIERES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES .....	42
2.1 Matières premières.....	42
2.1.1 Sédiment de dragage.....	42
2.1.2 Cendres volantes .....	43
2.1.3 Activateur alcalin : NaOH .....	43
2.2 Méthodes de caractérisation des matières premières .....	44
2.2.1 Propriétés géotechniques .....	44
2.2.2 Propriétés physico-chimiques.....	48

2.2.3	Caractérisation environnementale.....	52
2.3	Protocole de production des échantillons BTC.....	53
2.4	Méthodes de caractérisation des échantillons BTC.....	55
2.4.1	Propriétés mécaniques.....	55
2.4.2	Propriétés physiques .....	57
2.4.3	Propriétés thermiques .....	60
2.4.4	Durabilité.....	61
2.5	Conclusion .....	64
CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET FORMULATION DES MELANGES		
.....		66
3.1	Caractérisation de sédiments .....	66
3.1.1	Caractérisation géotechnique.....	66
3.1.2	Caractérisation physico-chimique .....	73
3.1.3	Caractérisation environnementale.....	75
3.2	Caractérisation des cendres volantes.....	77
3.3	Processus de stabilisation.....	78
3.3.1	Teneur en eau optimale .....	78
3.3.2	Stabilisation chimique .....	79
3.4	Préparation de BTC.....	80
3.5	Conclusions.....	82
CHAPITRE 4 : CARACTERISATION DES BLOCS DE TERRE COMPRIMEE.....		84
4.1	Propriétés microstructurales.....	84
4.1.1	Observation des images MEB .....	84
4.1.2	Analyse par spectrométrie infrarouge .....	86
4.1.3	Diffractogramme des rayons x des échantillons BTC.....	86
4.2	Propriétés physiques .....	87
4.2.1	Porosité et densité .....	87
4.2.2	Coefficient d'absorption capillaire.....	88
4.2.3	Vitesse des ondes ultrasonores.....	90
4.3	Propriétés mécaniques.....	92
4.3.1	Résistance à la compression à l'état sec et humide.....	92
4.3.2	Résistance à la traction .....	93
4.3.3	Relations entre les propriétés mécaniques et physiques .....	94
4.4	Propriétés thermiques.....	96

4.5	Conclusion .....	99
CHAPITRE 5: DURABILITE .....		101
5.1	Impact environnemental .....	101
5.2	Tenue à l'eau.....	102
5.3	Cycles séchage-mouillage .....	103
5.4	Retrait séchage .....	105
5.5	Conclusion .....	108
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....		109
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		111
ANNEXES .....		123

---

## ***INTRODUCTION GENERALE***

---

Chaque année, une énorme quantité de sédiments est draguée pour maintenir une profondeur suffisante pour une navigation sûre dans les ports et les voies navigables. En France, environ 50 millions de m<sup>3</sup> de sédiments sont dragués chaque année, alors que ce volume est de 300 millions pour l'ensemble de l'Europe [1], [2]. Ces sédiments de dragage doivent faire l'objet d'une gestion adéquate, par immersion en mer ou mise en décharge conformément aux réglementations en vigueur. Les réglementations nationales locales et internationales évoluent progressivement vers des conditions plus strictes d'élimination des terres et de mise en décharge (voir le protocole international de 1996 à la convention de Londres et la directive 91/271/CEE du Conseil de l'UE du 21 mars 1991) [3], [4].

Afin de préserver les ressources naturelles et au regard de l'augmentation des lois environnementales, aujourd'hui dans de nombreux pays, plusieurs initiatives émergent dans les domaines des éco-matériaux et du génie civil, les sédiments de dragage sont de plus en plus considérés comme une ressource de matériaux de construction et une solution adéquate pour le développement durable [5]. Mais une quantité limitée de sédiments de dragage est actuellement recyclée et réutilisée [6]–[8]. Cependant, ces sédiments sont très hétérogènes : la provenance et le moment du dragage au cours de l'année ont une influence cruciale sur leur composition. Les sédiments sont principalement composés de particules minérales (quartz, divers silicates, carbonates, oxydes de fer et de manganèse, et sulfures), ainsi que d'un peu de matières organiques et de contaminants inorganiques [5], [8]–[10]. Les utilisations bénéfiques des sédiments de dragage dans les matériaux de construction ont été discutées dans de nombreux forums, une valorisation réussie des sédiments de dragage a été réalisée dans la production de ciment Portland [11]–[13], d'agrégats [14], ainsi que dans la production de briques [15]–[18], dans les routes [19].

A la faveur de ce contexte, le développement de matériaux de construction à base de sédiments respectueux de l'environnement et surtout adaptés au type de construction. La brique de terre comprimée s'érige comme un candidat sérieux. En effet, la brique de terre comprimée est la version moderne de l'adobe, obtenue par l'utilisation de machines permettant de produire des briques parfaitement calibrées [20]. Cependant, l'utilisation de sédiments comme constituant principal du mélange de fabrication de briques de terre comprimées, nécessite une identification de certaines caractéristiques qui doivent

répondre à des exigences spécifiques concernant la granulométrie, la plasticité, la présence organique, et la densité sèche. Les normes et recommandations existantes [21], [22], ont proposé certaines limites de propriétés permettant une sélection appropriée des matériaux à utiliser dans les BTC. Le matériau ne doit pas être trop argileux pour éviter le retrait et la fissuration qui rendent les briques vulnérables [20], [21], [23]. Néanmoins, la présence d'argile est nécessaire, car elle agit comme un liant naturel [24]. Le diamètre des grains ne doit pas dépasser 5 à 20 mm en fonction de la taille de la brique [21]. L'indice de plasticité doit être situé entre 15 et 30 [23], la densité sèche doit être comprise entre 16 et 22 kN/m<sup>3</sup>[20], [23]. Selon la norme NF XP P13-901 [21], la résistance à la compression des BTC doit être supérieure à 2 MPa. En général, les sédiments dragués ont une très faible résistance et une grande plasticité[25], [26]. De ce fait, les sédiments bruts sédiments de dragage ne peuvent pas être utilisés directement comme matériaux de BTC. Les chercheurs doivent donc relever le défi de développer des méthodes efficaces, simples et économiques pour améliorer les propriétés techniques des sédiments de dragage bruts. La stabilisation chimique, qui consiste à mélanger des additifs au sol, est devenue une approche courante pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité des BTC.

De nombreux chercheurs ont utilisé des déchets naturelles et des sous-produits industriels comme stabilisateur, soit pour diminuer ou remplacer le ciment[24], [27]. Touré et al[28] ont montré que les briques de terre comprimée stabilisées avec un taux de ciment de 8% en masse ont atteint une résistance à la compression comprise entre 2,5 et 3,5 MPa. De plus, les valeurs de conductivité thermique ainsi obtenues sont comprises entre 0,66 et 0,85 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Saidi et al[29] ont étudié l'effet de la stabilisation des briques avec du ciment ou de la chaux. Il a été montré que l'augmentation du taux de liant stabilisant jusqu'à 12% augmente la conductivité thermique jusqu'à 37,79% et 22,57% pour le ciment et la chaux, respectivement, par rapport au sol non stabilisé. En revanche, l'utilisation de ciment augmente l'énergie grise des BTC, en raison de son processus de production à forte consommation énergétique. En outre, certaines études montrent que les propriétés hygrothermiques peuvent être modifiées par la stabilisation à la chaux et au ciment[29], [30].

Afin de réduire la consommation de ciment dans les matériaux de construction, les produits activés par les alcalis tels que les géopolymères apparaissent comme des liants alternatifs. Une solution alternative peut potentiellement remplacer le ciment Portland dans la fabrication de briques en terre comprimée. Les liants géopolymères sont efficaces du point de vue énergétique car ils réduisent les émissions de carbone par rapport à la

production du ciment Portland [31]. On obtient un géopolymère par la polycondensation d'aluminates et de silicates avec des activateurs alcalins donnant des liaisons polymères Si-O-Al. Il y a quelques travaux dans lesquels les BTC sont stabilisées par des liants géopolymères obtenus en activant le métakaolin par de la soude concentrée [32].

Plusieurs études ont été réalisées ces dernières années en utilisant le procédé d'activation alcaline pour stabiliser différents sédiments de dragage avec des résultats prometteurs. Des recherches récentes [19], ont montré que l'utilisation de sédiments de dragage comme matière première des blocs de terre comprimée avec %5 de verre et 10% de laitier de haut fourneau répond au critère de résistance et de tenue à l'eau suggéré par différentes normes de BTC.

La stabilisation par les cendres volantes activées augmente la résistance mécanique et réduire la compressibilité des sols[33]. En effet, l'ajout de cendres volantes améliore les propriétés géotechniques des sols en raison des réactions pouzzolaniques, de l'échange de cations, et par la floculation [34]. Les cendres volantes sont des résidus minéraux obtenus par la combustion du charbon dans les centrales électriques. Le taux de production des cendres volantes est supérieur au taux de recyclage. La réutilisation des cendres volantes dans des matériaux de construction telles que les briques auront des avantages économiques et environnementaux significatifs. La stabilisation des sédiments par les cendres volantes est sans aucun doute l'un des meilleurs choix.

L'objectif principal de cette étude est d'examiner la faisabilité de l'utilisation de sédiments de rivières urbaines comme matière première primaire pour produire des blocs de terre comprimée (BTC). Un programme expérimental a été mis en place pour d'identifier les proportions de mélange appropriées permettant de produire en laboratoire de briques de terre comprimée en utilisant les sédiments de dragage comme constituant principal, et un liants géopolymère à base de cendres volantes et de solution de soude (NaOH) comme stabilisateur. Les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques de toutes les matières premières (sédiments de dragage, cendres volantes) ont d'abord été déterminées au laboratoire. Ensuite, les échantillons de BTC ont été préparés en variant les teneurs en sédiments de dragage et en cendres volantes avec six teneurs massiques différentes : 0, 10, 20, 30, 40, 50% de cendres volantes. Par la suite, les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques préparées ont été étudiées, ainsi que leur durabilité comme le retrait de séchage, la tenue à leau et la stabilité thermique. Enfin, des tests de lixiviation ont également été réalisés afin d'identifier les impacts environnementaux de ces briques.

# **CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

## **CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

Dans le présent chapitre, nous proposons une synthèse bibliographique sur les deux principaux points clés de la thèse, à savoir les sédiments de dragage et les Briques de Terre Comprimée (BTC). L'objectif est d'abord de mettre la lumière sur la problématique complexe de gestion des sédiments de dragage, à laquelle se sont affrontés les responsables de la gestion des ports et les voies navigables. Nous évoquons tout d'abord les différentes méthodes et types d'opérations de dragage nécessaires pour maintenir l'activité dans les structures portuaires, et garantir leur sécurité. Puis, nous présentons les différents modes de gestion des sédiments ainsi que le cadre réglementaire régissant la gestion globale des sédiments. Enfin, nous présentons certaines filières de valorisation de sédiments qui s'inscrivent dans la logique de développement durable. Ces sédiments peuvent constituer une source de matériaux utilisables dans plusieurs domaines de construction qui connaissent une demande importante, face à la rareté des ressources terrestres naturelles, en particulier dans la fabrication de BTC. Nous établirons alors un état de l'art des différentes connaissances déjà acquises autour des blocs de terre compactée. Les différentes caractéristiques de la terre seront identifiées et présentées. Les différents aspects des performances des blocs de terre comprimée seront décrits. Les méthodes utilisées pour l'évaluation des différents paramètres liés à ces aspects seront présentées et discutées.

### **1.1 Les sédiments de dragage**

Aux termes de la directive-cadre sur les déchets 2008/98/CE du 19 novembre 2008, les sédiments de dragage sont définis comme des déchets dès lors qu'ils sont déposés à terre. Ils sont principalement le résultat de l'érosion des sols par les courants d'eau. La nature de l'environnement de dragage indique la dénomination exacte des sédiments, qui peuvent être fluviaux ou marins. Il existe également une autre définition des sédiments de dragage qui est liée à leur mode de sédimentation. Ils sont ainsi définis comme un dépôt de particules issues de la désintégration de la terre, de la précipitation de matières en suspension transportées par l'eau ou l'air[35], ou encore comme des matériaux issus de trois étapes : l'érosion, le transport et le dépôt [36]. Les sédiments sont généralement caractérisés par leurs propriétés physico-chimiques à savoir leur granulométrie, leur composition minéralogique ainsi que leur teneur en eau et en matière organique (MO). En

outre, ils contiennent différentes quantités de polluants, qui rendent parfois leur usage direct délicat pour certaines applications. C'est donc une caractérisation physico-chimique et environnementale complète qui doit être réalisée pour déterminer la filière de gestion la plus adaptée : dépôt en mer, stockage à terre, traitement, valorisation, etc. [35], [37]. La Figure 1. 1 représente une opération de dragage dans un courant d'eau.



Figure 1. 1.Opération de dragage de sédiments (baie de Seine 2016)[38].

### **1.1.1 Nature et Origine**

Les phénomènes de dépôts sédimentaires peuvent avoir plusieurs origines. Ils sont généralement liés à des paramètres climatiques, géologiques ou, plus souvent, à la puissance du courant d'eau. Ce dernier entraîne l'érosion, le transport et la sédimentation des sols et des roches. La force du courant d'eau crée à la fois une force mécanique qui altère les roches sous l'effet de la friction et une forte capacité de dissolution des éléments chimiques existant dans des matériaux du sol, alluviaux et rocheux, et matières organiques[39]. Les sédiments sont essentiellement caractérisés par : leur composition minéralogique, leur granulométrie, leur teneur en eau et la matière organique qu'ils contiennent. Ces caractéristiques peuvent fournir des informations sur la façon dont les sédiments ont été déposés et sur leur évolution après le dépôt.

La Figure 1. 2 illustre les mécanismes de sédimentation des roches sous l'effet du courant d'eau.

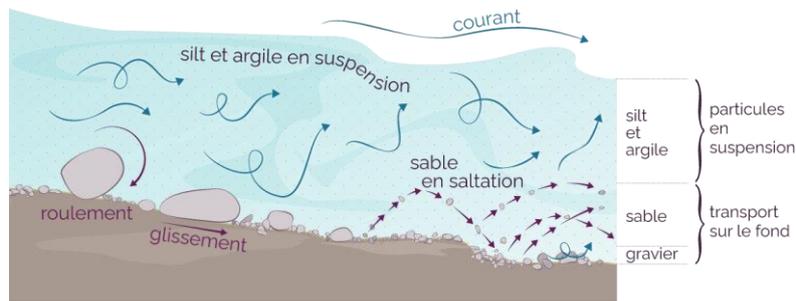


Figure 1. 2. Modes de transport des particules dans un courant d'eau [15].

Les matériaux sédimentaires se déposent au fond des océans et des rivières et les alimentent en minéraux (argiles, sables, graviers, coquillages, etc.), mais aussi en éléments chimiques dissous, des organismes vivants et des matières organiques [40]. Les sédiments ont principalement deux origines :

- Origine naturelle

Les particules peuvent être soit endogènes, soit exogènes : les particules endogènes sont composées principalement de matières organiques principalement d'organismes aquatiques issus du règne animal ou végétal. Les particules exogènes sont constituées majoritairement de particules minérales provenant de l'érosion des sols et de ruissellement. Les particules exogènes sont également de nature organique, telles que les feuilles d'arbres transportées par le vent ou l'eau [15].

- Origine anthropique

Les particules d'origine anthropique constituent des sédiments artificiels issus des activités humaines. Elles peuvent être de nature organique ou minérale (matières organiques, de nutriments ou de micro-polluants dus aux rejets agricoles, industriels et ménagers) et génèrent des polluants organiques (hydrocarbures, HAP, PCB,) et inorganiques (éléments traces métalliques).

### 1.1.2 Composition

Le sédiment est une matrice hétérogène. On distingue la fraction solide composée par des éléments de nature minérale et la matière organique[41], ces composés influent sur les caractéristiques physiques, mécaniques et environnementales du sédiment. Par ailleurs, la composition chimique des sédiments de sources naturelles est liée essentiellement à la nature des terrains et des roches altérées (roches siliceuses, argileuses, carbonatées,). Cependant, les principaux éléments chimiques sont généralement le silicium (Si), l'aluminium (Al), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le fer (Fe). Leur concentration

donne une indication sur la nature des roches d'origine. La Figure 1. 3 donne une approche constitutionnelle des sédiments de dragage.

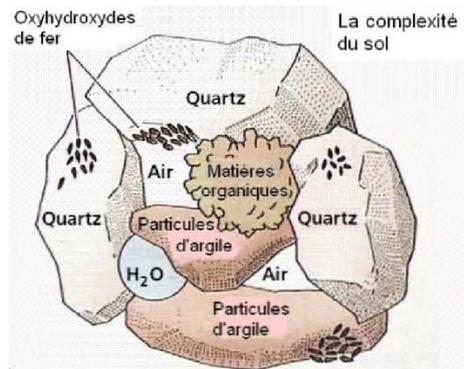


Figure 1. 3.Représentation schématique des différentes fractions constitutives d'un sédiment [42].

Le sédiment est principalement composé de :

- L'eau

Il s'agit d'une fraction très variable, qui dépend généralement de la technique de dragage. On distingue généralement l'eau libre, l'eau capillaire et l'eau pelliculaire. L'eau qui occupe les vides entre les particules solides représente une teneur variant de 100% à 300% en masse[42]. La teneur en eau dans les sédiments est calculée par rapport à la masse sèche de la matrice. L'eau peut être désignée de manière différente selon les liaisons qui se forment avec les particules. On distingue cinq types :

- ✓ Eau libre : elle correspond à la quantité d'eau qui circule librement entre les particules. On peut séparer l'eau libre des grains solides par une simple décantation ou un séchage.
- ✓ Eau capillaire : cette quantité d'eau est liée aux fines par des forces capillaires. Elle occupe les pores très fins interconnectés (quelques microns),
- ✓ Eau liée : la quantité d'eau liée ou fixée à la surface des particules fait partie de la composition chimique de ces dernières. La déshydratation est uniquement possible par des traitements thermiques supérieurs à 105°C.
- ✓ L'eau colloïdale : c'est l'eau qui forme les hydrates en réagissant avec les différents éléments présents dans le sol (eau entre les feuillets d'argile ou dans le gypse).

- Phase organique

L'origine des matières organiques dans les sédiments est très diverse, elles peuvent être composées de résidus végétaux, de colloïdes humiques ou de micro-organismes. Ces

matières organiques connaissent une décomposition continue par la biomasse microbienne (microflore : bactéries, champignons, et microfaune). La fraction organique représente dans les sédiments entre 2% et 30% de la masse de la fraction minérale.

Il faut souligner que la fraction de fraction de matières organiques est très variable selon le milieu de dragage des sédiments mais aussi selon le temps de sédimentation et la cinétique de décomposition des phases organiques. Elles sont en général regroupés en quatre classes [43]–[45] :

- ✓ Matière organique vivante (biomasse active) ;
- ✓ Matière organique fraîche (débris végétaux, organismes,) ;
- ✓ Composés végétaux en cours d'évolution ;
- ✓ Humus et composés organiques stables.

La phase organique conditionne plusieurs caractéristiques du système, dont la mobilité et la biodisponibilité des polluants, en particulier des matières organiques non ioniques [46]. D'autres paramètres sont liés au système et influencent l'équilibre chimique et la nature des interactions avec les matières organiques [47].

- ✓ Le pH du système ;
- ✓ Le potentiel redox ;
- ✓ La nature et la qualité des charges ioniques du milieu ;
- ✓ La nature des composés de la matière organique (acide humique, fluidique).
- Phase inorganique

Cette fraction est formée essentiellement de minéraux venant de la croûte terrestre et de débris de coquillages. Elle est principalement constituée d'argiles, de carbonates et de silicates[41]. Les hydroxydes de fer et de manganèse et les substances organiques qui enrobent les particules inorganiques leur apportent une grande capacité d'adsorption des contaminants. Les principaux minéraux constituant sa matrice sont :

- ✓ Cailloux, graviers et sables d'origine terrigène, résultant de l'érosion des sols dont les teneurs varient en fonction des terrains érodés ;
- ✓ Les sables riches en quartz avec la présence de phases comme les micas ou les feldspaths ;
- ✓ Les éléments fins (<63µm) qui contiennent dans leur composition des éléments minéraux argileux ;
- ✓ les argiles ( dont les trois principaux constituants : kaolinite, illite et smectite).
- Composition granulométrique

Les sédiments sont caractérisés par une fraction fine dominante dont la granulométrie, différente d'une région à l'autre, est inférieure à 80  $\mu\text{m}$ . Cette fraction conduit à un comportement complexe des sédiments [48]. On différencie les argiles dont le diamètre est inférieur à 2  $\mu\text{m}$ , les limons de 2 à 63  $\mu\text{m}$  et les sables de 63  $\mu\text{m}$  à 2 mm. Les sédiments peuvent être classés selon le pourcentage de ces trois composés en utilisant le diagramme triangulaire de classification de la texture des sédiments (La Figure 1. 4) [44].

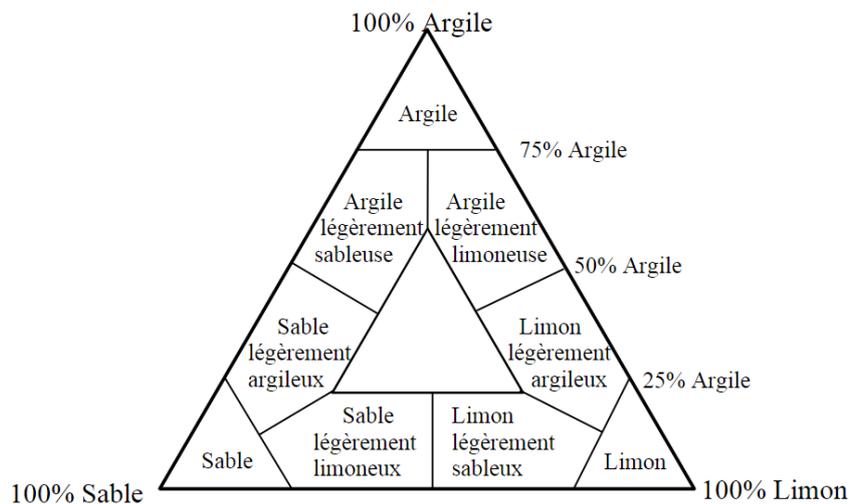


Figure 1. 4. Diagramme de classification des sédiments en fonction de leur texture[42].

### 1.1.3 Dragage

L'enlèvement des sédiments accumulés dans les ports et les voies navigables, y compris dans les retenues de barrage, est une activité indispensable pour le bon fonctionnement de ces installations. La régularité de cet entretien varie selon le contexte : annuelle pour certains chenaux d'accès portuaires, à plusieurs décennies pour certaines retenues de barrage[49]. Les techniques de dragage à mettre en œuvre pour effectuer le dragage dépendent étroitement de la situation géomorphologique de la zone du projet, et des distinctions essentielles doivent être prises en compte :

- les ports estuariens où la sédimentation est bien souvent composée de particules fines (Loire) ou d'un mélange de sable et de limon (Seine),
- les chenaux d'accès des ports maritimes où la sédimentation est à majorité sableuse,
- les bassins où la sédimentation est notamment liée à la décantation des matières en suspension contenant des particules fines. Selon une étude menée par le CEREMA entre 2006 et 2010, les sédiments dragués dans les ports représentent plus de 89% du volume total des sédiments dragués, suivis par les Voies Navigables de France (VNF) qui

représente 7% et la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) qui représente plus de 4%[50](Figure 1. 5).

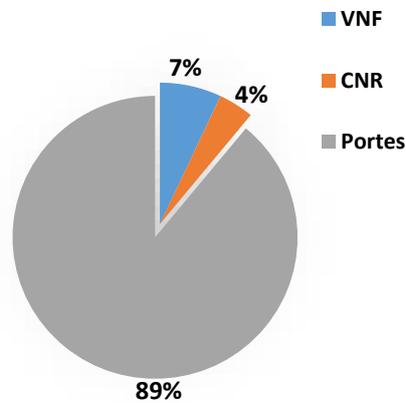


Figure 1. 5. Proportions des sédiments dragués par les différents gestionnaires de 2006 [51].

#### 1.1.3.1 Types de dragage

Selon les besoins et la nature des opérations, les dragages peuvent être classés en trois catégories : dragage d'entretien, d'approfondissement ou création de nouvelles aires portuaires (ou de déménagement). Habituellement, le dragage se fait par des moyens mécaniques, comme une benne à traction, une pelle à benne traînante ou une rétro-caveuse [42], [52].

Les techniques et les outils de dragage existants sont nombreux et déterminent la manière dont le fond marin sera remanié. Afin de définir les effets et les impacts éventuellement associés à l'enlèvement ou, plus largement, à la remobilisation des sédiments, il est nécessaire de connaître les différents processus mécaniques mis en jeu. Aujourd'hui en France, on distingue :

- Les dragages hydrauliques,
- Les dragages mécaniques,
- Les dragages hydrodynamiques.

Le dragage hydraulique est la technique majoritaire dans les grands ports maritimes que dans les autres ports, où il a représenté en 2017 une part de 77,9% des opérations (Le dragage mécanique vient en deuxième position avec 17,9%, le dragage hydrodynamique est peu pratiqué en France (Figure 1. 6).

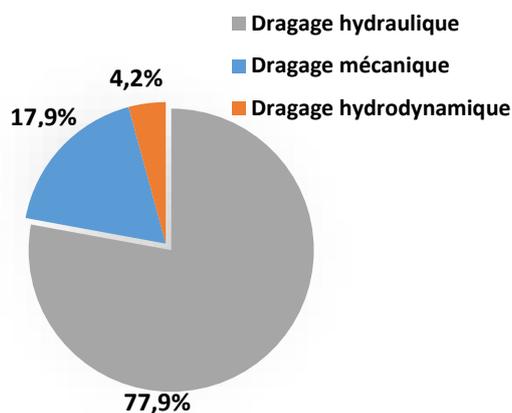


Figure 1. 6. Techniques de dragage utilisées dans les ports français en 2017 [51].

#### 1.1.4 Polluants existants dans les sédiments

La connaissance de l'impact environnemental des polluants oriente la nature de la valorisation des sédiments ainsi que les méthodes de gestion à terre ou en suspension en milieu maritime. Une étude qualitative et quantitative des polluants est indispensable dans les cahiers des charges de la valorisation des sédiments.

Les activités industrielles, agricoles et urbaines sont les principales sources de rejets de polluants dans le milieu marin et le milieu fluvial. Parmi les polluants toxiques se trouvent les matières organiques (HAP, PCB, TBT...), les métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, As, Mo...) et les charges anioniques (Cl<sup>-</sup>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F<sup>-</sup>...). La stabilisation de polluants est relative à la nature du milieu sédimentaire (nature des sols, porosité des roches...). Ces paramètres influencent les liaisons établies entre les polluants et le support de fixation comme les roches argileuses ou la biomasse. Certaines réactions peuvent conduire à des liaisons irréversibles avec une stabilisation de polluants. En revanche, d'autres peuvent conduire à des liaisons réversibles et par la suite à une libération des contaminants vers les courants d'eau sous l'effet de simples évolutions des paramètres géochimiques (pH, température...).

##### 1.1.4.1 Les polluants organiques

Les polluants organiques sont principalement formés par les composés chimiques à base de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Parmi les polluants toxiques étudiés dans les sédiments, trois grandes familles peuvent être citées : les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), les PCB (PolyChloro-Biphényles) et les TBT (Tri-Buyl-Etain).

- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés constitués au moins de deux cycles aromatiques condensés (HAP légers) et jusqu'à plus de trois cycles

(HAP lourds). L'augmentation des cycles aromatiques conduit à de nombreux isomères, ce qui donne des variations de caractéristiques physico-chimiques suivant la structure et la masse molaire des molécules. Dans les HAP se trouvent, entre autres, l'Anthracène, le Chrysène, le Corannulène, le Naphtalène et l'Ovalène. Les HAP peuvent avoir plusieurs origines. Ils peuvent provenir de voies naturelles comme les organismes vivants et les fossiles (sources pétrolières et dérivés des hydrocarbures). Des voies de synthèses sont aussi possibles par pyrolyse à haute température de composés carbonatés. La présence des HAP dans les sédiments apporte des propriétés lipophiles. Ils sont aussi à l'origine de plusieurs effets cancérigènes chez les êtres vivants [53]

- Les polychlorobiphényles (PCB)

Ce sont des composés organo-chlorés de longue chaîne et de haut poids moléculaire qui sont le produit de la chloration des biphényles pour donner des composés de formules chimiques de type  $C_{10}H_{(10-n)}Cl_n$ . Le degré de chloration conduit à des produits de caractéristiques physico-chimiques différentes (stabilisation thermique, viscosité, propriétés thermiques,). Les PCB ont été industriellement produits en France entre 1930 et 1987. L'arrêt de la production et la limitation de l'usage de ces composés fait suite à une prise de conscience de leurs effets environnementaux néfastes. Ces produits ont plusieurs congénères (environ 209) qui se distinguent par le nombre et la position d'atomes de chlorure (Cl) fixés sur le biphényle (isomères de structure) [54]. Ces composés sont utilisés dans de nombreuses applications (peintures, traitement de surface, encres) et conduisent à des propriétés physico-chimiques particulières (composés semi-volatils, hydrophobes, stabilité structurale,...)[52], [55]. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a proposé des facteurs d'équivalent toxique pour les dioxines, les PCB de type dioxine et les furanes. Ils permettent de mesurer la toxicité relative des différents congénères et donc d'évaluer les risques pour les êtres humains. Afin de prévenir l'effet de ces polluants sur l'écosystème, l'arrêté du 14 juin 2000 définit des quantités seuils de ces dérivés dans les sédiments avec deux niveaux N1 et N2.

- Les tributylétains (TBT)

Les TBT sont des composés organotanniques de formule chimique  $(n-C_4H_9)_3Sn-X$  où X est un anion ou un groupement anionique de charge unitaire. Parmi les dérivés les plus connus de TBT se trouvent l'oxyde TBT(TBTO), le benzoate de TBT (TBTB), le chlorure de TBT (TBTCl), le phosphate de TBT (TBT-P) [55]. Dans l'eau, ces composés sont faiblement associés aux matières en suspension. De plus, les cinétiques d'adsorption sur

les sédiments sont très lentes et parfois réversibles sous une faible agitation des sédiments. La durée de vie des TBT varie suivant le milieu. Dans l'eau, elle est de quelques jours à quelques semaines suivant les facteurs favorisant la dégradation de ces composés comme la photolyse ou les activités microbiologiques. En revanche, dans les phases solides, comme les TBT sont relativement stables, ils peuvent rester présents pendant plusieurs années[52], [56]. Les dérivés de TBT ont des impacts négatifs sur l'équilibre de l'écosystème (marin et fluvial) ainsi que sur la santé de l'être humain (troubles physiologiques), mais aussi sur la reproduction des espèces aquatiques. Toutefois, leur utilisation est nécessaire dans l'industrie notamment pour garantir une bonne durée de vie des bateaux en protégeant leur coque contre le développement des organismes vivants. Il y a cependant un fort risque de diffusion de ces composés vers les milieux maritimes et fluviaux [52].

- Les éléments trace métalliques

Les éléments métalliques se trouvent à l'état de traces dans les sédiments puisqu'ils entrent dans la composition de nombreuses roches. Ils sont non biodégradables avec un potentiel de mobilité et de complexation, et une durée de vie infinie. Leur origine est liée à l'activité humaine comme le stockage des déchets industriels, les activités urbaines, les pratiques agricoles, mais aussi à la pollution relative aux retombées atmosphériques. Les principaux Les éléments trace métalliques sont le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel, le sélénium ou encore l'arsenic[57]. Pour évaluer la toxicité de ces substances, il est important de déterminer la teneur totale de chaque élément, ainsi que leur forme chimique et leur comportement à la lixiviation. La Figure 1. 7 illustre les éléments traces les plus souvent rencontrés dans les sédiments.

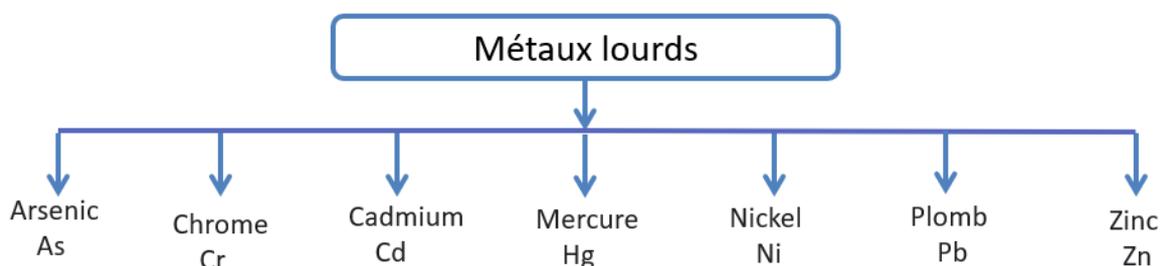


Figure 1. 7.Principaux éléments métalliques présents dans les sédiments

#### 1.1.4.2 Polluants de nature anionique

Les polluants anioniques sont des atomes ou des molécules qui forment des liaisons ioniques dans le sol hydraté. Suivant la nature physico-chimique des atomes, les polluants peuvent être monoatomiques (comme l'ion chlorure  $\text{Cl}^-$ ) ou polyatomiques (comme le nitrite ( $\text{NO}_2^-$ )). De même, suivant la nature physico-chimique des atomes, les polluants peuvent être organiques (comme  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) ou inorganiques (comme  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ). Ces composés anioniques ont une influence sur plusieurs paramètres de complexation et sur la toxicité des éléments, par exemple [58] :

- Influence sur le pH des milieux comme des bases conjugués tels que ( $(\text{CH}_3\text{COO}^-, \text{H}^+)$ ; ( $\text{Cl}^-, \text{H}^+$ ); ( $\text{SO}_4^{2-}, 2\text{H}^+$ )...). Cette évolution du pH influence aussi plusieurs phénomènes comme la mobilité des métaux de transition, la dissolution des matériaux organiques et inorganiques.
- Toxicité et forte oxydation : la forte concentration des ions dans les sols engendre de sérieux problèmes environnementaux. La combinaison entre ces anions et des matières organiques ou des organismes aquatiques conduit à une contamination et une eutrophisation du système sans oublier les déséquilibres écologiques associés [59].

#### 1.1.5 Règlementation relative au dragage et aux matériaux dragués

Les opérations de dragage et la gestion de sédiments sont soumises à un régime d'autorisation ou de déclaration (article L.214-1 à L.214-6 du code de l'environnement)[60], accordé notamment en fonction de critères de décision établis sur la base des niveaux de contamination des sédiments. Ces critères sont proposés en premier lieu par le Groupe d'Étude et d'Observation sur le dragage et l'Environnement (GEODE), sur la base de travaux scientifiques, de données françaises ou internationales, pour différentes classes de contaminants[4]. Ils sont fixés en fonction des niveaux de présence des contaminants dans les sédiments ou en fonction d'une estimation de leur fraction biodisponible, ou encore en fonction de concentrations spécifiques. Ces normes deviennent ensuite des outils de gestion et de prise de décision, servent dans les démarches d'instruction des autorisations de dragage et de rejets en mer. Cette partie consiste à citer certaines dispositions (nationales et internationales) relatives aux sédiments de dragage.

#### 1.1.5.1 Règlements internationaux

##### ✓ Convention OSPAR

La Convention OSPAR (OSPAR venant de « Oslo-Paris ») est la Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est. Entrée en vigueur le 25 mars 1998, elle remplace les conventions d'Oslo (1972) et de Paris (1978).

##### ✓ Convention de Londres

Entrée en vigueur le 30 août 1975, la Convention de Londres est la convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets (Convention de Londres, 1972). Elle n'est pas applicable lorsque des vies humaines ou la sécurité des navires sont en jeu. Cette convention ne tient pas non plus compte du stockage de matières dans un autre but que l'élimination.

##### ✓ Convention de Barcelone

La convention de Barcelone adoptée le 16 février 1976 (puis amendée le 10 juin 1995) s'intéresse essentiellement à la protection de la mer méditerranée. Les principes décrits dans cette convention permettent d'évaluer la pollution et de lier le développement socio-économique avec la qualité de l'environnement. L'objectif essentiel est de favoriser des projets durables et de protéger l'environnement de la méditerranée.

Les règlements internationaux sont spécifiques à chaque pays. Dans l'ensemble, les différentes opérations de dragage, d'utilisation ou de stockage des sédiments se font notamment en accord avec des seuils de polluants et des effets évalués en fonction de l'usage.

#### 1.1.5.2 Règlements nationaux

##### ✓ Réglementation française

La valorisation des sédiments en France est de plus en plus encadrée par la législation et des arrêtés ministériels. Les seuils de polluants et la validation des méthodes d'analyses restent les principaux sujets de chaque évolution réglementaire.

La réglementation française en termes de gestion de l'immersion des matériaux de dragage a d'abord été définie par l'arrêté du 14 juin 2000 puis renforcée par d'autres arrêtés. La teneur en métaux de transition lixiviables reste un facteur déterminant dans le classement des sédiments. Le Groupe d'Etudes et d'Observations sur les Dragages et l'Environnement (GEODE) a proposé des valeurs pour les seuils de niveaux N1 et N2 pour les sédiments destinés à l'immersion (Tableau 1. 1 et Tableau 1. 2).

Tableau 1. 1.Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les métaux (mg/kg de MS) [60].

Contaminant (mg/kg de MS)	Niveau N1	Niveau N2
Arsenic (As)	25	50
Cadmium (Cd)	1,2	2,4
Chrome (Cr)	90	180
Cuivre (Cu)	45	90
Mercure (Hg)	0,4	0,8
Nickel (Ni)	37	74
Plomb (Pb)	100	200
Zinc (Zn)	276	552

Tableau 1. 2.Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les congénères de polychlorobiphényles (mg/kg) [60].

Contaminant (mg/kg de MS)	Niveau N1	Niveau N2
PCB totaux	0,5	1
PCB congénère 28	0,025	0,05
PCB congénère 52	0,025	0,05
PCB congénère 101	0,05	0,1
PCB congénère 118	0,025	0,05
PCB congénère 138	0,05	0,1
PCB congénère 153	0,05	0,1
PCB congénère 180	0,025	0,0

Contrairement à l'immersion en mer des produits de dragage, les dépôts à terre de sédiments, et en particulier leur qualité physico-chimique, n'est pas encore très bien définie par la réglementation française. Dans le cadre du Grenelle de l'environnement de 2008, la Circulaire du 4 Juillet 2008 relative à la procédure pour la gestion des sédiments lors de travaux ou d'opérations impliquant des dragages ou curages maritimes et fluviaux a précisé les points suivants :

- ✓ Les notions de curage et dragage et le droit applicable aux travaux et opérations susceptibles d'impliquer un curage ou un dragage et donc une gestion de sédiments ;

- ✓ Le droit applicable aux techniques de remise en suspension et/ou d'immersion ; la possibilité de commercialiser les matériaux excédentaires et les procédures applicables ;
- ✓ Les procédures applicables lorsque les matériaux excédentaires ne sont pas commercialisables et lorsqu'une gestion à terre doit être envisagée et notamment :
  - L'état de la réflexion sur le point de partage entre le caractère dangereux ou non dangereux des sédiments
  - Les procédures applicables à la gestion à terre des sédiments qui ne sont pas caractérisés comme des déchets dangereux.

En l'absence de textes complets, il est communément admis de prendre en considération les niveaux de référence prescrits par la législation pour l'épandage des boues de stations d'épuration Tableau 1. 3.

Tableau 1. 3.Teneurs limites admissibles dans les boues de stations d'épuration avant épandage[60].

Contaminants	Valeur limite dans les boues (mg/kg MS)	Valeur limite dans les sols (mg/kg MS)
Cadmium	15	2
Chrome	1000	150
Cuivre	1000	100
Mercure	10	1
Nickel	200	50
Plomb	800	100
Zinc	3000	300
Cr +Cu+Ni+Zn	4000	-
PCB	0,8	-
Fluoranthène	5	-
Benzo(b) Fluoranthène	2,5	-
Benzo(a)pyrène	2	-

La teneur des polluants dans les sédiments influence l'utilisation ainsi que le stockage de ces matériaux. Il existe en effet des réglementations relatives au stockage, à l'immersion et à l'utilisation des déchets :

- Règlement de classification des déchets
- Règlement de stockage des déchets
- Règlement d'utilisation en techniques routières

Le grand défi dans les sédiments de dragage est la présence de polluants de différentes natures (métaux lourds, polluants anioniques et polluants organiques).

### **1.1.6 Valorisation des sédiments**

Bien que largement pratiquée, l'immersion n'est pas nécessairement la destination finale de tous les matériaux de dragage. En effet, en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et de leur niveau de contamination, les sédiments peuvent être valorisés, déposés ou confinés à terre et en mer, ou faire l'objet de traitements spécifiques de dépollution[3]. On vise par la valorisation une réduction des coûts de dragage et la satisfaction d'un besoin en matériaux. Trois types d'utilisation peuvent être envisagés : amendements pour les sols agricoles (épandage), utilisation comme matériaux de construction primaires (sable) ou élaborés (briques), remblayage pour la réalisation d'infrastructures.

#### **1.1.6.1 Valorisation des sédiments de dragage en génie civil**

Pour être valorisés dans des ouvrages de génie civil ou de travaux publics, les sédiments de dragage doivent avant tout répondre aux normes et guides techniques relatifs aux matériaux constitutifs de ces ouvrages. Parmi les voies de valorisation potentielle de ces sédiments, les filières suivantes ont été retenues :

- ✓ Terrassements routiers
- ✓ Granulats expansés pour bétons
- ✓ Production de clinker pour ciment
- ✓ Brique de terre.

Le domaine des matériaux de construction est celui où les expérimentations sont les plus nombreuses. La fabrication de béton à partir de sédiments, est une solution souvent envisagée par les gestionnaires, les Voies Navigables de France (VNF) valorise la majorité de ses sédiments dragués dans le réaménagement de carrières. Mais c'est en 2009 qu'un projet de R&D a été mis en place pour valider l'acceptation technique et environnementale des sédiments dans la filière du béton. La démarche "Sédimatériaux", qui est désormais certifiée et approuvée par les scientifiques, a permis de développer 15 procédés de valorisation, dont le béton, qui s'est également avéré être le plus convaincant. En 2018, VNF a pu obtenir des bétons sédimentés similaires aux bétons conventionnels,

présentant des performances de l'ordre de 30 MPa (Figure 1. 8). En plus, selon Semcha [61], les sédiments calcinés à environ 700°C peuvent constituer un pôle silico-alumineux en remplacement du ciment jusqu'à 30% et en substitution des pouzzolanes naturelles dans la formulation des bétons. L'élévation de la température transforme les structures argileuses stables en structures amorphes, assurant la réactivité pouzzolanique recherchée pour les substitutions envisagées. Des travaux indiquent également que les sédiments traités par le procédé Novosol® développent des qualités pouzzolaniques et peuvent, après mélange avec des liants, être utilisés comme couche de forme dans les travaux routiers[62].



Figure 1. 8. Blocs en béton à base de sédiments [63]

La valorisation de sédiments d'origines diverses dans la fabrication de briques a été expérimentée par plusieurs auteurs[15], [64]. La plupart des travaux concluent à une qualité très satisfaisante des produits fabriqués. L'Ecole Centrale de Lille, avec le soutien de Solvay, Briqueteries du Nord et Ramery, a construit un petit bâtiment prototype de 20 m<sup>2</sup> en utilisant des briques intégrant 20% de sédiments de rivière traités par le procédé NOVOSOL. Le bâtiment permettra d'analyser les capacités de la brique en situation réelle. Cette brique de 22×22×6,5 cm a des caractéristiques comparables à celles des briques standards (Figure 1. 9). Par ailleurs, dans le cadre du projet VAMORAS en Belgique, la viabilité économique de la fabrication de briques contenant (10-25 en %) de sédiments fins en substitution de l'argile brute, a pu être atteinte mais, elle reste très largement dépendante des contraintes posées par le contexte local[65]. Ces études ont montré que les sédiments à dominante argilo-limoneuse, pourraient être utilisés en tant que matière première dans la fabrication de briques. Même si les carrières d'argile disposent de matériaux en abondance, les professionnels ont voulu anticiper l'évolution du contexte législatif européen qui rend de plus en plus difficile l'ouverture ou l'extension de carrières.

Les essais en laboratoire ont donc montré des résultats encourageants, pour autant, à l'heure actuelle, par manque de financement, la réalisation d'un pilote à grande échelle, pour confirmer les conclusions de l'étude, n'a pas encore pu être engagé.



Figure 1. 9. Brique de terre – © AM-Batiactu

## 1.2 Briques de terre comprimée (BTC)

Les briques de terre comprimée sont une technologie moderne de construction en terre, car ils représentent l'évolution de l'adobe. La principale différence réside dans le procédé de compactage, basé sur une stabilisation mécanique qui contribue à l'obtention d'un bloc plus dense et plus résistant. La mise en œuvre de cette technique remonte aux années 1950 après l'invention de la presse CINVA-RAM (Figure 1. 10) utilisée dans le cadre d'un programme de recherche sur le logement rural en Colombie[20].



Figure 1. 10. Cinva Ram, la première presse pour blocs de terre comprimée[20]

La norme française XP P 13-901, 2001[21], définit les BTC comme des éléments de maçonnerie de dimensions réduites et de caractéristiques régulières, obtenues par compactage statique ou dynamique de la terre à l'état humide suivi d'un démoulage immédiat. L'utilisation de presses de toutes sortes permet également d'augmenter la productivité et de disposer d'une large gamme de produits extrêmement variés. Les blocs peuvent être ainsi compressés sous de nombreuses formes et tailles différentes. Le format le plus courant est un parallélépipède (prismatique) et ses dimensions varient en fonction de la presse utilisée. Les dimensions de bloc les plus courantes utilisées aujourd'hui sont 29,5×14×9 cm (L×l×H) avec un poids unitaire de l'ordre de 6 à 8 kg, avec la possibilité de construire des murs de 15, 30 ou 45 cm d'épaisseur [66]. La Figure 1. 11 présente quelques modèles de briques de terre comprimée.



Figure 1. 11. Différents produits de briques de terre comprimée[32].

### 1.2.1 Technique de production

La production de BTC consiste à humidifier la terre/le sol avec ou sans un stabilisateur chimique, puis à le verser dans un moule pour ensuite le comprimer à l'aide d'une presse manuelle ou motorisée. Le compactage peut se faire avec une presse à un seul vérin, ou une presse à double plaque. Il n'y a pas de valeur fixe pour l'énergie de compactage utilisée pour produire les BTC mais ils sont généralement compactés à une pression de compactage comprise entre 3MPa et 8MPa [22]. En outre, la chaîne de production du BTC se déroule principalement en cinq étapes décrites ci-après.

- Préparation de la terre : Elle est composée de trois étapes : séchage, tamisage et désagrégation permettant d'obtenir une terre sèche et homogène. Le criblage a pour but de séparer les éléments indésirables tels que les racines, les feuilles ou les grains ayant un diamètre supérieur à celui souhaité : de manière générale, seule la fraction de terre de diamètre inférieur à 15 mm est conservée. La désagrégation consiste à décomposer les agglomérats de graves liés par de l'argile,

ainsi que de concasser certains graves pour obtenir des agrégats de plus petits diamètres.

- Malaxage : Afin de rendre le mélange homogène, le malaxage s'effectue d'abord à l'état sec. Ensuite, il se fait alors à l'état humide après l'ajout d'eau dans le mélange.
- Compression : Cette étape consiste à comprimer le mélange dans un milieu confiné (moule), de façon statique ou dynamique ; la compression est suivie d'un démoulage immédiat permettant de libérer le bloc formé.
- Cure : Après le démoulage, les BTC peuvent être stockés immédiatement, mais il est important d'éviter un séchage rapide pour obtenir un meilleur gain de résistance mécanique. Cependant, il n'existe pas une méthode de cure standard et les blocs étudiés dans la littérature ne sont pas soumis au même processus de durcissement avant d'être testés. Les BTC qui n'ont pas été stabilisées chimiquement peuvent être simplement séchées comme l'adobe durant quelques jours, c'est-à-dire à l'abri du soleil et du vent. En revanche, si les BTC sont stabilisées chimiquement par un liant, le durcissement sera plus long et durant cette période deux types de phénomènes se produisent : les réactions physico-chimiques entre la terre et les additifs auront lieu ainsi que le séchage qui se traduit par l'évacuation progressive de l'humidité de fabrication par évaporation[67]. Au cours de cette période de cure, les conditions d'hygrométrie et de chaleur sont décisives et requièrent une attention particulière afin que les BTC atteignent la résistance mécanique maximale. Pour ce faire, les BTC doivent être stockées sous une bâche ou une couverture en plastique à l'air libre dans une atmosphère humide où l'humidité relative est supérieure à 70%. La durée de celle-ci est de minimum 7 jours[68]. Après cette cure humide, la bâche est enlevée pour la cure de séchage qui permet l'évaporation de l'eau. Pour des blocs stabilisés au ciment, la cure complète durera 28 jours [68], [69].

### **1.2.2 Avantage des BTC**

La terre est l'un des matériaux de construction les plus anciens et on estime que 40 % de la population mondiale vit dans des bâtiments en terre [70]. Dans les décennies de reconstruction d'après-guerre, elle a été remplacée par des matériaux modernes (par exemple, béton armé, acier) en raison des problèmes typiques de durabilité liés à la vulnérabilité à l'eau, aux phénomènes de gonflement et de retrait, à la fragilité après séchage [71]. Les constructions en terre sont ainsi devenues l'emblème de l'architecture

vernaculaire dans certains pays, ou des villages ruraux encore sous-développés. Néanmoins, populaire pour ses propriétés thermorégulatrices dans les environnements intérieurs et pour les bienfaits sur la qualité de l'air, entre autres [22], [72], la terre en tant que matériau de construction reprend aujourd'hui force et valeur dans la tentative d'allier sécurité et confort thermique aux multiples dimensions de la durabilité.

Les caractéristiques techniques de la terre comprimée en tant que matériau de construction présentent plusieurs avantages. Ceux-ci sont :

- La terre est un matériau disponible localement. Dans le cas idéal, la production est réalisée sur le site même ou dans la région voisine. Cela permet d'économiser le transport, le carburant, le temps et l'argent.
- Le BTC possède de nombreux intérêts écologiques par rapport aux matériaux de construction similaires. Les émissions de gaz à effet de serre pendant le processus de production et l'émission de carbone constituent un contraste frappant entre les BTC et les briques conventionnelles. Pour avoir une idée, les BTC émettent 22 kg de CO<sub>2</sub>/tonne alors que les blocs de béton émettent 143 kg de CO<sub>2</sub>/tonne, les briques d'argile cuites ordinaires émettent 200 kg de CO<sub>2</sub>/tonne [66]. L'utilisation de blocs de terre stabilisés au ciment peut réduire de 62% l'énergie intrinsèque par rapport à une structure à ossature en béton armé et de 45% par rapport à la maçonnerie en briques d'argile cuite et à la construction en dalles pleines de béton armé. En se référant à Turner et al. [73], l'énergie intrinsèque de la maçonnerie réalisée avec BTC est de 550-700 MJ/m<sup>3</sup>, alors qu'elle est d'environ 2200 MJ/m<sup>3</sup> dans le cas des briques d'argile cuites.
- Les BTC peuvent être utilisées pour des structures porteuses et ne doivent pas nécessairement être plâtrées. Un autre avantage du BTC est que l'équipement pour sa production est disponible en manuel ou motorisé, allant de l'échelle du village à celle de l'industrie.
- Les BTC permettent aux personnes non qualifiées et aux chômeurs d'apprendre une compétence, d'obtenir un emploi. Il crée des opportunités d'emploi.
- Le coût final varie en fonction du contexte local (matériaux, main-d'œuvre, équipement, etc.), mais dans la plupart des cas, les BTC sont moins chères que les briques cuites.

### **1.2.3 Inconvénients des BTC**

La construction traditionnelle de murs utilisant la terre comme matériau de construction directement, sous n'importe quelle forme, présente certains inconvénients :

- L'identification correcte du sol est nécessaire ou le sol n'est pas disponible.
- La méconnaissance de la nécessité de gérer les ressources.
- L'ignorance des bases de la production et de l'utilisation.
- Les grandes portées, les bâtiments hauts et longs sont difficiles à réaliser.
- Les faibles performances techniques par rapport au béton.
- Les équipes non formées produisant des produits de mauvaise qualité.
- La sur-stabilisation avec les liants par peur ou par ignorance, impliquant des prix exorbitants.
- La sous-stabilisation entraînant des produits de mauvaise qualité.
- La faible acceptation sociale due à des contre-exemples (par des personnes non qualifiées, ou de mauvais sols et équipement).
- Les problèmes de durabilité, comme la sensibilité à l'eau et l'instabilité dimensionnelle. En effet la possibilité de rétrécissement et/ou de fissuration du matériau est un autre inconvénient de la technologie BTC [74].

### **1.2.4 Construction moderne en BTC**

De nombreux bâtiments en BTC ont vu le jour ces dernières années dont certains sont remarquables. Lorsque ceux-ci sont bien conçus et bien réalisés, ils présentent un grand intérêt architectural, économique, de confort et de durabilité. L'exemple de la mosquée Al Medy (A), en Arabie Saoudite, est représentatif de ce travail d'exception. Réalisée en seulement 7 semaines, elle est basée sur le principe constructif de voûtes et coupes majestueuses. Construite sans coffrage, cette construction de 432m<sup>2</sup> en BTC comprend même un minaret de 18 mètres de hauteur. Le chantier a rassemblé plus de 75 maçons qui ont été formés sur place. Toutes les briques ont été réalisées sur place à l'aide de seulement deux presses manuelles[75].

L'aéroport de Mayotte (B) est un ouvrage en BTC né de la nécessité de rendre compte du caractère novateur, écologique et économique joué par la filière de construction en terre crue à Mayotte dès le début des années 1980. Mais aussi un moyen de justifier ses bienfaits dans le but de la relancer.

Mauricio Sanchez et Dario Angulo (C,D), architectes colombien, construisent quant à eux des habitats collectifs et individuels de haut standing en BTC, prouvant que la construction en terre n'est pas réservée à la population pauvre.

L'hôtel le djoloff au Sénégal est un projet citoyen, responsable et écologique. À l'instar de ses autres créations, ce bâtiment est extrêmement bien pensé et réalisé afin de profiter pleinement de tous les avantages de la construction en terre. Les murs sont faits en BTC afin de garantir une température intérieure stable et confortable grâce à l'inertie thermique du matériau tandis que les poutres sont en béton. Une toiture débordante permet de protéger les briques des intempéries et fournit une protection contre le soleil. Un flux d'air naturel est permis grâce à des ouvertures de ventilation dans les murs. Le tout traité d'une manière contemporaine tout en s'intégrant parfaitement dans son environnement[76]. La technique des blocs de terre comprimée est utilisée dans la construction de maisons depuis peu au Bangladesh(F). Habitat for Humanity Bangladesh achève la première maison construite avec des blocs de terre comprimée, dans le cadre d'un projet pilote visant à construire des maisons avec des blocs de terre comprimée [77].



Figure 1. 12. Exemples de construction en BTC[78]

### 1.2.5 Critère de choix et matière première de base pour BTC

La terre/le sol est le matériau de base de la BTC et il est de nature très complexe. Il est formé à partir de la transformation à long terme de la roche mère sous-jacente par l'interaction simultanée et évolutive de facteurs climatiques et d'autres processus physico-chimiques et biologiques[79]. Ceci révèle une grande variation dans ses propriétés physiques, géotechniques, chimiques et minéralogiques. Ainsi, toutes les terres ne sont pas adaptées à la technique de construction de la BTC, afin de faire le bon choix de terre, le matériau ne doit pas être trop argileux pour éviter le retrait et la fissuration qui rendent les briques vulnérables[18], [20], [21]. Néanmoins, la présence d'argile est nécessaire, car elle agit comme un liant naturel[80]. Le diamètre des grains ne doit pas dépasser 5 à 20 mm en fonction de la taille de la brique[20]. L'indice de plasticité doit être situé entre 15 et 30 [23], la densité sèche doit être comprise entre 16 et 22 kg/m<sup>3</sup>[24]. Il existe quelques recommandations décrites par la norme XP P 13-901[21], pour le choix de la terre pour BTC afin d'éviter les terres de très mauvaise qualité. Ces recommandations se penchent principalement sur la granularité et la plasticité (Figure 1. 13, Figure 1. 14).

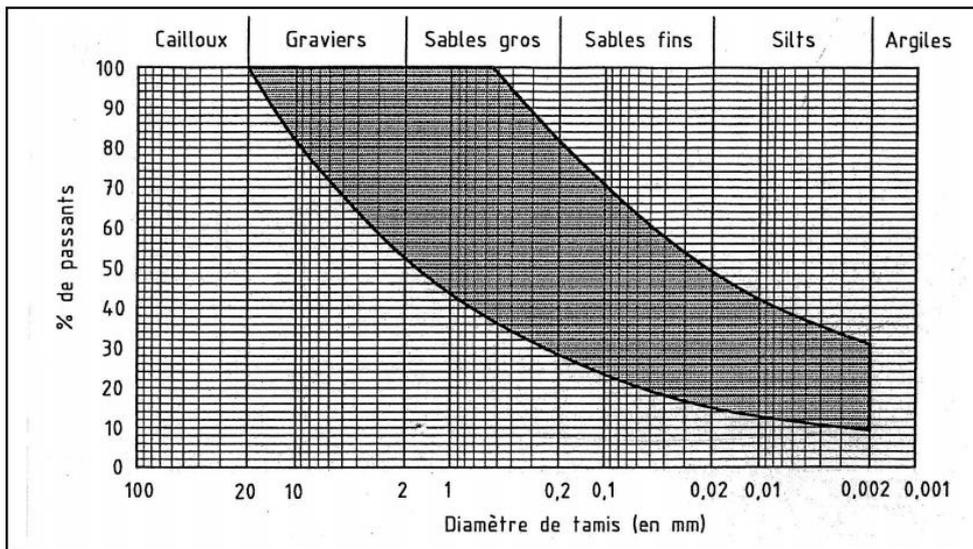


Figure 1. 13. diagramme de granularité des sols [21]

Les limites de ces deux fuseaux recommandés sont approximatives. Les terres dont la texture et la plasticité sont inscrites dans ces fuseaux donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Cependant, les terres dont la texture et la plasticité ne respectent pas ce critère de recommandation peuvent quand même donner des résultats acceptables, mais il est recommandé de les soumettre à une classification selon leur nature afin de vérifier leur convenance[81].

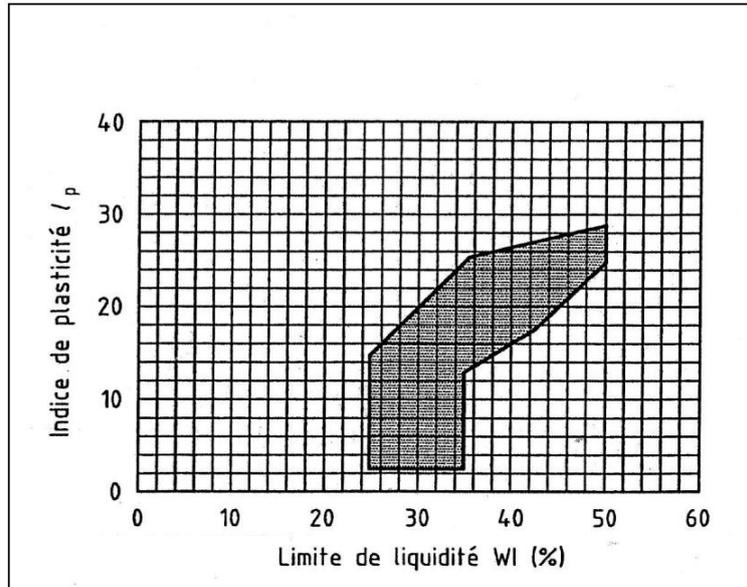


Figure 1. 14.Diagramme de plasticité des sols[21]

### 1.2.6 Stabilisation des BTC

Les inconvénients de la technologie des BTC peuvent bien sûr être corrigés par une action combinée chimique et mécanique, techniquement connue sous le nom de stabilisation du sol. Un liant supplémentaire, tel que du ciment, de la chaux ou des fibres peut être incluses pour stabiliser le mélange. De plus, des fibres locales peuvent être ajoutées pour renforcer le mélange. Un des inconvénients de l'utilisation de la terre seule comme matériau de construction est sa durabilité qui est fortement liée aux propriétés du matériau [69], [82]. Mais la plupart des sols dans leur état naturel, n'ont pas la résistance mécanique, la stabilité dimensionnelle et la durabilité requises pour la construction de bâtiments. Conformément à la norme XP P 13-901[21], tout BTC utilisé pour la construction de murs doit posséder une résistance à la compression humide et une résistance à l'érosion adéquates selon l'application visée. D'après littérature on peut distinguer trois types de stabilisation :

- Stabilisation mécanique
- Stabilisation chimique
- Stabilisation physique

### 1.2.6.1 Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique améliore la brique de terre par la modification de sa densité naturelle. Il s'agit du compactage en utilisant des presses manuelles ou mécaniques qui consiste essentiellement à réduire la porosité du matériau par resserrement des particules. L'énergie de compactage du matériau varie en fonction du type de sol, de sa teneur en eau lors du compactage et de la force de compression appliquée. Il existe quatre méthodes principales de compactage.

- Compactage statique,
- Compactage dynamique par vibration,
- Compactage par pétrissage.

Les études menées par Mesbah et al. [83] montrent que le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le sol à compacter est un mélange de sable et d'argile suivant une proportion optimale. Le compactage manuel induit des pressions de compactage allant de 0.05 à 4 MPa, ce qui est faible comparé aux presses mécaniques pouvant atteindre des pressions de plusieurs dizaines de MPa [84]. Malheureusement, l'inconvénient majeur de la stabilisation mécanique est qu'elle ne permet pas de diminuer la sensibilité à l'eau. Les briques obtenues sont donc peu durables dans les zones à forte pluviométrie. Mise au contact de l'eau, la brique de terre stabilisée mécaniquement redevient plastique et ne résiste pas à la compression [85].

### 1.2.6.2 Stabilisation chimique

Elle consiste à ajouter un matériau ou un produit chimique à la terre pour modifier ses propriétés. Il s'agit soit d'une réaction physico-chimique qui conduit à la création d'une matrice qui lie ou enrobe les particules de terre.

Les stabilisants les plus souvent utilisés sont le ciment, la chaux, mais il existe aussi d'autres stabilisants d'origine (animaux, végétaux ou sous-produits industriels) tels que la bouse de vache, les fibres de palme, le bitume et les liants géopolymères. Dans une revue bibliographique sur la stabilisation des sols réalisée par S. Deboucha et al [80], 90% des études portent sur l'utilisation de liants minéraux, dont 50% avec du ciment et le reste est répartie entre la chaux et d'autres ajouts minéraux ou un mélange de différents liants minéraux.

- Stabilisation au ciment

Le stabilisateur couramment utilisé est le ciment, dont les teneurs varient de 5 à 10 % en masse du mélange. La stabilisation de la terre par le ciment induit trois phénomènes : l'échange cationique, la floculation des argiles et les réactions hydrauliques et pouzzolanique. Ce dernier phénomène est le plus important et est responsable de l'amélioration des propriétés intrinsèques des briques par un mécanisme de liaison des particules du sol par les silicates de calcium hydratés (C-S-H). Les C-S-H sont produits d'une part au cours de l'hydratation du ciment, et, d'autre part, par la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium produit par le ciment (portlandite) et les particules argileuses du sol [86]. Le ciment crée des liens physiques entre les particules, ce qui augmente la résistance mécanique des terres et diminue leur porosité. En général, les réactions d'hydratation des ciments sont plus rapides que celle des autres liants hydrauliques. En ce qui concerne le processus de stabilisation par le ciment, de nombreux facteurs doivent être considérés. Cela nécessite une bonne homogénéisation du mélange terre-ciment et une quantité d'eau suffisante pour l'hydratation du ciment et l'humidification de la terre. Par ailleurs, vu que le ciment atteint sa résistance mécanique maximale à partir de 21-28 jours, il faudrait que les blocs restent humides et soient à l'abri de la dessiccation durant tout ce temps. Ils peuvent pour cela être couverts d'une bâche ou à défaut, subir une cure par arrosage [68]. Généralement, le ciment, considéré comme un bon stabilisant pour les sols granulaires, est dosé à 3 à 4 % par rapport à la masse de la terre sèche utilisée. Cependant, lorsque le sol est trop argileux, il faudra un taux moyen de 10 % en masse de la terre argileuse pour lier les particules entre elles [87]. En général, il peut être utilisé avec n'importe quel type de sol, mais il est peu économique mais avec de l'argile. D'après Gooding [23], les blocs de terre stabilisée avec 3 à 12 % en masse de ciment, semblent être les blocs les plus couramment produits et utilisés.

Touré et al [28] ont montré que les briques de terre comprimée stabilisées avec un taux de ciment de 8% ont atteint une résistance à la compression comprise entre 2,5 et 3,5 MPa. De plus, les valeurs de conductivité thermique ainsi obtenues sont comprises entre 0,66 et 0,85 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Saidi et al [29] ont étudié l'effet de la stabilisation des briques avec du ciment ou de la chaux. Ils ont montré que l'augmentation du taux de stabilisation jusqu'à 12% augmente la conductivité thermique jusqu'à 37,79% et 22,57% pour le ciment et la chaux, respectivement, par rapport au sol non stabilisé. En revanche, l'utilisation de ciment augmente l'énergie grise des BTC, en raison de son processus de production à forte consommation énergétique. En outre, certaines études montrent que

les propriétés hygrothermiques peuvent être modifiées par la stabilisation à la chaux et au ciment, en réduisant la capacité de régulation de température [29], [30].

- Stabilisation avec des liants alternatifs : Liants géopolymères

Le stabilisateur couramment utilisé est le ciment, dont les teneurs varient de 5 à 10 % en masse du mélange. De nombreux chercheurs ont utilisé des déchets naturels et des sous-produits industriels comme stabilisateur, soit pour diminuer ou remplacer le ciment [24], [27]. Les géopolymères sont une classe de matériaux aluminosilicatés semi-cristallins, généralement synthétisés à une température ambiante ou légèrement élevée par une réaction chimique entre une poudre d'aluminosilicate amorphe et une solution alcaline. En 1950, Glukhovsky [88] est le premier à avoir proposé l'activation des aluminosilicates par des composés alcalins. A l'heure actuelle, il existe plusieurs sortes d'activateurs comme NaOH, KOH, NaCO<sub>3</sub>, KCO<sub>3</sub>, LiCO<sub>3</sub>, ou des solutions de silicates alcalins (Me<sub>2</sub>O + nSiO<sub>2</sub> avec Me = Na, K ou Li). Les silicates alcalins sont des sels formés par la réaction entre SiO<sub>2</sub> (silice réactive) et des oxydes alcalins (Sodium (Na), Potassium (K), Lithium (Li)). Ils sont connus comme étant très réactifs et sont caractérisés par leur forte solubilité dans l'eau. C'est pour cette raison qu'ils sont appelés « verres liquides » [88]. En parallèle, plusieurs facteurs influencent la géopolymérisation. Ils sont liés à la fois à la nature des matières utilisées et aux conditions de formulation et de cure. Les principaux paramètres impactant le développement de la réaction sont les suivants :

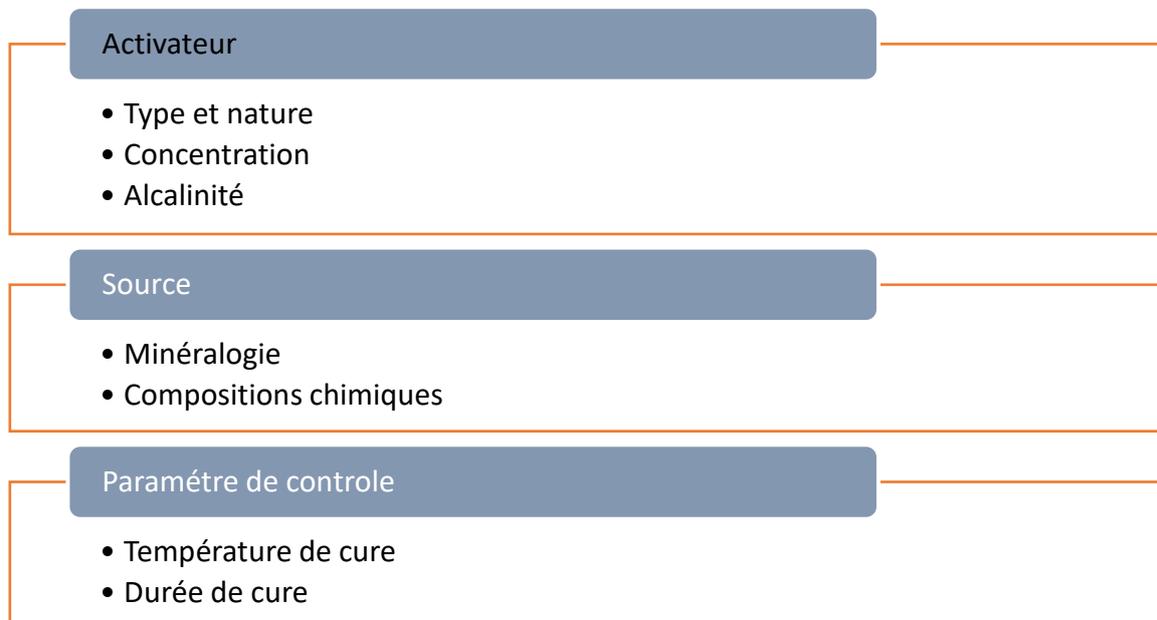


Figure 1. 15. Principaux facteurs influençant la géopolymérisation

- Elaboration de ciments géopolymères

Pour l'élaboration d'un ciment géopolymère, deux types de matières premières sont généralement utilisés:

- ✓ Des matériaux sources d'aluminosilicates : les kaolinites, les argiles, les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux et des minéraux naturels [89], sont les principaux matériaux utilisés comme sources de  $\text{Si}^{4+}$  et de  $\text{Al}^{3+}$  réactives. Leur réactivité est déterminable par des caractérisations microstructurales (DRX, RMN et FTIR).

Les pourcentages de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dans l'aluminosilicate doivent être élevés afin d'élaborer des géopolymères. Pour choisir ces matériaux, il faut se baser sur plusieurs facteurs, dont la disponibilité, le coût et le type d'application. Ces matériaux peuvent être naturels (kaolin, micas, andalousite, spinelle, illite, scories volcaniques) ou synthétiques (métakaolin, cendres volantes, sous-produits calcinés ou résidus d'exploitation industrielle) [90]. L'amorphisation de certains matériaux conduit à la formation de composés qui ont des propriétés mécaniques intéressantes par rapport à celles des produits obtenus à partir de matériaux non amorphes (argile kaolinitique et certains minéraux naturels) [91].

- ✓ Les activateurs : Les activateurs dans la géopolymérisation sont essentiellement des alcalins, des alcalino-terreux voire parfois des silicates d'alcalins (type silicate de soude). Ils sont mis en solution et permettent à la fois d'augmenter la dissolution des matériaux aluminosilicatés et d'enrichir le milieu en silicium libre (disponible et réactif).
- ✓ Structure chimique des géopolymères : Les matériaux géopolymères sont des aluminosilicates désignés sous le terme poly(sialate) et sont la réciproque inorganique des polymères organiques. Le réseau des géopolymères encore appelé réseau sialate est constitué par des tétraèdres  $\text{SiO}_4$  et  $\text{AlO}_4$  alternativement liés entre eux pour former des longues chaînes. Il est difficile de donner une structure cristallographique précise. La phase cristallographique la plus apparente et de nature amorphe est liée à la formation d'un réseau de tétraèdres formés par les  $\text{SiO}_4$  et  $\text{AlO}_4$  d'une manière quasi-arbitraire et pouvant être comparables avec des structures zéolitiques [92]. La position de l'aluminium en sites habituellement occupés par le silicium comme montré dans la Figure 1. 16 provoque un déficit de charges compensé par les cations  $\text{M}^+$  ( $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ ). De fait, la présence des cations de type alcalins est essentielle pour le maintien de la neutralité de la matrice. La

charge négative dans la structure sialate est due à la substitution de l'ion  $\text{Si}^{4+}$  (tétravalent) par l'ion  $\text{Al}^{3+}$  (trivalent).

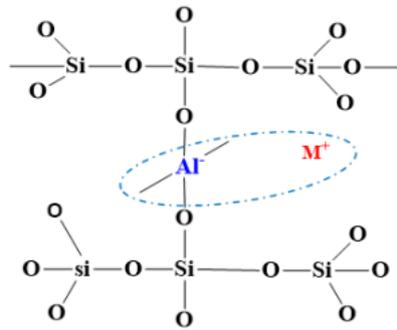


Figure 1. 16. Géopolymère poly (sialate-siloxo) résultant d'une géosynthèse [93]

La relation empirique entre les poly (sialates), les cations et la quantité d'eau dans la structure géopolymère influence la structure 3D ainsi que les propriétés du géopolymère formé [94]. Plusieurs travaux s'intéressent à l'influence de chaque paramètre sur la microstructuration ainsi que sur les propriétés de la matrice. De manière générale, le géopolymère peut être écrit sous la forme suivante :

$$\left\{ 5M_p[(\text{SiO}_2)_z \text{AlO}_2]_p; w\text{H}_2\text{O} \right\} \quad (1.1)$$

avec

p : degré de polymérisation

z : rapport molaire Si/Al pouvant être égal à 1, 2 ou 3

w : nombre de moles d'eau dans le matériau

$M^+$  : cations pour équilibrer la charge ( $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$  ou  $\text{Li}^+$ )

Parmi les facteurs qui influencent les propriétés des matrices géopolymères se trouvent les concentrations molaires des sources des alumino-silicates, l'alcanité et l'eau de gâchage. Divers travaux réalisés sur les rapports molaires de  $\text{Si}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  existent dans la littérature [93], [95] et montrent l'avantage d'une optimisation des ratios entre les éléments. Une synthèse globale des différentes études réalisées sur des matrices géopolymères encadre les rapports molaires comme ci-dessous :

$$\begin{aligned} 0,2 < M_2\text{O} / \text{SiO}_2 < 0,48 \\ 3,3 < \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 < 4,5 \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$10 < \text{H}_2\text{O} / \text{M}_2\text{O} < 25$$

$$0,8 < \text{M}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3 < 1,6$$

avec M = Na ou K ou Li

- Stabilisation des BTC par les liants géopolymères

Afin de réduire la consommation de ciment dans les matériaux de construction, les produits activés par les alcalins tels que les géopolymères, apparaissent comme des liants alternatifs potentiel pour remplacer le ciment Portland dans la fabrication de briques de terre comprimée. Les liants géopolymères sont efficaces du point de vue énergétique car ils réduisent les émissions de carbone par rapport au ciment [31].

L'objectif de ces études est de proposer de réduire la quantité de ciment ou de chaux avec une source aluminosilicate à faible empreinte carbone. Un second intérêt est de valoriser des sous-produits industriels (cendres de charbon, cendre de bagasse de canne à sucre ou poussière de fourneau de ciment). Des recherches récentes [96], ont montré que l'utilisation de sédiments de dragage comme matière première des blocs de terre comprimée combinés avec 5% de verre et 10% de laitier de haut fourneau satisfait le critère de résistance et la tenue à l'eau suggéré par différentes normes. Sore et al [32] ont réalisé une série d'expériences sur des BTC latéritiques stabilisées par un liant alcalis activé (métakaolin (MK) avec hydroxyde de sodium). Les résultats ont montré que l'ajout de MK  $\geq 20\%$  satisfait la résistance caractéristique requise de 4 MPa, et l'absorption totale d'eau et la durabilité ont été améliorées de manière significative.

#### 1.2.6.3 Stabilisation physique

La stabilisation physique consiste à intervenir sur la texture et la distribution granulométrique des terres par introduction contrôlée des fractions de grains d'autres matériaux (principalement du sable et des fibres végétales) [78]. Ce procédé modifie la structure des terres et améliore les propriétés physico-mécaniques des terres à traiter. Elle peut également se faire par cuisson sous un cycle de 12 à 48 heures à une température du four de 900 à 1200 °C. Les matériaux issus de ce traitement thermique prennent le nom de terre cuite [86].

## 1.2.7 Propriétés des BTC

### 1.2.7.1 Propriétés Physiques

- Densité apparente

La densité apparente est le rapport entre la masse sèche et le volume apparent d'un échantillon, y compris les pores pour une teneur en eau fixe ( $\gamma = m/V$ ). Les valeurs typiques de la masse volumique apparente du sol sont comprises entre 1000 et 1500 kg/m<sup>3</sup>, tandis que les valeurs typiques de la densité des sols comprimés se situent entre 1700-2000 kg/m<sup>3</sup>. En effet, le processus de compactage réduit le volume augmentant la densité. Pour obtenir un compactage maximal, la teneur en eau dans le mélange doit être aussi proche que possible de la teneur en eau optimale, obtenue par l'essai Proctor. La teneur en eau spécifique permet l'obtention de la densité sèche maximale permettant de déplacer les particules de sol dans une configuration plus dense sans trop de friction [97]. Une certaine quantité de sol sera inévitablement remplacée lors de l'introduction d'additifs dans le mélange terreux. Par conséquent, en fonction de la densité du matériau ajouté, le bloc aura une valeur de densité plus ou moins élevée. En raison de la légèreté des additifs, la densité des BTC optimisées est généralement réduite par rapport à celle des BTC traditionnels.

- Porosité

La porosité représente le volume total occupé par les vides dans la matrice. Elle peut se manifester sous deux formes différentes : la porosité ouverte, qui affecte la durabilité de la brique, et la porosité fermée, qui pourrait affecter directement les propriétés physico-mécaniques [98]. Dans les BTC, la porosité est strictement liée à la densité. Une enquête réaliste intéressante, réalisée avec la microtopographie au rayons X, sur l'altération structurale du sol compacté est fournie par l'étude de Menon et al. [99]. Elle montre une diminution de la pénétration de l'eau après compactage en raison de la réduction significative du volume total des pores et de la proportion de volume et de surface interpores. Dans l'étude de Ben Mansour et al. [100], la porosité passe de 50,23 % à 24,11 % lorsque la pression de compactage passe de 0,46 à 59,47 bars. Cependant, il a été constaté qu'il n'y a pas de différence significative entre les blocs de sol compactés à des vitesses de chargement faibles et élevées [101]. L'ajout de fibres naturelles augmente la porosité, influençant la forme et la géométrie des pores [98] sans augmenter la densité. Cependant, de nombreux auteurs recommandent de ne pas dépasser certains

seuils pouvant entraîner une présence excessive de pores. Il convient de mentionner que les seuils sont différents d'une fibre à l'autre.

A l'inverse, l'ajout de fines ou de cendres d'origine naturelle, ainsi que de ciment ou de chaux, tend à obturer les pores, les obstruant[98]. Cependant, l'augmentation de la porosité doit être liée au diamètre moyen des pores afin de contrôler l'homogénéité des produits [102]. Par conséquent, un pourcentage de porosité élevé pourrait être particulièrement défavorable s'il est associé à un diamètre de pore moyen élevé, ce qui se traduit par une BTC de mauvaise qualité et peu durable. La porosité joue un rôle crucial sur les propriétés thermique et mécanique [79].

- Absorption d'eau par capillarité

L'eau contenue dans les BTC est composée de : (a) l'eau structurelle, qui est liée chimiquement, (b) l'eau absorbée, qui est électriquement liée, (c) l'eau de capillarité, qui est absorbée par capillarité. L'eau de structure est l'eau nécessaire pour assurer la bonne préparation et hydratation des briques. Surtout en présence de ciment comme stabilisant, l'ajout de l'eau nécessaire pendant le processus de mélange est l'un des facteurs les plus importants pour produire des BTC de haute qualité.

Alors que l'eau structurelle dépend de la nature du mélange (composants du sol et autres additifs) et ne peut pas être modifiée, les deux autres composés doivent être maîtrisés. En particulier, le taux d'absorption d'eau doit rester inférieur à 20 %, ce qui est considéré comme une limite acceptable par la plupart des prescriptions standard [103]. Teixeira et al. [104] rapportent un taux d'absorption d'eau de 9,98 % et un coefficient de capillarité de 34,62g/(cm<sup>2</sup>.min), mesuré sur des BTC non stabilisées. Les travaux de recherche menés par Azhzouz et al.[105] et Mohamed et al.[106] montrent que l'ajout de 2 % de poudre de noix d'arganier (avec 5 % de ciment) dans le mélange de sol diminue le coefficient d'absorption d'eau de 16,9 % à 11,1 %. Ceci est probablement lié au caractère non absorbant de cette poudre par rapport aux autres particules végétales et à la capacité de combler les interstices entre les particules. L'introduction de 2% de sciure (avec 5% de ciment) suggérée par Mohamed et al. [66] montre approximativement les mêmes résultats : 8% de cendres de sciure et 10% de ciment, réduisent l'absorption d'eau de 9% à 7% et diminuent la porosité de 34% à 27%. De même, 6 à 8 % de cendres de sciure avec 6 à 10 % de ciment satisfont tous les critères des BTC durables.

La durabilité est liée à la la capacité d'absorption d'eau. La présence d'eau est toujours dangereuse dans la construction, pas seulement pour la durabilité. Il a été trouvé par Nshimiyimana et al. [87] que l'eau agit comme un pont pour la conduction ou la diffusion

thermique. En particulier, lorsque la teneur en eau augmente de 2%, la conductivité thermique augmente d'environ 0,06 W/mK.

Enfin, certains auteurs introduisent un certain pourcentage de sable pour atténuer le taux d'absorption d'eau excessif, en particulier avec un sol argileux, en profitant de ses propriétés de drainage. Vodounon et al.[107] ajoutent 20 % de sable au mélange de terre, tandis qu'Ajouguim et al. [108] mélangent 30 % de terre et 70 % de sable. Il a été observé que l'ajout de sable contribue également à réduire le retrait.

#### 1.2.7.2 Propriétés Mécaniques

- Résistance à la compression

Dans cette sous-section, l'influence de la stabilisation sur les performances mécaniques des BTC est présentée. La résistance à la compression est la propriété largement étudiée dans la caractérisation mécanique des BTC. Comme pour les autres éléments de maçonnerie, il s'agit d'une mesure de qualité de base pour les BTC [24], [107]. La procédure d'essai la plus recommandée consiste en un essai direct, confiné et uniaxial sur des éprouvettes individuelles.

L'introduction de poudres ou de cendres d'origine naturelle montre des résultats encourageants. Ces additifs améliorent la résistance à la compression, car certains d'entre eux se comportent de manière similaire aux liants traditionnels permettant la réaction pouzzolanique. Cependant, dans ce cas également, l'introduction d'additifs a des effets positifs jusqu'à certains seuils. Elahi et al.[109] ont constaté que la résistance à la compression des BTC optimisées avec diverses concentrations de cendres volantes et de ciment fixe augmente linéairement avec la teneur en cendres volantes. Les résultats du Tableau 1.5 montrent que le gain de résistance en compression avec l'ajout de ciment est très marqué dans l'étude de Alavéz-Ramírez et al.[110] où l'ajout de 10% de ciment permet de passer d'une résistance en compression de 0,6 à 23,5 MPa. Pour les autres études, cette augmentation est beaucoup plus faible. Par exemple dans les études de Alam et al.[111], et Dao et al.[97], les résistances passent respectivement de 1,0 MPa à 2,0 MPa avec 10% de ciment et de 2,2 MPa à 3,2 MPa avec 12% de ciment. Mais dans ces deux études, il n'y a pas eu de cure humide ce qui peut expliquer la faiblesse des résistances en compression. Un autre exemple est celui de Bahar et al.[112] dont la résistance en compression passe de 1,6 MPa à 6,4 MPa avec 20% de ciment. Certaines de ces très faibles valeurs de résistance soulèvent des questions car il est classique avec des briques de terre fabriquées avec des terres suffisamment argileuses d'avoir des résistances en

compression supérieures à 2 MPa. Aubert et al.[113] par exemple ont travaillé sur des briques extrudées non stabilisées et, pour une des terres utilisées, les résistances en compression atteignaient 5,5 MPa et 7,5 MPa pour des élancements respectifs de 2 et 1. La faible augmentation des résistances en compression avec l'ajout de ciment (parfois dans des fortes proportions) confirment les conclusions faites dans l'article de [114]. Ces derniers démontrent le rôle clé de l'interaction chimique dans l'amélioration de la résistance à la compression. Cependant, il convient de mentionner que la résistance mécanique est également largement influencée par d'autres paramètres tels que la méthode de cure et la période de cure. En surveillant l'effet de différentes méthodes de cure, Taallah et al [115] ont constaté que les BTC conservées 7 jours à  $65 \pm 2$  °C, (échantillon recouvert d'un film plastique) sont plus résistantes que celles conservées 28 jours à température ambiante. Les valeurs de résistance à la compression obtenues étaient respectivement de 10 MPa et 7 MPa. Cependant, parmi les études analysées, la plupart des blocs sont simplement séchés à l'air libre, et les meilleures performances sont enregistrées après au moins 28 jours.

Tableau 1. 4.Synthèse bibliographique sur les BTC stabilisées au ciment

Reference	Type	T° de cure	Temps de cure (j)	Ciment (%)	Rc (MPa)
(Medjo Eko et al., 2012)	BTC	20°C	28	0	1,0
				4	3,0
				7	10,4
				10	11-14
(Tran et al., 2018)	BTC	20°C	28	4	1,5
				8	5,6
				12	6,0
				0	1,4
(Sore et al., 2018)	BTC	7 (j) à 60°C 21 (j) à 20°C	21	8	8,2

### 1.2.7.3 Propriétés thermiques

Dans cette sous-section, l'influence de l'optimisation basée sur les performances thermiques des BTC est présentée. Les valeurs de conductivité thermique disponibles sont examinées quantitativement, tandis que l'hétérogénéité excessive des données liées à d'autres propriétés (c'est-à-dire la diffusivité thermique, la capacité thermique volumétrique et spécifique) ne permet pas d'élaborer d'autres considérations à leur sujet. La conductivité thermique fait référence à la capacité intrinsèque d'un matériau à transférer ou à conduire la chaleur. Il est défini comme la quantité de chaleur par unité de temps et d'unité de surface qui peut être conduite à travers une plaque d'un matériau donné avec une unité d'épaisseur (m) lorsque la différence de température entre les surfaces opposées est d'une unité de température. Les études examinées mesurent cette quantité de plusieurs manières mais, en général, elle est évaluée par la méthode de plaque chaude gardée ou la méthode du fil chaud.

Une brique creuse typique a une valeur de conductivité thermique de  $0,36 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , alors que la conductivité thermique d'une BTC non stabilisée est de  $0,60 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  [104]. D'autres valeurs à connaître sont la conductivité thermique de l'air immobile, qui est de  $0,025 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , et de l'eau, qui est d'environ  $0,60 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Cela signifie que la chaleur se diffuse plus facilement dans l'eau que dans l'air. Les résultats présentés par Nshimiyimana et al. [87] montrent que la conductivité thermique après saturation des BTC est le double de celle des sèches. Des valeurs plus élevées, de l'ordre de 2 à 2,4 fois, sont rapportées par Bogas et al. [116]. Au contraire, en présence d'une porosité équilibrée, l'air emprisonné dans les pores influence positivement la conductivité thermique.

### **1.3 Bilan et orientation des travaux de recherche**

Ce chapitre a permis de faire une revue des connaissances actuelles dans le domaine des valorisations des sédiments de dragage et des briques de terre comprimée, sur la base de la littérature disponible. Cette synthèse bibliographique a permis de mettre en évidence que les sédiments sont des matrices de nature complexe de même que les sièges de transformations biogéochimiques considérables qui peuvent se manifester à différents moments de la vie des sédiments. Par ailleurs, la gestion des sédiments est devenue un enjeu économique et environnemental majeur. En effet l'immersion en mer ne sera plus autorisée comme elle endommage sérieusement la faune et la flore marine. Le stockage dans des installations confinées est une opération coûteuse qui exige des grandes espaces et une surveillance à long terme.

La filière de valorisation des sédiments peut constituer une source de matériaux utilisables dans plusieurs domaines dont les matériaux de constructions qui connaissent une demande importante, face à la rareté des ressources naturelles. Parmi les voies potentielles de valorisation, on trouve le secteur des briques par sa capacité à consommer des quantités importantes de sédiments et par la simplicité de production industrielle.

Les sédiments de dragage dépourvus de liant ont généralement des caractéristiques mécaniques faibles. Afin d'améliorer les caractéristiques géotechniques et les performances mécaniques de ces sédiments, l'ajout d'un "stabilisateur" liant géopolymère à base de cendres volantes activées par de la soude est une solution efficace. Ce liant géopolymère consiste à améliorer la cohésion entre les grains de sédiments par l'effet chimique à savoir l'hydratation des cendres volantes, et l'effet physique en diminuant les vides pour obtenir une plus faible compressibilité et une meilleure résistance mécanique. Dans ce cadre, une étude de caractérisation physique, environnementale, thermique et mécanique des BTC à base sédiments MEL fera l'objet de cette thèse, afin de étudiés et d'appréhender la valorisation dans le domaine du brique de terre comprimée.

## **Chapitre 2. Matières premières et procédures expérimentales**

---

## ***Chapitre 2. Matières premières et procédures expérimentales***

---

Ce chapitre présente les matériaux et les procédures des travaux expérimentaux réalisés en laboratoire ainsi que les équipements utilisés. Les caractérisations des matières premières et les propriétés microstructurales, physiques, thermique et mécanique ainsi que la durabilité des briques ont été effectuées principalement dans le Laboratoire Génie Civil Mécanique et Matériaux (L2MGC) de CY Cergy Paris Université.

### **2.1 Matières premières**

#### **2.1.1 Sédiment de dragage**

Les sédiments de dragage ont été prélevés dans la Métropole Européenne de Lille (MEL) au nord de la France (la Figure 2. 1). La MEL effectue des opérations de dragage de sédiments qui conduisent à l'extraction annuelle de plusieurs milliers de m<sup>3</sup> de sédiments. En 2013, la MEL s'engage avec un projet SEDIMEL dans le cadre de la démarche sédimentaire afin d'étudier les filières de valorisation les plus adaptées aux sédiments issus de bassins pluviaux. Les sédiments utilisés (MEL) ont été conservés et conditionnés dans des fûts en plastique hermétiques de 50 litres et livrés au laboratoire (L2MGC).



Figure 2. 1.Site de prélèvement MEL



Figure 2. 2. L'état de sédiment MEL à l'arrivée au laboratoire L2MGC

### 2.1.2 Cendres volantes

Les cendres volantes sont issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques pour la production d'électricité. Cette combustion entraîne un refroidissement rapide des gouttelettes d'aluminosilicate fondues qui forment des phases amorphes ou semi-cristallines si le refroidissement est lent, notamment la mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$ ) [117]. La morphologie et la granulométrie des particules sont liées aux conditions de refroidissement et de récupération des cendres, tandis que la chimie est principalement dépendante du charbon et des impuretés qui le composent. Ainsi, on peut trouver des oxydes de fer, de titane, de soufre, alcalins ou de calcium. La teneur en (CaO) est utilisée pour classer les cendres en cendres calciques et siliceuses/silico-alumineuses, conformément à la norme NF EN 197-1 [118].

Les cendres volantes (CV) sont choisies comme source de silice et d'alumine dans cette étude, car elles présentent des caractéristiques favorables par rapport aux autres sources alumino-siliceuses. La littérature sur les géopolymères à base de cendres volantes montre qu'elles sont une source d'aluminosilicate chimiquement réactive [68]. Les cendres volantes utilisées dans cette étude ont été fournies par la société SURSCHISTE (Lens, France) (Figure 2. 3). Les caractérisations des sédiments et des cendres volantes seront effectuées au chapitre 3.



Figure 2. 3. Cendres volantes de classe F

### 2.1.3 Activateur alcalin : NaOH

Pour activer les cendres volantes, on a utilisé du NaOH de qualité industrielle d'une pureté de 99% (la Figure 2. 4). La concentration de la solution d'hydroxyde de sodium a été fixée à 8 mol pour tous les mélanges. Cette concentration est la teneur optimale en activateur générant une réaction des cendres volantes selon la littérature [121].



Figure 2. 4. Hydroxyde de sodium extra pur de Acros Organics.

## 2.2 Méthodes de caractérisation des matières premières

### 2.2.1 Propriétés géotechniques

#### 2.2.1.1 Teneur en eau

La détermination de la teneur en eau des sédiments est réalisée selon la norme NF P94-050 [122]. Elle est un paramètre déterminant pour la formulation et permet d'évaluer la consistance des matériaux de dragage. Dans cette étude, elle a été déterminée à différentes températures 40° C et 105°C afin de comparer l'effet de la température. La masse  $m_c$  d'un récipient métallique vide est déterminée au préalable. Un échantillon de matériau est prélevé et sa masse initiale dite masse humide  $m_{h+c}$  incluant celle du récipient métallique est déterminée par pesée. L'ensemble est placé dans une étuve à 105°C jusqu'à ce que la masse soit constante. Ensuite, on détermine la masse de l'échantillon sec avec le récipient  $m_{s+c}$ . La teneur en eau  $w$  de l'échantillon est donc :

$$w(\%) = \frac{m_{h+c} - m_{s+c}}{m_{s+c} - m_c} \times 100 \quad (2.1)$$

#### 2.2.1.2 Masse volumique absolue des matériaux

La masse volumique des particules solides a été déterminée par un pycnomètre à hélium type Accupyc 1330 (Figure 2. 5) qui a pour principe de déterminer le volume absolu occupé par une masse de matière donnée. Le principe de calcul, basé sur la relation des gaz parfaits.



Figure 2. 5. Pycnomètre à hélium e type Accupyc 1330 (Microméritics)

### 2.2.1.3 Analyse granulométrique

Une analyse granulométrique d'un sol est nécessaire pour connaître ses caractéristiques ainsi que sa classification. La distribution granulaire des échantillons de sédiments et cendres volantes a été effectuée à l'aide d'un granulomètre par diffraction laser de type COULTER Figure 2. 7)[8]. Le principe de la granulométrie laser consiste à envoyer un rayon laser à travers les particules de matériau dispersé. Chaque particule va diffracter le rayon selon un angle qui dépend de son propre diamètre.

L'angle de diffraction de la lumière est inversement proportionnel à la taille des particules étudiées. La granulométrie laser est réalisée sur trois mesures, en utilisant le modèle de Fraunhofer permettant de calculer la distribution de taille des particules. Ce modèle est fondé sur la propriété de particules solides à diffracter la lumière. Le rayonnement diffracté par une particule a un angle de diffraction et une intensité qui dépendent de la taille de ce grain. Le traitement mathématique et statistique de ces mesures fournit la répartition en volume des différentes fractions granulométriques de l'échantillon traduit sous la forme d'une courbe granulométrique exprimée soit en pourcentage cumulé soit en pourcentage volumique. Les mesures sont limitées aux particules dont la taille est inférieure à 2 mm. Le principe de fonctionnement de l'analyse granulométrique par diffraction laser est présenté en Figure 2. 6

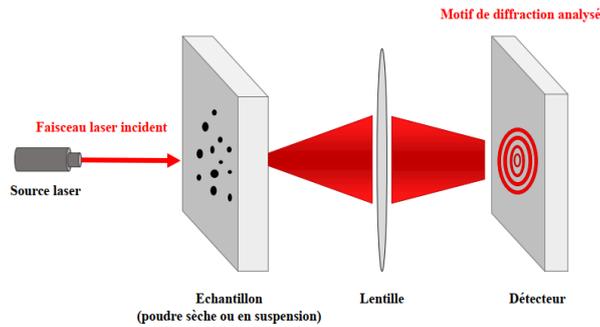


Figure 2. 6. Principe de l'analyse granulométrique par diffraction laser [124]



Figure 2. 7. Granulométrie laser (Analyse par diffraction laser) COULTER

#### 2.2.1.4 Limites d'Atterberg

L'essai de limite d'Atterberg fournit une méthode permettant d'évaluer la plasticité d'un sol. La détermination des limites d'Atterberg se fait sur la fraction inférieure à 400 µm du sédiment selon la norme NF P94-051[125]. La limite de plasticité  $w_p$  est la teneur en eau qui distingue l'état plastique de l'état semi-solide. La limite de liquidité  $w_L$  est la teneur en eau qui distingue l'état liquide de l'état plastique. L'indice de plasticité  $I_p$ , correspondant à la différence entre la limite liquide et la limite plastique, permet de déterminer la zone dans laquelle le sol est à l'état plastique. Il se calcule par la relation suivante :

$$I_p = W_L - W_P \quad (2.2)$$

L'essai est réalisé à l'aide de la Coupelle de Casagrande (Figure 2. 8). Il consiste à créer une rainure dans une pâte et à faire subir à l'échantillon des chocs répétitifs jusqu'à la fermeture de la rainure. La diminution de la teneur en eau augmente le nombre de chocs successifs nécessaires pour la fermeture de l'échantillon.



Figure 2. 8.Coupelle de Cassagnarde

#### 2.2.1.5 Valeur au bleu de méthylène

La structure des argiles leur donne un certain nombre de propriétés comportementales liées à leur capacité à absorber l'eau, ce qui conduit aux phénomènes de gonflement. Le test au bleu de méthylène permet de pouvoir apprécier de manière générale l'activité de la fraction argileuse d'un sol en déterminant la surface interne et externe des grains d'argile. Pour cela, on fixe des molécules de bleu de méthylène sur les grains d'argile et on évalue la quantité de bleu fixée. On en déduit la valeur bleue du sol (VBS), qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols. Le test a été réalisé sur trois échantillons de 120 g de sédiment en suivant la norme NF P 94-068[126]. L'échantillon a été immergé dans 500 ml d'eau déminéralisée et dispersé avec un agitateur tournant à 100 tr/min durant au moins cinq minutes jusqu'à ce que tous les agglomérats de matériau disparaissent. Le dosage se fait par une injection progressive de bleu de méthylène dans la suspension de sédiments jusqu'à saturation des particules. Le test est considéré positif lorsque la goutte centrale est entourée d'une zone humide incolore. La valeur de bleu de méthylène du sol (VBS) s'obtient par les relations suivantes :

$$VBS = 100 \times \frac{B}{\frac{M}{1+W}} \quad (2.3)$$

Avec VBS exprimée en grammes de bleu de méthylène pour 100 g de matériau, M (g) la masse du matériau utilisé pour l'essai et w sa teneur en eau initiale, B (g) masse de bleu introduite.

#### 2.2.1.6 Teneur en matière organique

La matière organique possède d'importantes propriétés indésirables. En effet elle retient l'eau et empêche la réaction pouzzolanique, ainsi la teneur en matière organique doit être mesurée afin de prendre en compte ces phénomènes. L'influence de la matière organique sur les caractéristiques des sédiments dépend de sa nature et de sa structure. Les matières organiques ont des caractéristiques de structure spongieuse, meubles et ayant peu de résistance mécanique. La méthode utilisée dans cette étude pour mesurer la teneur en matière organique est la méthode par calcination.

Selon la norme XP P 94-047[127], la teneur en matières organiques par calcination est le rapport entre la masse de matières organiques contenues et la masse sèche des particules solides préalablement séchées à 40°C qui sont inférieures à 2 mm. La masse perdue a été calculée en faisant la différence entre la masse initiale de l'échantillon et sa masse après calcination dans un four à 450°C pendant 3 heures. D'après la norme XP P 94-047[127], la perte au feu peut aussi être mesurée dans un four à 550°C pendant 3 heures. Les résultats de cette méthode doivent être interprétés avec prudence, car outre la perte de matière organique, la perte de masse de l'échantillon contient probablement une perte d'eau, une décomposition des carbonates et une perte de certaines phases minérales (ex. Kaolinite) détruites par la haute température[128].

### 2.2.2 Propriétés physico-chimiques

La connaissance de la composition chimique des sédiments est essentielle afin de maîtriser leur formulation et leur stabilité chimique, d'anticiper les éventuelles conséquences environnementales sur leur utilisation en tant que matériau de construction. La caractérisation physico-chimique est effectuée en utilisant les techniques d'analyses FX, DRX, FTIR, MEB.

#### 2.2.2.1 Analyse par fluorescence des rayons X

C'est une technique permettant l'analyse des éléments chimiques présents dans un matériau et la détermination de leur quantité respective. La matière, en étant irradiée par des rayons X, rediffuse de l'énergie sous forme de rayons X et présente un spectre caractéristique de la composition chimique de l'échantillon. En analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire (concentrations massiques). La fluorescence X d'un échantillon est définie comme la capacité de ce dernier à émettre son propre rayonnement lorsqu'il est soumis à une irradiation de type rayons X. Les atomes sont partiellement ionisés par arrachement d'un électron. Le retour à l'état fondamental se fait

par le comblement de la lacune électronique grâce à un électron photon. Suivant la transition électronique considérée, chaque atome, donc chaque élément chimique, présente une énergie de photon et une longueur d'onde qui lui sont propres. Par analyse du spectre d'énergie reprenant les rayonnements émis par l'ensemble des atomes du matériau, en étudiant en particulier l'aire des pics, il est possible d'obtenir une semi quantification chimique du composé. La détermination des éléments majeurs par spectrométrie de fluorescence X a été faite à l'aide d'un spectromètre de fluorescence X à dispersion de longueurs d'ondes S4 BRUCKER (Figure 2. 9).



Figure 2. 9. Spectromètre de fluorescence X BRUKER S4

#### 2.2.2.2 Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique d'étude, sans contact, utilisée couramment pour identifier les espèces minérales d'une matrice solide. Elle permet entre autres de différencier des espèces minérales de même composition chimique mais de structures cristallines différentes, telles que l'aragonite et la calcite. Toutefois, si l'échantillon analysé contient une phase amorphe (ou vitreuse) importante, l'analyse DRX ne permettra d'avoir qu'une caractérisation partielle de la matrice solide.

Dans cette technique, l'échantillon à analyser est irradié par un faisceau de rayons X. Les plans réticulaires vont être capables de diffracter l'onde électromagnétique incidente dans les conditions définies par la loi de Bragg donnée par l'équation 2.4.

$$n.\lambda = 2d.\sin\theta \quad (2.4)$$

Où  $n$  est l'ordre de diffraction (entier),  $\lambda$  la longueur d'onde de la radiation incidente,  $d$  la distance interréticulaire entre les plans et  $\theta$  l'angle formé entre le rayon incident et la famille de plan considérée.

Les conditions de diffraction selon la loi de Bragg et les différentes grandeurs relatives à cette relation sont représentées dans la

Figure 2. 10. La composition minéralogique a été déterminée par diffraction de rayons X BRUCKER AXS D8 ADVANCE en utilisant la radiation  $\text{CuK}\alpha$ (Figure 2. 11). L'anticathode est en cuivre (d'où  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ). L'appareil est muni d'un détecteur rapide de type Lynxeye XE-T. La tension d'accélération et l'intensité utilisées sont respectivement de 40 kV et 40 mA.

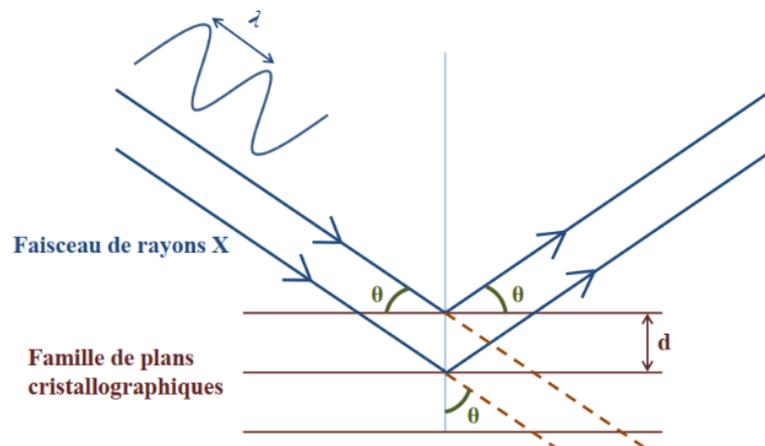


Figure 2. 10. Phénomène de diffraction selon la loi de Bragg



Figure 2. 11. diffraction de rayons X BRUKER AXS D8 ADVANCE

### 2.2.2.3 Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Cette technique se base sur les fréquences de vibration et de torsions symétriques/asymétriques, planes ou pas, caractéristiques des longueurs et forces de liaisons entre les atomes constitutifs d'un matériau. En effet, lorsqu'on fait passer un rayonnement de spectre infrarouge à travers le matériau, les bandes correspondantes aux fréquences de vibration/torsion typiques des groupes fonctionnels et atomes présents

sont absorbées. Cela se manifeste par des pics de diminution de la transmission (ou d'augmentation de l'absorption) de l'onde à des fréquences typiques sur la transformée de Fourier du spectrogramme infrarouge. On peut alors déduire la nature des liaisons grâce à des bases de données existantes. Les diagrammes infrarouges ont été obtenus sur des poudres d'échantillons broyés, à l'aide d'un spectromètre alpha (Figure 2. 12). Une cellule de réflexion totale atténuée (ATR) a été utilisée pour enregistrer les spectres FTIR sur les échantillons écrasés. Les spectres de transmission entre 4000 et 400  $\text{cm}^{-1}$  ont été collectés.



Figure 2. 12. Spectroscopie Infrarouge BRUKER Tensor 27

#### 2.2.2.4 Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage est un appareil voué à l'imagerie haute résolution. L'imagerie MEB est fondée sur le principe des interactions électron-matière. Un faisceau d'électrons est émis par un canon à électrons (cathode). Le faisceau d'électrons est focalisé via un jeu de lentilles sur la surface de l'échantillon en un spot très fin. Un jeu de bobines permet de déplacer le faisceau de façon à balayer toute la surface de l'échantillon. Pour faire de l'imagerie électronique, l'échantillon est balayé ligne par ligne selon une matrice rectangulaire. L'interaction entre le faisceau d'électrons et la surface de l'échantillon produit trois types de signaux secondaires : des électrons secondaires, des électrons rétrodiffusés et des rayons X. La détection des deux types d'électrons permet de reconstituer simultanément des images électroniques différentes. La détection des électrons secondaires permettra d'obtenir des informations sur la topographie (relief) de l'échantillon. Un microscope électronique à balayage Gemini 300 (ZEISS) couplé à un détecteur de microanalyse à rayons X Quantax 10 (Bruker) a été utilisé pour analyser la microstructure avec une distance focale de seulement 8,8 mm et des tensions d'accélération de 10 kV. Dans le cadre de la thèse, la microscopie électronique à balayage

(MEB) a été utilisée à diverses occasions et avec des objectifs différents. Concernant la caractérisation des matières premières, elle a permis de rendre compte de la morphologie des particules qui les constituent : formes, tailles et arrangements. Ces caractéristiques seront observées dans une chambre du MEB voir la Figure 2. 13.



Figure 2. 13. microscopie électronique à balayage (MEB) ZEISS GeminiSEM 300

### 2.2.3 Caractérisation environnementale

L'acceptabilité d'un sous-produit industriel ou d'un déchet comme matériau alternatif dans la fabrication de blocs de terre comprimée dépend de ses caractéristiques physiques et de ses performances mécaniques, mais surtout de son comportement environnemental.

#### 2.2.3.1 Essai de lixiviation

La lixiviation est une méthode d'extraction largement utilisée pour évaluer le potentiel de relargage de polluants vers le milieu naturel. Nous avons choisi d'utiliser l'essai à l'eau déminéralisée NF EN 12457-2 [129] afin de pouvoir comparer les résultats obtenus aux valeurs fixées par la directive décharge [15]. Ce test consiste à mettre en contact 100 grammes de matériau sec avec une granulométrie inférieure à 4 mm avec 1 litre d'eau déminéralisée (rapport Liquide/Solide = 10), durant 24h, dans un flacon de 2 litres agité de façon continue. Le lixiviat est ensuite débarrassé des particules en suspension par filtration (membrane de 0.45 $\mu$ m de maille) (Figure 2. 15). Les teneurs en métaux lourds sont ensuite mesurés par analyse spectroscopie d'émission optique à couplage inductif (ICP-OES)(la Figure 2. 15). Les polluants anioniques sont analysés par chromatographie ionique ainsi que des polluants organiques analysés par des dosages suivant des méthodes normées.



Figure 2. 14. Lixiviation à l'eau :  
Agitateur



Figure 2. 15. Analyse ICP-OES

### 2.3 Protocole de production des échantillons BTC

La préparation du mélange pour produire les BTC a été effectuée en deux étapes en utilisant un malaxeur normalisé pour homogénéiser les mélanges. Après homogénéisation du mélange sec (sédiments et cendres volantes) pendant 7 minutes à vitesse lente, s'ensuit le malaxage humide par l'addition de la solution d'activation alcaline préparée avec la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor et de l'hydroxyde de sodium à 8 mol, pendant 3 minutes à vitesse lente. Les mélanges résultants ont été compactés en utilisant une presse INSTRON (INSTRON-3369) avec un compactage statique à une pression de 40 bars. Le moule métallique cylindrique de dimensions 50 x 100 (50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur) [130], utilisé était équipé de 3 cales de hauteurs différentes (Figure 2. 16B). La compression statique a été réalisée en 3 états, le système de cales de compression métalliques de plus en plus petites étant utilisé à chaque phase. Cette méthode permet d'obtenir progressivement la dimension finale de l'échantillon selon la norme NF P 94-100[130]. Après la compression de l'échantillon, la charge a été maintenue pendant 10 secondes, puis les éprouvettes ont été retirées des moules à l'aide d'un piston.

La masse du mélange humide  $m_{ép}$  à introduire dans le moule cylindrique [130] est déterminée par la relation suivante :

$$m_{ép} = \rho_{dOPN}(1+W_{OPN}) \times h_{ép} \left( \pi \frac{\phi_{ép}^2}{4} \right) \quad (2.5)$$

Avec :

$m_{ép}$  : masse du mélange humide par éprouvette ( $g$ )

$\rho_{dOPN}$  : masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal du mélange ( $g/cm^3$ )

$W_{OPN}$  : teneur en eau l'optimum Proctor normal du mélange en valeur décimale (%)

$h_{ép}$  : hauteur de l'éprouvette ici égale à 50 mm

$\phi_{ép}$  : diamètre de l'éprouvette ici égal à 100 mm

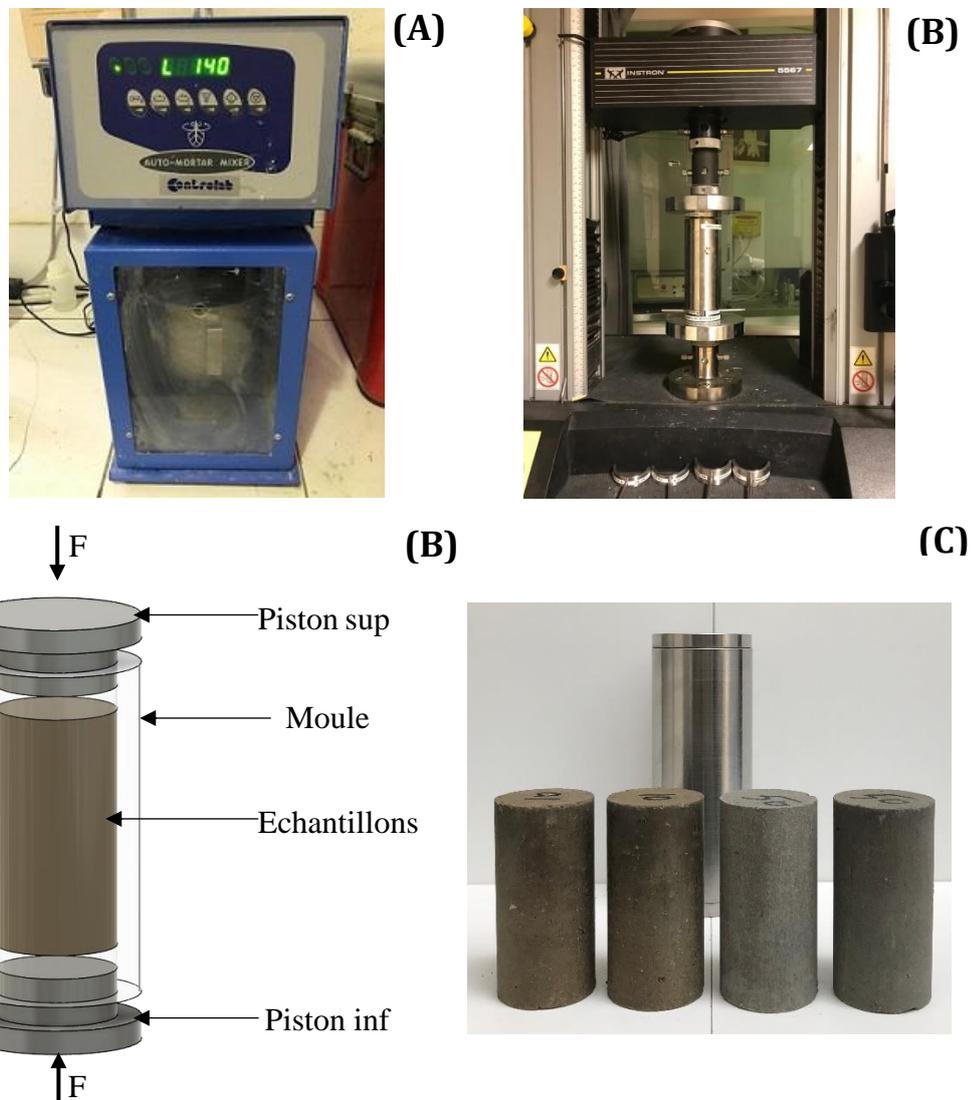


Figure 2. 16.Préparation des échantillons de BTC.(A) Malaxage,(B)Compactage,(C) Démoulage

Les détails des compositions du mélange utilisé pour la fabrication des BTC sont présentés dans le Tableau 2. 1.

Tableau 2. 1.Composition des conceptions de mélange de la BTC

Matériaux	BTCR	BTC10CV	BTC20CV	BTC30CV	BTC40CV	BTC50CV
Sédiment (%)	100	90	80	70	60	50
Cendres volantes (%)	0	10	20	30	40	50
Eau*/matière sèche(%)	0,1409	0,1855	0,2187	0,1993	0,207	0,1884
Concentration de NaOH (M)	8	8	8	8	8	8

\*Teneur en eau déterminée (%) issue de l'essai Proctor

Après l'étape de production, les échantillons ainsi stabilisés avec le géopolymère ont été recouverts d'un film plastique et placés dans un four à 50°C pendant 7 jours, ensuite les échantillons ont été placés dans une pièce à température ambiante jusqu'au 28<sup>ème</sup> jour. De plus, les échantillons ainsi produits après leurs durcissements respectifs ont été soumis à des tests de mesures physiques, mécaniques et thermiques.

## 2.4 Méthodes de caractérisation des échantillons BTC

### 2.4.1 Propriétés mécaniques

#### 2.4.1.1 Essai de compression simple

Les résistances à la compression ont été déterminées selon la norme XP P13-901[17]. Les essais ont été réalisées à l'aide d'une presse hydraulique de capacité de charge maximale de 30 kN avec un taux de chargement de 0,15 kN/s. Pour chaque test, trois échantillons cylindriques de dimensions 100x50 (50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur) ont été testés, et chaque résultat représente la moyenne des trois échantillons (Figure 2. 17).

En considérant que les constructions sont fréquemment exposées au risque de dégradation par l'eau de pluie, les remontées capillaires et même l'immersion en cas d'inondation, il est ainsi primordial de connaître leur comportement mécanique à l'état humide, dans le but de savoir quelles sont leurs caractéristiques minimales dans les conditions les plus défavorables. C'est un essai qui est identique à celui de la résistance en compression sèche, sauf que les échantillons subissent une saturation en eau préalable pendant 2h. Puis, elles sont retirées et essuyées à l'aide d'une serviette légèrement humide (Figure 2. 17).

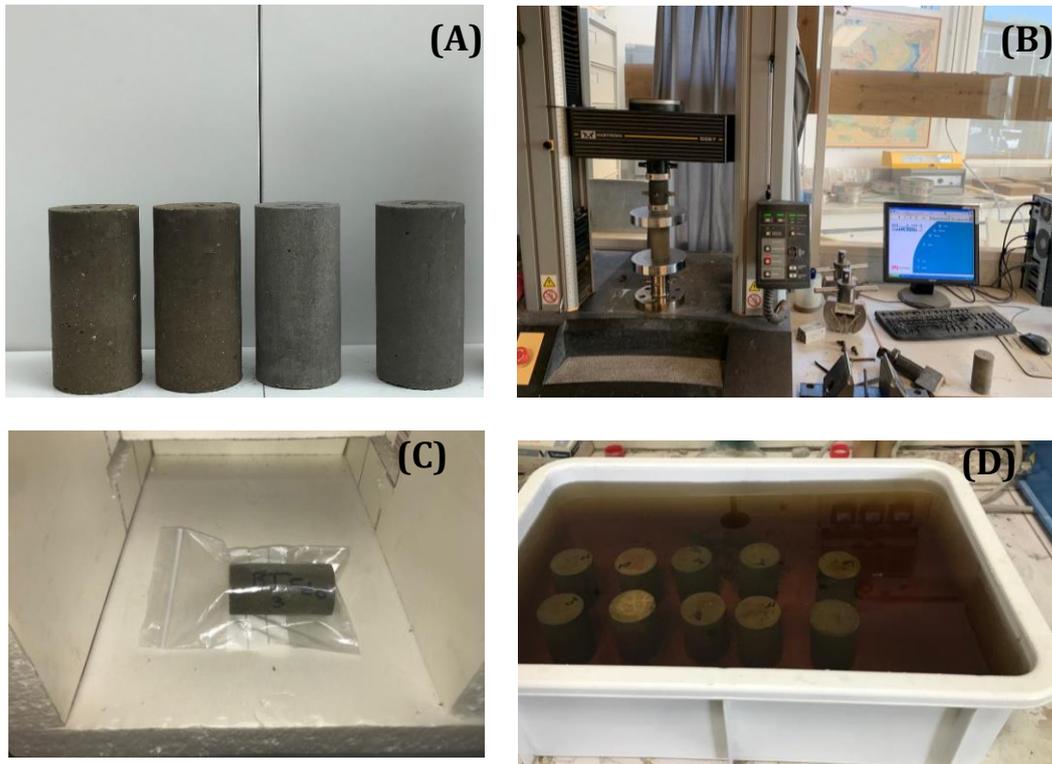


Figure 2. 17. Préparation des éprouvettes au test de compression : (A) Echantillons BTC ,(B) Presse INSTRON,(D) Immersion dans l'eau pendant 2h.

Nous pourrions utiliser nos résultats de compression à l'état sec et à l'état humide pour les comparer aux valeurs standard de la norme française de BTC Tableau 2. 2.

Tableau 2. 2. Catégories de blocs pleins de terre crue stabilisée selon la norme XP P13-901[17].

Blocs pleins	Categories		
	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Résistance minimale à l'état sec (MPa)	2	4	6
Résistance minimale à l'état humide (MPa)	1	3	3

#### 2.4.1.2 Résistance à la traction

L'essai de résistance à la traction par fendage a été effectué conformément à la procédure décrite dans la norme NF94 422 [132]. Le bloc a été placé au centre entre les deux pièces de chargement et la charge a été appliquée jusqu'à l'écrasement de l'échantillon. Les

essais ont été réalisés à l'état sec. La résistance à la traction par fendage a été calculée en utilisant l'équation suivante :

$$V = \frac{2F}{\pi dL} \quad (2.6)$$

F= charge maximale appliquée (kN)

L= longueur de l'éprouvette (mm)

d =diametre de l'éprouvette (mm)

## 2.4.2 Propriétés physiques

### 2.4.2.1 Porosité et densité

La porosité accessible à l'eau est responsable de nombreux dégâts dans les briques de terre. Sous l'influence de cette porosité, les matrices de matériaux de base se dégradent en raison des variations dimensionnelles provoquées par l'absorption d'eau. L'évolution de la porosité dans les formulations a été déterminée à 28 jours de cure et avec différents taux de substitution du sédiment (BTCR, BTC10CV, BTC20CV, BTC 30CV, BTC 40CV et BTC50CV). Nous avons préféré faire une saturation en éthanol à la place de l'eau, car l'eau risque de réagir chimiquement avec les cendres volantes activées. La porosité accessible à l'éthanol est calculée par la différence de masse entre un échantillon sec et saturé (Figure 2. 18).



Figure 2. 18.Saturation à l'éthanol

La densité apparente de briques a une influence sur de nombreuses propriétés des briques, telles que la résistance à la compression, la stabilité thermique, et d'autres propriétés de durabilité des briques [44], [56].

Les deux grandeurs physiques, la porosité à l'éthanol et la densité apparente des échantillons de BTC, ont été déterminées selon les équations de la norme NF-EN 1936[133]

$$\rho = m_{dry} \times \rho_w \left( \frac{M_{sat.air} - M_{sec}}{M_{sat.air} - M_{sat.eth}} \right) \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = 100 \times \left( \frac{M_{sat.air} - M_{sec}}{M_{sat.air} - M_{sat.eth}} \right) \quad (2.7)$$

$\rho$  : densité apparente des échantillons

$\varepsilon$  : porosité à l'éthanol (%).

$M_{sec}$  : masse sèche constante de l'échantillon (g)

$M_{sat.eth}$  : masse saturée, pesé sous éthanol (g)

$M_{sat.air}$  : masse saturée, pesé dans l'air(g)

#### 2.4.2.2 Absorption capillaire et saturation par immersion

La durabilité des briques est fortement influencée par la capacité d'absorption d'eau des briques [59]. Moins l'eau pénètre l'échantillon de brique, plus les spécimens de brique sont durables et résistants aux intempéries [35].

Avant de réaliser le test, les échantillons ont été séchés à  $60 \pm 2$  °C jusqu'à atteindre une masse constante, puis les blocs ont été refroidis à la température ambiante. La mesure de l'absorption capillaire des blocs a été réalisée selon la norme XP P13-901[17]. Les échantillons secs ont d'abord été pesés, puis mis dans une fine couche d'eau (5 mm) pendant 10 min (la Figure 2. 19). La prise de masse de l'échantillon mesurée pendant l'essai d'absorption[16]. Le coefficient d'absorption d'eau d'absorption d'eau ( $C_b$ ) a été calculé selon la formule suivante :

$$C_b = \frac{100 \times (P_1 - P_0)}{s\sqrt{t}} \quad (2.8)$$

$C_b$  : coefficient de résistance à la remontée capillaire

$P_1$  : masse de l'échantillon après immersion dans l'eau (g)

$P_0$  : masse de l'échantillon avant immersion dans l'eau (g)

$S$  : Surface immergée du bloc (cm<sup>2</sup>)

$t$  : temps d'immersion dans l'eau du bloc (min).

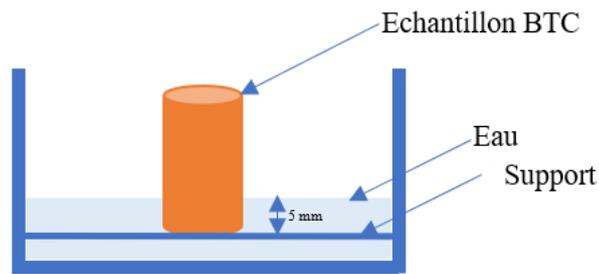


Figure 2. 19. Dispositif de détermination de la capillarité des échantillons de BTC

### 2.4.2.3 Vitesse des ondes ultrasonores

Le but de ce test est de mesurer la vitesse de propagation des ondes à l'aide d'un appareil portable (Pundit7) afin d'en déduire quelques propriétés physiques et mécaniques. L'appareil dispose d'un générateur d'impulsions (résolution de  $0,1 \mu s$ ) mesure le temps mis par une onde ultrasonique pour parcourir la distance entre l'émetteur et le récepteur placés à chaque extrémité de l'échantillon (Figure 2. 20). Le dispositif utilisé donne aussi la vitesse de l'onde sonore en même temps que l'affichage du temps. Pour assurer une bonne continuité de l'ensemble émetteur et du récepteur, une couche de graisse a été appliquée sur la surface de l'échantillon et des parties métalliques. Les caractéristiques complètes de l'équipement sont définies par la norme NFP 18-418[134]. L'appareil a été calibré à ( $25,4 \mu s$ ), avant de commencer l'essai.

Les transducteurs ont été positionnés fermement contre la surface du bloc jusqu'à ce qu'un temps de transit stable soit affiché (Figure 2. 20). Les mesures ont été effectuées dans une seule direction, à savoir le sens longitudinal. Les essais ont été réalisés sur 18 BTC ensuite utilisés pour les essais de mécanique. Trois relevés pour chaque formulation ont été effectués et leur moyenne est exprimée en tant Vitesse de propagation. La vitesse d'impulsion a été calculée en utilisant l'équation suivante :

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.9)$$

V : vitesse de propagation de l'onde (m/s)

L : distance parcourue par l'impulsion (m) et

T : temps de transmission (s)



Figure 2. 20. Détermination de l'VP

### 2.4.3 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques ont été évaluées conformément à la norme NFE993-15[135] en utilisant un transformateur de courant . Ce site dispositif est basé sur la technique du fil chaud transitoire, selon la norme [135]. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une sonde, qui est une résistance chauffante avec un capteur de mesure de la température dans un état transitoire (Figure 2. 21). La sonde est placée entre deux blocs symétriques, ayant des facettes aussi lisses que possible pour éviter tout contact avec l'air. Les propriétés thermiques (conductivité thermique, diffusivité thermique et capacité volumique) ont été déterminées par la méthode du disque chaud, dans des conditions ambiantes contrôlées ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $50\% \pm 5\%$  HR). L'effusivité thermique (E) a été mesurée sur des échantillons de dimensions cylindriques 50x50mm. La conductivité thermique et la diffusivité thermique ont été déterminées à l'aide des équations suivants.

$$\lambda = \frac{E^2}{\rho.CP} \quad (2.10)$$

$$d = \frac{\lambda}{\rho.CP} \quad (2.11)$$

$\lambda$  : Conductivité thermique en W/(m.K)

E : Effusivité thermique en  $\text{J}/\text{m}^2$ ,

D : Diffusivité thermique en  $\text{m}^2/\text{s}$

$\rho$  : Densité apparente.

$C_p$  : capacité massique thermique ( $\text{J}/\text{m}^3.\text{K}$ )

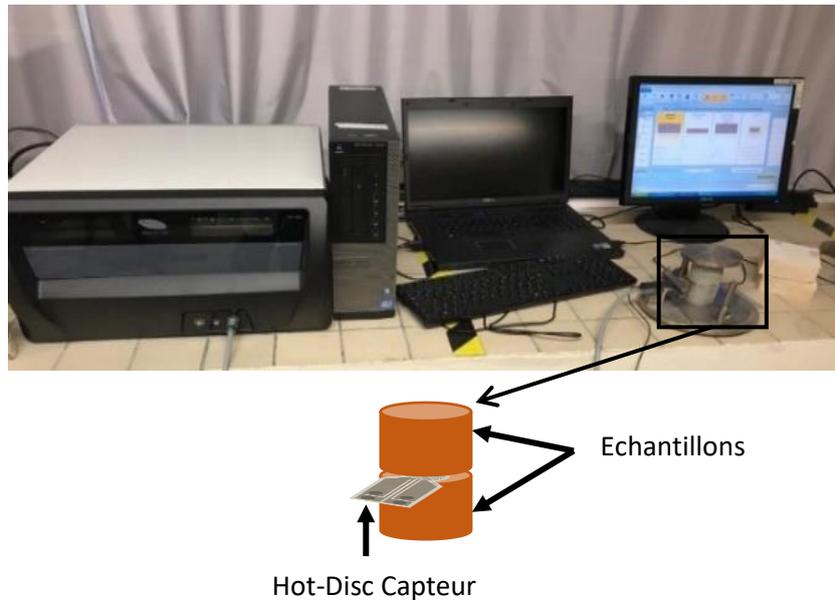


Figure 2. 21.Mesure des propriétés thermiques des échantillons de BTC

#### 2.4.4 Durabilité

Le principal inconvénient des BTC est leur dégradation sous l'action des intempéries a succession des phénomènes climatiques de pluie, soleil, froid, humidité et vent. Les principales dégradations observées sont les mécanismes de vieillissement à travers des cycles humidification/séchage, les fissures de retrait et la sensibilité à l'eau.

##### 2.4.4.1 Cycles séchage-mouillage

Les essais séchage-mouillage ont été réalisés selon la norme ASTM D559-89[136], qui est pourtant la seule recommandation en terme de durabilité pour les mélanges sol-liant[137]. Trois éprouvettes pour chaque formulation ont été soumises à des cycles d'séchage-mouillage et les trois autres ont été utilisées en tant qu'éprouvettes témoins et conservées dans les mêmes conditions de cure sans subir les cycles. Un cycle est divisé en deux phases : la première phase consiste à placer l'éprouvette dans l'eau pendant 2 h à température ambiante, tandis que la deuxième phase consiste à placer les éprouvettes dans une étuve à 60°C pendant 12 h, et refroidis pendant au moins 3 heures à température ambiante. Après avoir atteint le nombre cible de cycles. Des tests de résistance à la compression et des mesures de suivi de masse ont été réalisés. Des échantillons sont testés après 1, 2,4 et 6 cycles. La Figure 2. 22 illustre les phases d'une cycle séchage-mouillage.

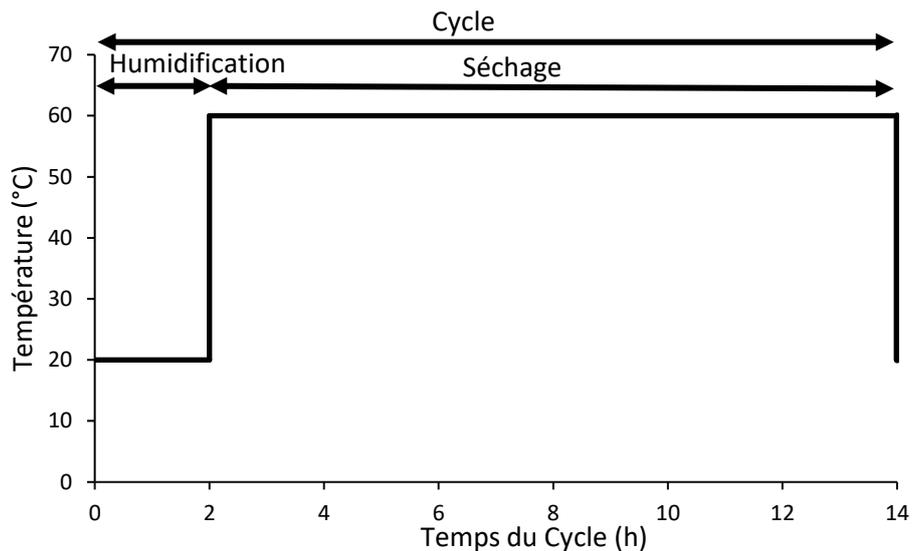


Figure 2. 22. Diagramme de la piste cyclable séchage-mouillage

#### 2.4.4.2 Retrait de séchage

Le durcissement des BTC est principalement soumis à deux types de retrait : le retrait endogène dû à la poursuite de la réaction d'hydratation et le retrait de dessiccation dû au séchage de l'échantillon [138]. Dans les deux cas, la rétraction du matériau est due à la diminution de l'humidité relative dans le matériau, soit interne (endogène) soit externe (séchage). Les deux phénomènes de retrait coïncident et entraînent des déformations qui, peuvent entraîner des fissures, réduisant ainsi la performance des BTC et les rendre plus vulnérables aux différentes agressions extérieures. Pour mesurer les variations de longueur des BTC, un déformomètre standard a été utilisé (Figure 2. 23). Ce dispositif se compose d'une plaque d'appui pour le maintien de l'éprouvette, une tige de calibrage (100mm) et un comparateur d'une précision de 0,001 mm. Trois échantillons cylindriques de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm sont suivis pour chaque formulation. La longueur des échantillons est mesurée tous les jours.



Figure 2. 23. Déformomètre pour la mesure des variations de longueur

#### 2.4.4.3 Tenue à l'eau

Le comportement des échantillons de BTC par rapport à l'eau a été évalué par un "test de sensibilité à l'eau". Les échantillons de BTC ont été immergés dans un béccher contenant 300 ml d'eau distillée et laissé dans les conditions ambiantes du laboratoire pendant 24h. Le comportement de ces briques en contact avec l'eau a été évalué visuellement et trois situations sont possibles [32]:

- l'échantillon est intact et entouré d'eau claire : le matériau était non-dispersif et cohésif,
- l'échantillon s'est effondré mais l'eau environnante est claire : le matériau était non-dispersif et sans cohésion,
- l'échantillon s'est effondré et l'eau est trouble : le matériau est dispersif et sans cohésion [29].

## 2.5 Conclusion

Nous avons présenté les matériaux utilisés et les méthodes expérimentales choisies pour ce travail de thèse. Le principal objectif visé au long de la démarche expérimentale est la précision et la fiabilité des résultats. La sélection d'une méthode de mesure dépendra de différents critères, notamment les suivants : la disponibilité de l'équipement, la fiabilité des résultats et la représentativité de l'échantillon de mesure.

Les évaluations des diverses caractéristiques ou propriétés des différents matériaux qui seront étudiés dans ce travail ont été réalisées en utilisant les appareils disponibles et accessibles au sein du L2MGC. Le bilan de ces différentes mesures expérimentales sera présenté dans trois chapitres principaux, dont chacun répond à un objectif précis et qui sont respectivement :

- Caractérisation des matériaux et formulations des mélanges
- Caractérisation des blocs de Terre comprimée
- Etude sur la durabilité

## **Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et formulations des mélanges**

---

## ***Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et formulation des mélanges***

---

Dans le but de valoriser les sédiments comme matières premières dans la fabrication de BTC, une caractérisation minutieuse des sédiments adaptée aux différentes attentes réglementaires des BTC est indispensable. Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons les caractérisations géotechniques, chimiques et minéralogiques des matières premières. La seconde partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation du processus de stabilisation et les résultats des essais Proctor réalisés sur les différents mélanges (sédiment, cendres volantes). Ces résultats sont indispensables car les propriétés mesurées serviront à établir les formulations de BTC qui seront étudiées dans les chapitres suivants.

### **3.1 Caractérisation de sédiments**

Les sédiments de dragage ont été prélevés dans la Métropole Européenne de Lille (MEL) dans le nord de la France et utilisés dans le programme expérimental. Afin de valoriser ce sédiment dans la fabrication de briques de terre comprimée, la connaissance de la teneur en eau, de la distribution granulométrique, les limites d'Atterberg et la teneur en matière organique représente un préalable requis. Dans ce qui suit, en plus de la détermination de ces caractéristiques de base, une étude environnementale est présentée dans cette partie.

#### **3.1.1 Caractérisation géotechnique**

##### **3.1.1.1 Teneur en eau**

La teneur en eau caractérise le comportement hydrique d'un matériau, elle est exprimée par  $W(\%)$ . Elle correspond au rapport entre la masse humide et la masse sèche. Les mesures de la teneur en eau ont été menées en suivant la norme NF P 94-050 [130, p. 94-050] avec un étuvage durant 24 heures à 60°C et 105°C jusqu'à stabilisation de la masse du sédiment. Le fait de choisir ces deux températures différentes permet de connaître l'effet de la température sur le sédiment. On observe une différence de teneur en eau entre les températures 60°C et 105°C. Ceci est dû à la dégradation de la matière organique entre 40°C et 105°C ainsi qu'à une consommation d'eau capillaire à 105°C.

Les résultats de la teneur en eau sont reportés dans le Tableau 3. 1.

Tableau 3. 1.Mesure de la teneur en eau de sédiment.

	Etuve à 60°C	Etuve à 105°C
W(%)	25,4	22,34

### 3.1.1.2 Teneur en matières organique : Perte au feu

La présence de matière organique dans les sédiments est une source d'instabilité chimique importante. Elle est susceptible de générer une faiblesse en termes de résistance mécanique[67]. Des chercheurs ont constaté que la matière organique influe les propriétés géotechniques des sols[80]. En outre, elle est responsable de l'augmentation de la limite de plasticité et de la modification du comportement de compressibilité ainsi que la diminution de la réaction d'hydratation pendant le processus de stabilisation[105]. Par conséquent, il est primordial d'estimer le taux de matière organique dans les sédiments pour une éventuelle valorisation. La détermination de la teneur en matière organique a été effectuée selon la norme XP P94-047[127] par calcination à 450°C et 550°C. Les résultats obtenus montrent que la teneur en matière organique par la méthode de calcination à 450°C, est de 13,5% et à 550°C suivent la même tendance 13,8%.

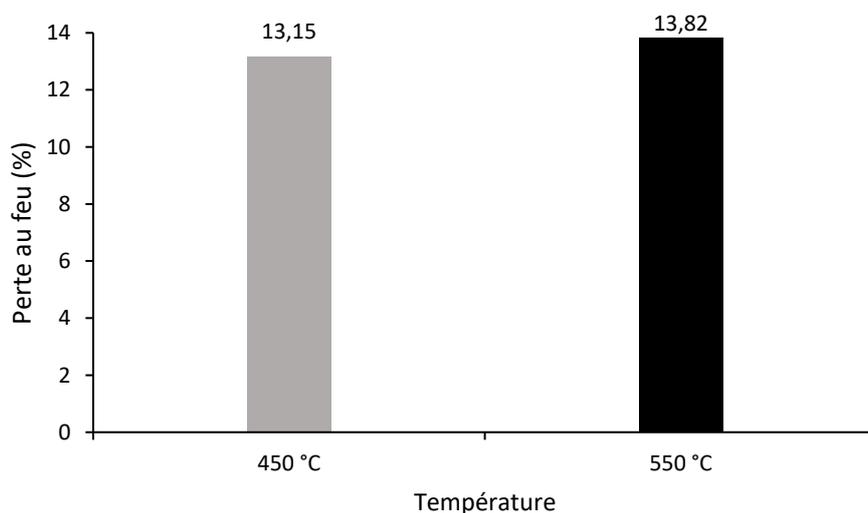


Figure 3. 1.Perte au feu de sédiment

### 3.1.1.3 Masse volumique des particules solides

La masse volumique des particules solides "densité absolue" a été mesurée par un pycnomètre à hélium "MICROMERITICS" type Accupyc 1330. Le principe consiste à déterminer le volume des grains contenus dans le pycnomètre à partir d'un échantillon sec dont la masse est déterminée selon la norme [133] Le sédiment de la Métropole Européenne de Lille (MEL) présente une masse volumique absolue de  $2,39 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.1.1.4 Analyse granulométrique

Les sédiments de dragage ont été prélevés dans la Métropole Européenne de Lille (MEL) dans le nord de la France et utilisés dans le programme expérimental. Ces sédiments ont été criblés et tamisés à 5 mm pour obtenir un matériau de classe granulaire 0/5 mm selon les recommandations de la norme NF XP P13-901 [21]. La Figure 3. 2 présente la distribution granulométrique des sédiments ainsi que la gamme standard de BTC selon les normes NF XP P13-901 [21]. Le sédiment est composé de 1,8 % d'argile, 30,5 % de limon et 67,4 % de sable. Il est à noter qu'une partie de la courbe des sédiments est située en dehors de la plage recommandée. Cependant, il est généralement admis que de nombreux sols qui ne se situent pas dans la gamme recommandée peuvent en pratique donner des résultats acceptables [20]. Néanmoins, comme observé par Jaquin et al. [139], les sols plus fins peuvent retenir plus d'eau que les sols plus grossiers dans les mêmes conditions hygrothermiques. Ce qui se traduit par un comportement hygroscopique plus fort. Cependant, une fraction fine plus importante peut affaiblir les caractéristiques mécaniques et la durabilité des briques. Par ailleurs, ces fuseaux sont fréquemment critiqués dans la littérature, du fait que les courbes granulométriques de ces matériaux sont généralement en dehors du fuseau recommandé [113]. En effet, les fuseaux recommandés dans la littérature ne sont qu'une suggestion et sont par conséquent utilisables avec une marge tolérance.

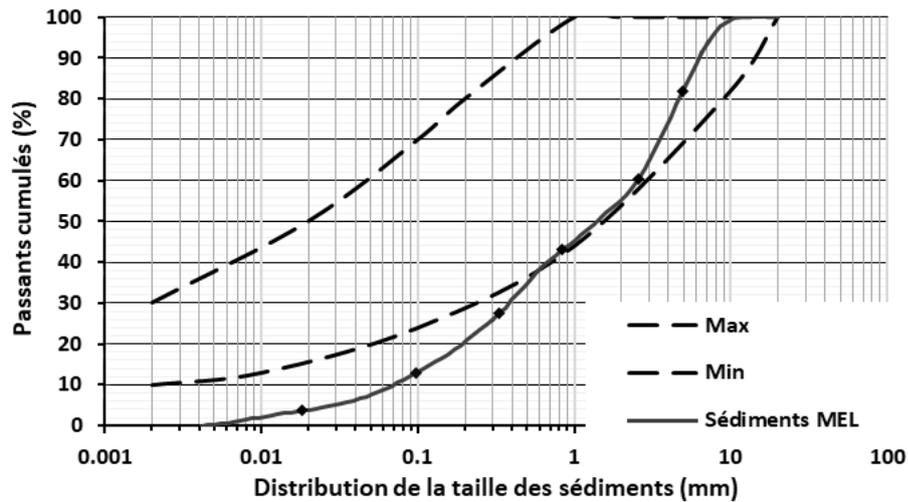


Figure 3. 2.Distribition de la taille des sédiments

En s'appuyant sur les résultats de l'analyse granulométrique , le sédiment MEL est classé comme sableux selon le diagramme triangulaire de Taylor [140] (Figure 3. 3).

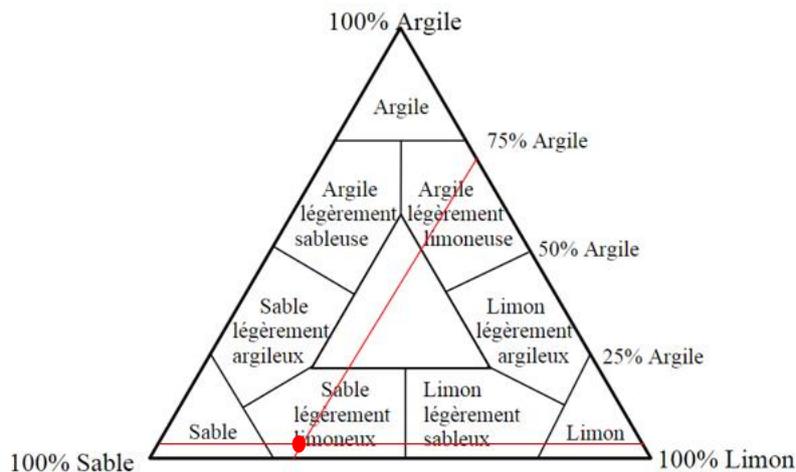


Figure 3. 3.Diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture[140].

### 3.1.1.5 Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les constituants fins ( $\leq 400\mu\text{m}$ ), puisque ce sont les composants sur lesquels l'eau a une influence en provoquant une modification de la consistance du sédiment. En effet, un matériau fin va pouvoir passer de l'état solide à l'état liquide, lorsque sa teneur en eau augmente, le comportement intermédiaire présentera des propriétés plastiques. Dans ce contexte, le test des limites d'Atterberg a été effectué sur le sédiment de dragage afin de déterminer les plages de sa limite liquide, de sa limite plastique et de son indice de plasticité.

La Figure 3. 4 présente les couples Indice de plasticité (IP) et limite de liquidité (WL). La valeur élevée de la limite de liquidité de sédiment peut s'expliquer par la teneur élevée en matières organiques des sédiments. Le sédiment est situé à droite de la ligne A et aussi du fuseau indicatif des BTC proposées par la norme XP P 13-901[131]. Le sédiment semble raisonnablement approprié, même s'il est plus plastique que les matériaux usuels à BTC, car sa quantité de fines est limitée.

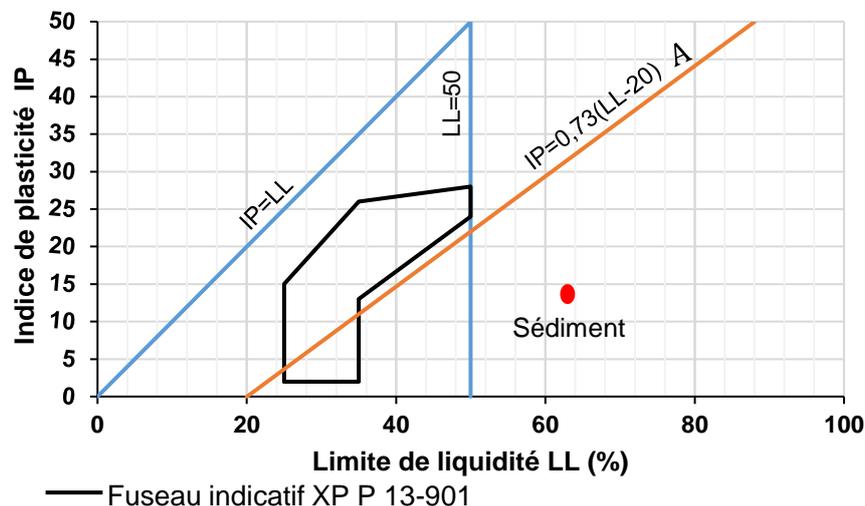


Figure 3. 4.Limites d'Atterberg de sédiment et plage de recommandations.

### 3.1.1.6 Argilosité

L'argilosité des sédiments est évaluée par l'essai à la tâche au bleu de méthylène (VBS) selon la norme NF P 94-068[126]. Les résultats permettent une détermination de l'activité colloïdale des matériaux argileux qui dépendent directement de la nature minéralogique de l'argile et de leur teneur dans le sol. La valeur de la VBS de sédiment MEL est de 1,3. Selon la norme NF P11-300[11], cette valeur de VBS appartient à la famille des sols sableux-limoneux.

### 3.1.1.7 Synthèse des propriétés géotechniques

Les différents essais de caractérisation ont montré que notre sédiment appartient à la classe B2 (matériau acceptable avec un léger déficit de fines), selon la norme XP P 13-901[131]. La teneur en matière organique du sédiment est relativement importante comme elle peut affecter les comportements hydrique et mécanique des BTC. Il est donc indispensable d'utiliser des éléments "ajout" non plastiques qui donnent aux produits une texture moins compacte. Afin d'améliorer leurs performances mécaniques, l'ajout d'un correcteur granulaire est une solution efficace qui joue également un rôle dans la

réduction de la plasticité. Les caractéristiques physiques du sédiment sont représentées dans le Tableau 3. 2.

Tableau 3. 2.Synthèse des caractéristiques physiques du sédiment

<b>Caractérisation</b>	<b>Sédiment</b>	<b>Standard</b>
Argile (< 2 µm)	1,80	
Limon (2 - 63 µm)	30,57	NF ISO 13320-1
Sable (> 63 µm)	67,41	
limite de liquidité LL (%)	63,54	
limite de Plasticité Wp (%)	49,13	NF P94-051
indice de plasticité Ip (%)	14,41	
Bleu de méthylène (VBS)	1,3 g/100g	NF P94-068
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2,39	NF EN 1097-7
MO (450 °C) (%)	13,15	XP P94-047
Teneur en eau (%)	22,34	NF P94-050

Du point de vue du secteur de valorisation envisagé, la norme XP P 13-901 [131], permet de classer les matériaux selon leurs caractéristiques physiques. Le sédiment MEL se positionne donc dans la classe des sols B2 (matériau acceptable avec un léger déficit de fines).

Les résultats présentés ci-dessus, concernant le sédiment MEL, montrent que ses propriétés sont loin de satisfaire les normes et recommandations à utiliser dans la fabrication du BTC. Par conséquent, ces sédiments ne peut être utilisés tels quels et doivent être corrigés pour être éligibles à l'utilisation du BTC. Afin de satisfaire aux critères de distribution granulométrique de la norme NF XP P13-901[126], le sédiment est stabilisé par les cendres volantes. Une étude est ensuite réalisée pour vérifier les propriétés du mélanges (sédiments – cendres volantes) selon les recommandations. La Figure 3. 5 présente la distribution granulométrique des mélanges sédiments, cendres volantes et la gamme déduite des normes NF XP P13-901[126] (lignes pointillées). La courbe granulométrique du mélanges (90SD10CV ,80SD20CV) est bien positionnée sur la gamme (plus de 70%).

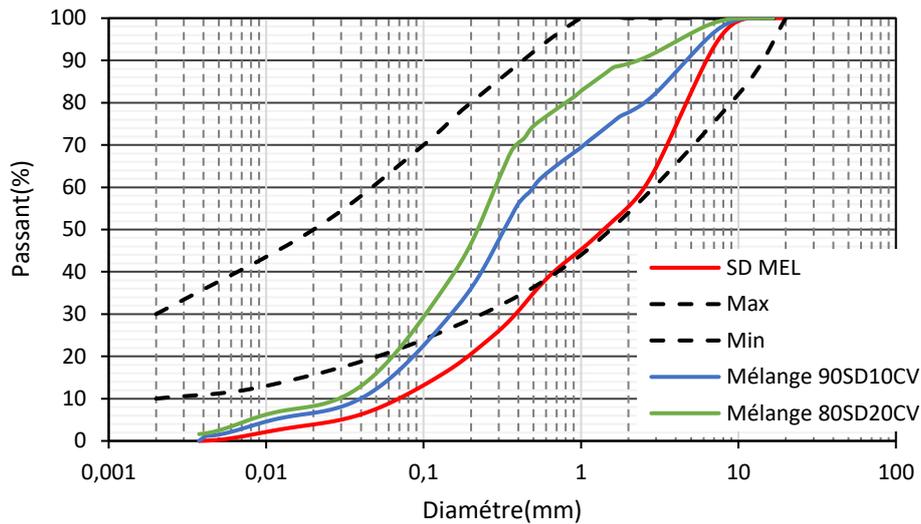


Figure 3. 5. Distribution de la taille des mélanges sédiments et cendres volantes

Les effets des cendres volantes sur la limite liquide, la limite plastique, l'indice de plasticité du mélange sont montrés dans la Figure 3. 6. Les résultats montrent que la limite de liquide et l'indice de plasticité sont diminués avec l'ajout des cendres volantes. Il peut être considéré que le sédiment MEL devient non-plastique sur l'addition d'environ 20% de cendres volantes. Ce changement de classification des sédiments. Dû au fait que lorsque les cendres volantes sont mélangées au sédiment et à l'eau, une série de réactions conduit à la dissociation de la chaux (CaO) présente dans les cendres volantes, la chaux libre réagit de manière pouzzolanique avec l'argile y compris l'échange d'ions et des réactions de floculation associé cette réaction réduit la plasticité du sédiment [141].

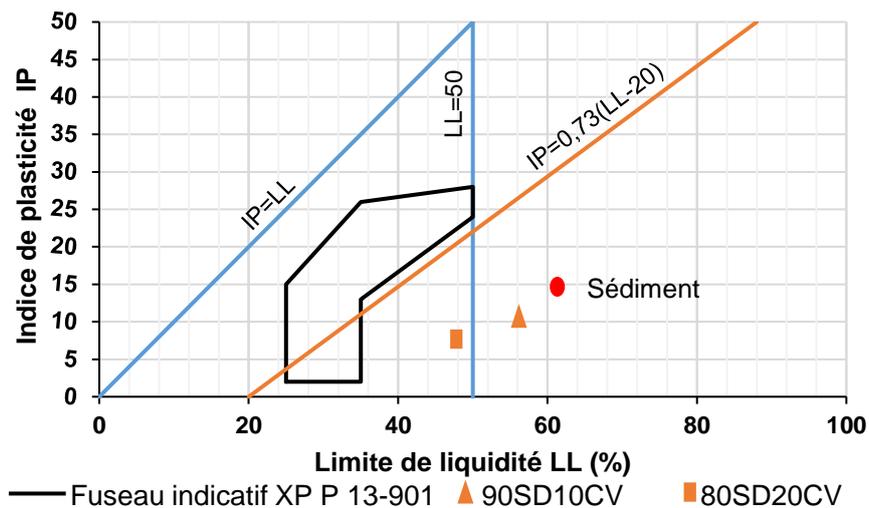


Figure 3. 6. Limites d'Atterberg du mélange et plage de recommandations.

### 3.1.2 Caractérisation physico-chimique

#### 3.1.2.1 Analyse par fluorescence des rayons X

La fluorescence des rayons X est une technique utilisée pour l'analyse de la composition chimique des matériaux minéraux. Cette technique d'analyse comprend deux parties: l'une est une source d'excitation qui provoque l'émission d'un spectre de rayons X caractéristique de la composition de l'objet, l'autre est un détecteur et analyseur de rayonnement qui identifie les raies composant le spectre. Elle permet non seulement de déterminer les éléments chimiques présents dans un matériau, mais aussi de déterminer leur quantité respective.

Les résultats des analyses des sédiments de dragage sont récapitulés dans le Tableau 3. 3. Ce dernier donne les principaux oxydes constituant des sédiments. Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  élevé (>3) et la somme de  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3 >75\%$  sont en accord avec les recommandations pour les BTC [143]. Tous les composants des sédiments de dragage sont généralement considérés comme étant relativement inertes et non réactifs.

Tableau 3. 3.Composition chimique de sédiment

Oxyde	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Sédiment	51,95	11,15	13,29	4,72	0,67	3,84	1,66	0,08	0,50

Une représentation courante des matériaux présentant ce type de composition correspond au diagramme triangulaire CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, également nommé diagramme de Rankin-Wright [144]. Le positionnement sédiment de dragage étudié sur ce diagramme est donné par la Figure 3. 7.

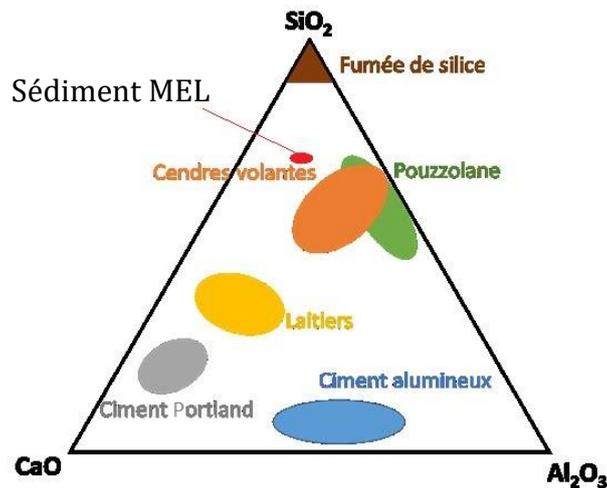


Figure 3. 7.localisation des sédiments étudiés dans le diagramme CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (adapté par Nonat et al [145].

### 3.1.2.2 Analyse MEB/EDX de sédiment

Les images MEB donne la taille, la forme, la composition, la cristallographie et d'autres propriétés physiques et chimiques d'un matériau.

L'image de microscopie électronique à balayage (MEB) du sédiment présenté dans la Figure 3. 8, montrant que le sédiment a tendance à avoir une structure de surface uniforme et rugueuse et des fissures induites par le retrait de dessiccation. La morphologie des particules de sédiments en microscopie électronique à balayage est assez proche des assemblages observés par M. Jaditager [146]. Le spectrogramme EDX présente la composition chimique de sédiment de dragage Figure 3. 8 montre que les éléments Si,C, O, Al, Ca, Mg, et Fe sont les composés les plus présents dans le sédiment.

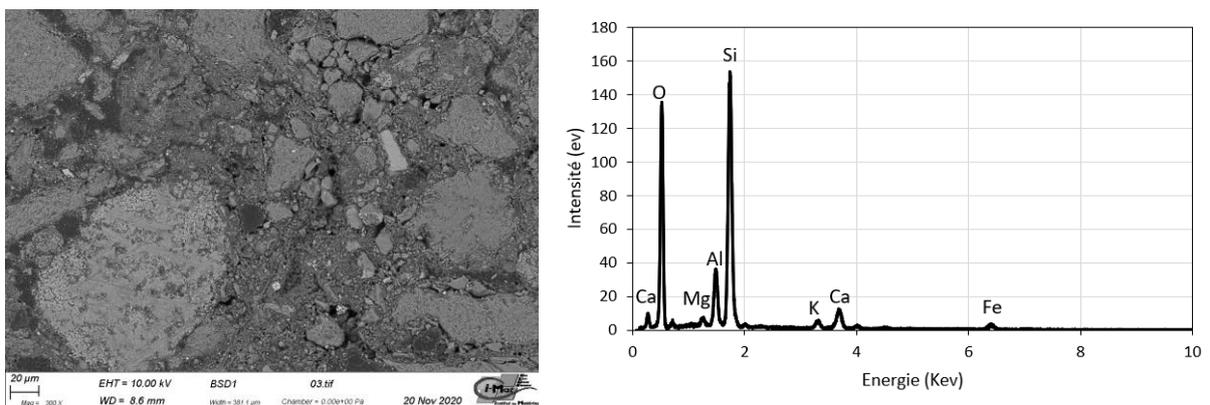


Figure 3. 8.Analyse SEM-EDS avec balayage de surface du sédiment

### 3.1.2.3 Détermination des phases cristallines par diffraction aux rayons X

La diffraction des rayons X a été utilisée pour la détermination des phases cristallines des sédiments. La Figure 3. 9 montre que le principal constituant est le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), ce qui cohérent avec la composition chimique qui a montré que  $\text{SiO}_2$  est l'oxyde majoritaire. En plus du quartz, les diagrammes montrent que le sédiment contient aussi des phases argileuses kaolinite, illite, calcite.

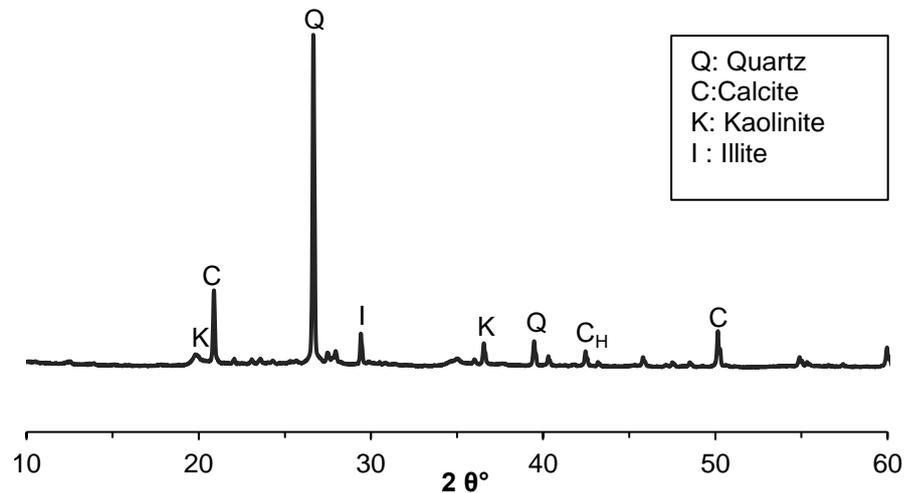


Figure 3. 9. Phases cristallines de sédiment de MEL

### 3.1.3 Caractérisation environnementale

L'acceptabilité de sédiment comme matériau alternatif dans la fabrication de briques, dépend de ses caractéristiques physiques et minéralogiques, mais essentiellement de son comportement environnemental. En effet, pour que cette valorisation soit acceptée, il est indispensable de s'assurer que le sédiment n'a pas un effet néfaste sur l'environnement. La caractérisation environnementale a été réalisée à l'aide de tests de lixiviation normalisés [129], ce référentiel permet d'identifier les possibilités de valorisation des matériaux dangereux ou non inertes sur la base des seuils de lixiviation.

#### 3.1.3.1 Essai de lixiviation

L'analyse environnementale des sédiments concerne essentiellement les métaux lourds, les PCB et HAP. Dans le cadre de cette étude, et selon la valorisation envisagée, l'évaluation de l'impact environnemental de sédiments brut a été étudiée selon le test de lixiviation NF EN 12457-2[129]. Les seuils de référence utilisés ont été définis conformément aux recommandations du guide SETRA[147].

Les résultats des tests de lixiviation sont présentés dans le Tableau 3. 4. Le bilan environnemental des sédiments montre que les concentrations de métaux lourds ne

dépassent pas les seuils pour que le matériau puisse être utilisé dans les briques de terre comprimée. On constate les valeurs élevées de PCB placent les sédiments parmi les déchets non inertes non dangereux conformément à la décision européenne 2003/33/CE. Néanmoins, il est à préciser que ces seuils ont été spécifiquement élaborés pour établir des critères d'acceptation des déchets dans les zones d'enfouissement. En revanche, il n'existe actuellement aucun seuil spécifique pour la valorisation des sédiments de dragage dans les matériaux de construction.

Tableau 3. 4.comportement à la lixiviation de sédiment MEL

Bilan environnemental (Essai de lixiviation NF EN 12-457-2)		
Éléments	Sédiment MEL (mg/kg ms)	Seuils (mg/kg ms)
Arsenic (As)	0,05	0,5
Baryum (Ba)	0,35	20
Cadmium (Cd)	0,004	0,04
Chrome (Cr)	0,012	0,5
Cuivre (Cu)	0,4	2
Mercure( Hg)	0,0005	0,01
plomb(Pb)	0,1	0,5
Molybdène (Mo)	0,063	0,5
Nickel (Ni)	0,1	0,4
Sélénium (Se)	0,039	0,1
Zinc (Zn)	0,21	4
Chlorure (Cl)	24	800
Sulfate (S)	554	1000
Fraction soluble	2320	4000
pH	7,4	5,5-13
Conductivité électrique μS/cm	404	-
COT	73000	30000
BTEX	0,25	6
PBC	46	1
HAP	20	50

### 3.2 Caractérisation des cendres volantes

Les sédiments de dragage présentent des caractéristiques mécaniques généralement faibles. Pour améliorer compacité granulaire et la cohésion des grains de sédiments, il faut envisager l'ajout de stabilisant physico-chimique. Pour cela, les cendres volantes, de plus en plus abondant, a été valorisé pour être ajouté aux sédiments pour la formulation des BTC. Les cendres volantes utilisées pour la stabilisation des BTC proviennent d'une centrale thermoélectrique et fournies par la société SURSCHISTE (Lens, France). Une image de microscopie électronique à balayage (MEB) des cendres volantes est présentée dans la Figure 3. 10, montrant la forme sphérique des particules de cendres violentes, avec un diamètre moyen estimé à environ 11,64  $\mu\text{m}$ .

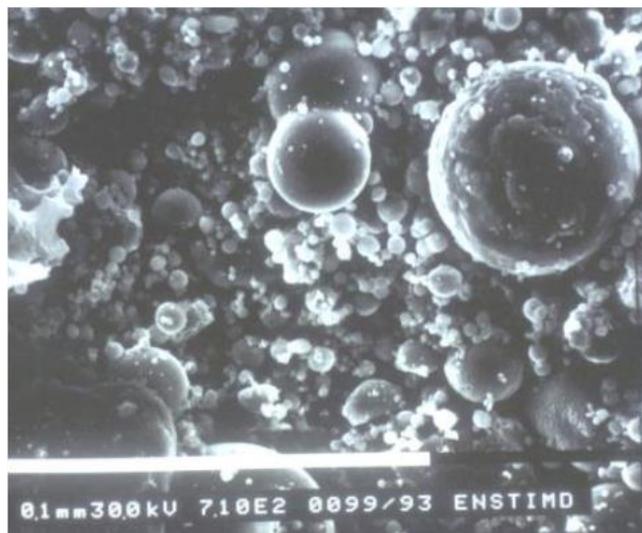


Figure 3. 10. Image MEB des cendres volantes

La distribution granulométrique obtenue par diffraction laser pour les cendres volantes est présentée aux Figure 3. 11. Les cendres volantes apparaissent plus fin que le sédiment étudié à l'état brut. En fait, il est reconnu que, pour les cendres volantes de centrales thermiques au charbon, entre 62 et 92% des particules sont inférieures 45  $\mu\text{m}$  [148]. Les cendres volantes utilisées dans cette étude se rapproche des données de la littérature puisque près de 70% des particules ont un diamètre inférieur à 45  $\mu\text{m}$ . A l'œil nu, on peut identifier quelques particules grossières. Celles-ci correspondent probablement au carbone non brûlé, que l'on retrouve fréquemment dans les cendres volantes des centrales thermiques au charbon. Le taux de présence varie en fonction de la nature du charbon et de l'efficacité du processus industriel.

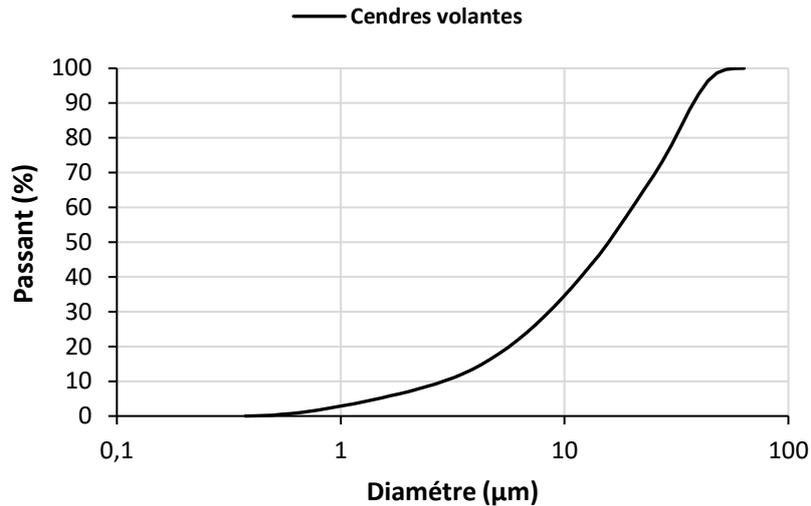


Figure 3. 11.Distribution de la taille des cendres volantes

La composition chimique des cendres volantes a été déterminée par analyse spectrométrie de fluorescence X et présentée dans le Tableau 3. 5 . Les cendres volantes sont caractérisées par une masse d'oxyde de silice et d'alumine d'environ 77% et une teneur en calcium suffisamment faible pour la classer dans le type F (<5%) selon la norme [149].

Tableau 3. 5.Composition chimique de cendres volantes

Oxyde	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Cendres volantes (%)	55	22	3	8,55	0,62	2	3	0,52	1

### 3.3 Processus de stabilisation

#### 3.3.1 Teneur en eau optimale

La méthode de stabilisation utilisée dans cette étude, tient compte de la densité absolue des différents matériaux de base (sédiments, cendres volantes). La teneur en eau optimale des différents mélanges secs a été déterminée par l'essai de compactage Proctor standard [150]. Le principe de cet essai consiste à compacter le matériau à différentes teneurs en eau selon un processus et une énergie donnée. Pour chaque teneur en eau, on mesure la masse volumique humide ensuite on détermine la masse volumique sèche du matériau. A partir de la relation établie entre la teneur en eau et la densité sèche, les caractéristiques de compactage (la densité sèche et la teneur en eau optimale) sont déterminées. Les résultats sont montrés dans la Figure 3. 12 . L'augmentation de la teneur en cendres

volantes a généré une teneur en eau optimale plus élevée et une diminution de la densité, due à la faible masse volumique des cendres volantes par rapport à celle du sédiment. Cette teneur en eau optimale sera utilisée pour formuler les BTC.

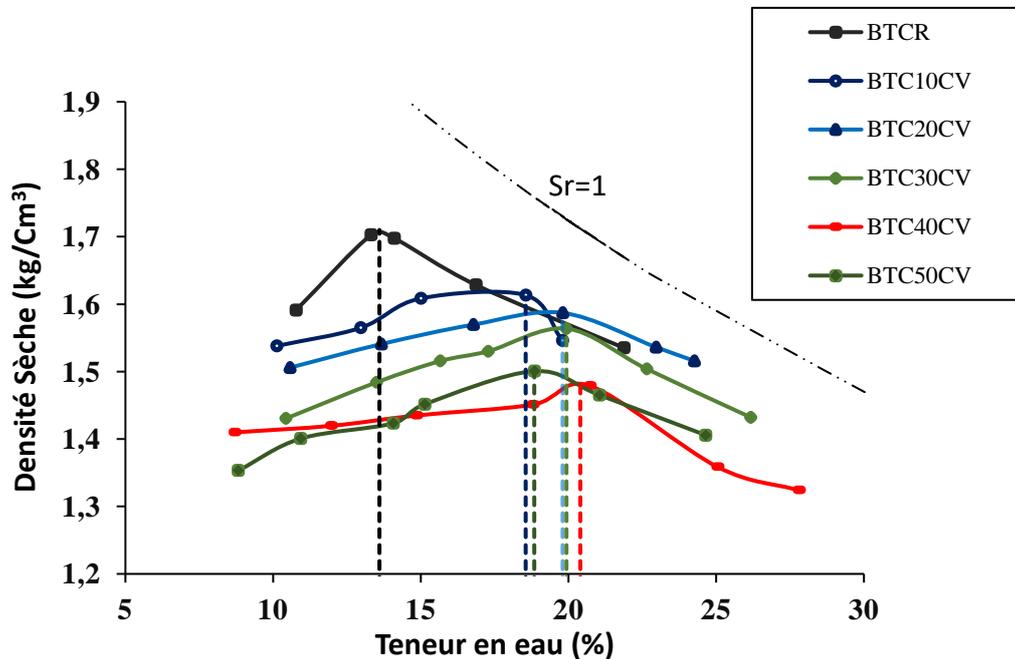


Figure 3. 12.Teneur en eau optimale des mélanges secs.

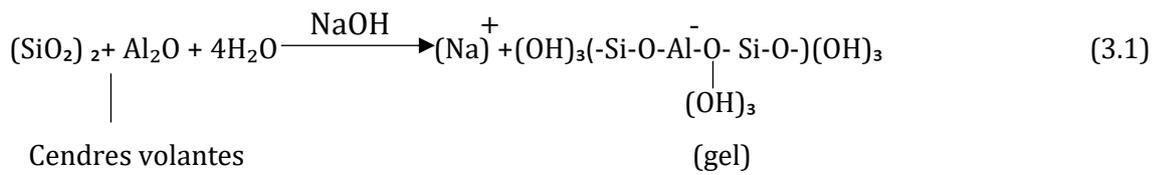
### 3.3.2 Stabilisation chimique

Pour une stabilisation appropriée du BTC, un liant géopolymère à base de cendres volantes pour cette étude a été synthétisé en mélangeant le matériau source d'alumine-silicate, les cendres volantes (classe F) avec la solution d'activation alcaline (NaOH).

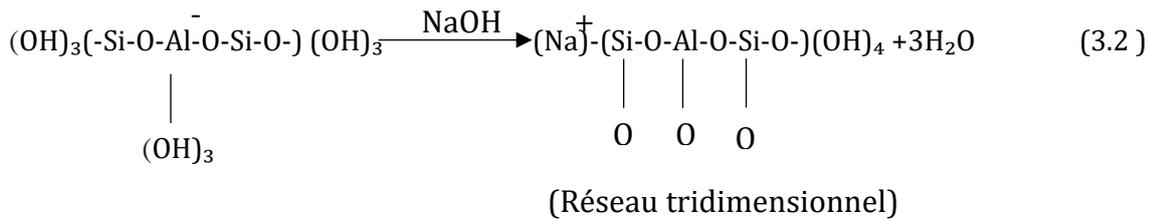
La concentration appropriée de la solution d'hydroxyde de sodium est importante pour déterminer la qualité du liant géopolymère à base de cendres volantes. Khale et Chaudhary [151] ont conseillé, afin d'activer les particules de la source d'aluminosilicate, les cendres volantes un alcali fort tel que l'hydroxyde de sodium (NaOH) à 8 Mol.

En entrant en contact avec la solution alcaline d'hydroxyde de sodium (NaOH), les cendres volantes de classe F se dissolvent dans la solution alcaline par des réactions chimiques exothermiques. La dissolution des cendres volantes (le matériau source d'aluminosilicate) par la solution alcaline d'hydroxyde de sodium est gouvernée par des réactions chimiques exothermiques et géopolymériques (équation 3.1et équation 3.2). Celles-ci a été décrite par Zerfu et al[152]. OÙ, la création subséquente de gel géopolymère sous forme de silicium et d'aluminium.

Équation exothermique :



Équation géopolymérique :



La première phase de la réaction chimique de formation du matériau géopolymère à base de cendres volantes (c'est-à-dire la dissolution des cendres volantes) donne un gel géopolymère. OÙ, le réseau tridimensionnel du géopolymère est formé pendant la seconde phase du processus de géopolymérisation qui se produit par un processus de dissolution, de réorientation et de condensation.

### 3.4 Préparation de BTC

La préparation du mélange pour produire les BTC a été effectuée en deux étapes en utilisant un malaxeur normalisé pour homogénéiser les mélanges. Après homogénéisation du mélange sec (sédiment et cendres volantes) pendant 7 minutes à vitesse lente, s'ensuit le malaxage humide par l'addition de la solution d'activation alcaline préparée avec la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor et de l'hydroxyde de sodium 8M pendant 3 minutes à vitesse lente. Les mélanges résultants ont été compactés en utilisant une presse INSTRON (INSTRON-3369) avec un compactage statique à une pression de 40 bars (Figure 3. 13). Les moules métalliques cylindriques utilisés étaient équipés de 3 cales de différentes hauteurs. La compression statique a été réalisée en 3 états avec un système de cales métalliques de compression de plus en plus petites utilisées à chaque phase. Cette méthode permet d'obtenir progressivement la dimension finale de l'échantillon selon la norme NF P 94-100 [130]. Après la compression de l'échantillon, la charge a été maintenue pendant 10 secondes, puis les éprouvettes ont été retirées des moules à l'aide d'un piston.

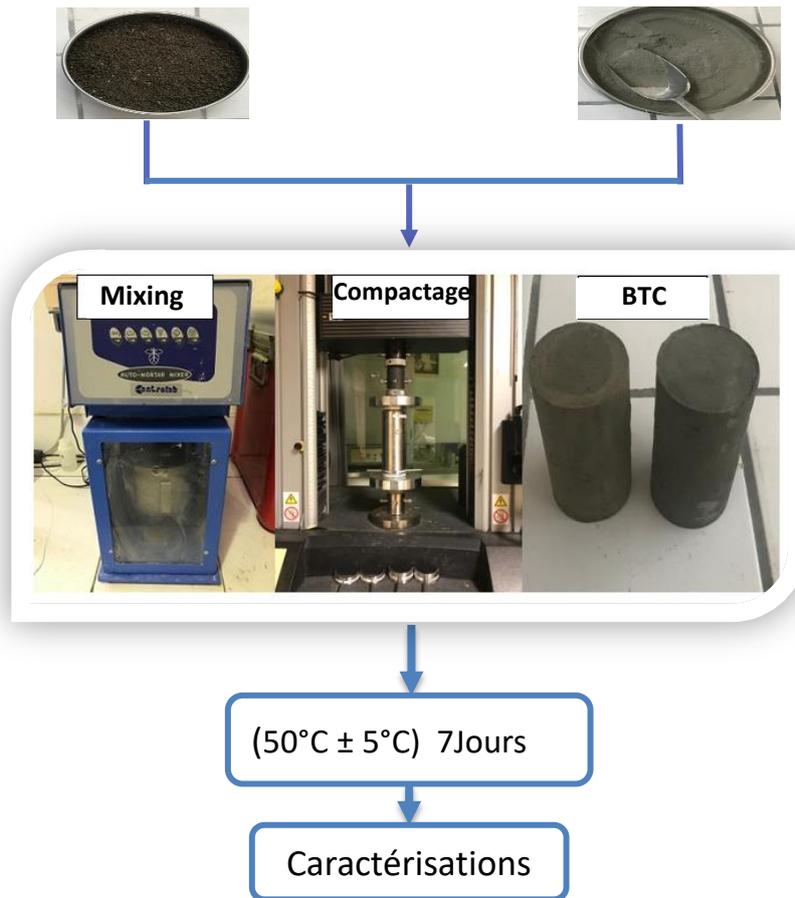


Figure 3. 13.Confection des échantillons

Le Tableau 3. 6. Composition des mélanges montre pour chaque mélange de BTC, les pourcentages respectifs des compositions en termes de teneur en sédiment, cendres volantes et solutions.

Tableau 3. 6. Composition des mélanges

Materiaux	BTCR	BTC10CV	BTC20CV	BTC30CV	BTC40CV	BTC50CV
Sédiment (%)	100	90	80	70	60	50
Cendres volantes (%)	0	10	20	30	40	50
Eau*/matière sèche(%)	0,1409	0,1855	0,2187	0,1993	0,207	0,1884
Concentration de NaOH (M)	8	8	8	8	8	8

\*Teneur en eau (%)

### 3.5 Conclusions

Le sédiment brut MEL a été caractérisés du point de vue physique, géotechnique, minéralogique et environnemental. Conformément à la norme XP P 13-901[131], le sédiment MEL se positionne comme un matériau acceptable avec un léger déficit de fines corrigé par l'ajout de cendres volantes. Sa densité absolue ( $2,63 \text{ g/cm}^3$ ) est comparable à celle des matériaux standards, la plasticité de ses fines le rend sensible à l'eau et sa teneur en matière organique est élevée. Son utilisation comme matériaux de base pour le BTC nécessite un traitement. L'analyse de diffraction des rayons X a fait ressortir qu'ils sont majoritairement composés de quartz et de calcite. Les cendres volantes de classe F utilisées pour la stabilisation ont de bonnes caractéristiques physiques, mécaniques et minéralogiques qui permettent de jouer sur la composition du mélange sédiments-cendres volantes. Cependant, les sédiments sont souvent sous forme de boue dans leur état initial. Avec l'ajout de cendres volantes, la teneur en eau optimale aura tendance à diminuer. Enfin, la caractérisation environnementale de sédiment a montré la possibilité d'utilisation de ce sédiment pour la fabrication de blocs de terre comprimée, en se basant sur l'essai de lixiviation.

## **Chapitre 4 : Caractérisation des blocs de terre comprimée**

---

## ***Chapitre 4 : Caractérisation des blocs de terre comprimée***

---

Ce chapitre présente les résultats de l'étude des effets de la stabilisation chimique par les liants alcali-activés sur les propriétés des BTC à base de sédiments. L'objectif est d'améliorer les performances des BTC produites à partir des sédiments qui sont susceptibles de présenter de faibles performances en absence de stabilisateur. Pour ce faire, la teneur en cendres volantes des BTC est variée entre 0% et 50% pour optimiser la stabilisation des BTC. Ensuite, ces dernières sont caractérisées pour mesurer les propriétés chimiques et minéralogiques à travers l'analyse MEB, FTIR, XRD. Leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques aussi sont mesurées.

### **4.1 Propriétés microstructurales**

#### **4.1.1 Observation des images MEB**

Les images MEB des briques (BTCR, BTC10CV, BTC40CV et BTC50CV) sont montrées dans la Figure 4. 1. Les briques non stabilisées (a) ont tendance à avoir une structure très poreuse avec des particules apparentes de sable et de limon. On observe aussi des fissures, qui sont dues au retrait de dessiccation selon Jaditager et al [121]. La Figure 4. 1 (b,c,d) révèle que les microstructures des briques stabilisées (b,c,d) montre la densification de la microstructure par des effets physiques (compactage) et chimiques (géopolymérisation). Ainsi, la cohésion entre les grains de sédiments se renforce avec l'ajout de cendres volantes. La Figure 4. 1 (c,d) indique que les BTC40CV, BTC50CV ont une structure plus compacte avec et des particules de cendres volantes partiellement dissoutes. On observe une densification de la matrice avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes. Ceci est cohérent avec les résultats expérimentaux rapportés dans la section 4.2, montrant une porosité plus faible pour le BTC50CV. Concernant les particules de cendres volantes non réagies ou partiellement dissoutes qui sont apparentes sur les BTC stabilisés, il est bien décrit dans la littérature que la dissolution complète des cendres volantes dans une solution alcalin (NaOH) n'est pas réalisable. Adam [153] a conclu que les particules de cendres volantes qui n'ont pas réagi et qui sont partiellement dissoutes constituent une proportion non négligeable du volume total du liant géopolymère et qu'elles sont censées avoir un effet favorable sur la résistance mécanique. Ces particules non réagies ou partiellement dissoutes agissent probablement comme des éléments de remplissage dans la matrice sédiments-cendres volantes. Par conséquent, ces modifications de la microstructure de matrice engendrées par l'ajout de cendres volantes

ont un impact significatif sur le comportement physique, mécanique et de la durabilité des briques. Les changements microstructuraux observés des briques stabilisés sont attribués à la formation de gels géopolymères qui renforcent les liaisons entre les particules de sédiments.

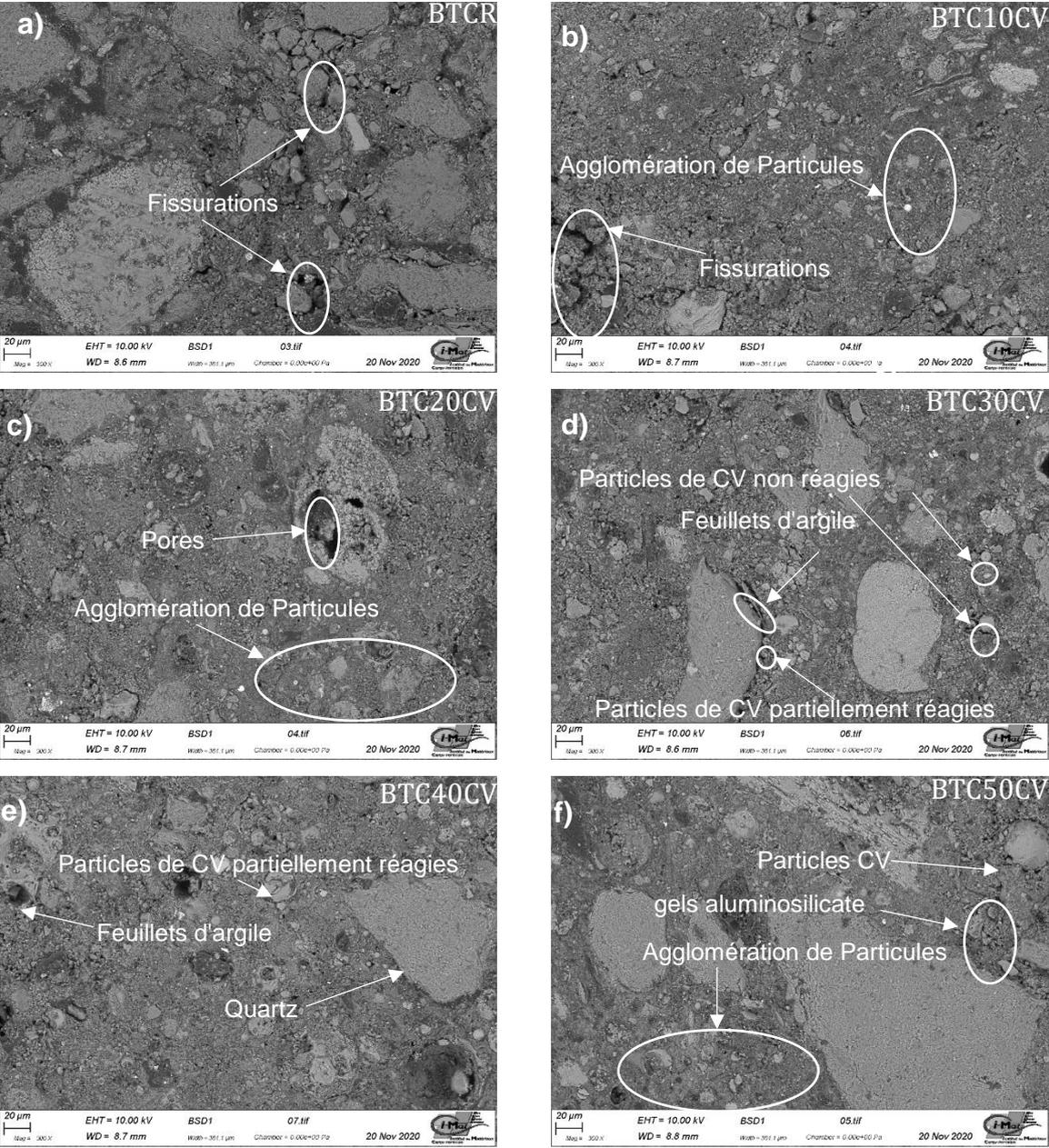


Figure 4. 1. Images MEB des BTC

#### 4.1.2 Analyse par spectrométrie infrarouge

L'analyse par FTIR a été réalisée sur les différentes briques afin de mettre en évidence les liaisons chimiques dans la matrice. Les échantillons de briques non stabilisées ont montré des variations de pics autour du nombre d'onde  $1020\text{ cm}^{-1}$  qui peut être lié à une liaison Al-O qui traduit la présence d'alumines (Figure 4. 2). Le pic de  $1400\text{ cm}^{-1}$  est associé à une liaison C-O. Une bande d'absorption de l'eau a été enregistrée à  $1642\text{ cm}^{-1}$  et  $3300\text{ cm}^{-1}$  pour la BTCR. On peut observer que dans le cas des briques stabilisées, les fréquences sont plus basses que ceux de la poudre de cendres volantes. Le pic de liaison Al-O s'est déplacé de  $1030$  à  $980\text{ cm}^{-1}$ . Le décalage de bande d'absorption est lié à la dissolution des particules de cendres volantes. Ce déplacement de la bande correspondant aux vibrations d'élongation des groupes Si-O-Si ou Si-O-Al vers des fréquences plus basses est dû à la formation d'un nouveau produit [154]. Ces phénomènes chimiques qui se produisent pendant la géopolymérisation des cendres volantes.

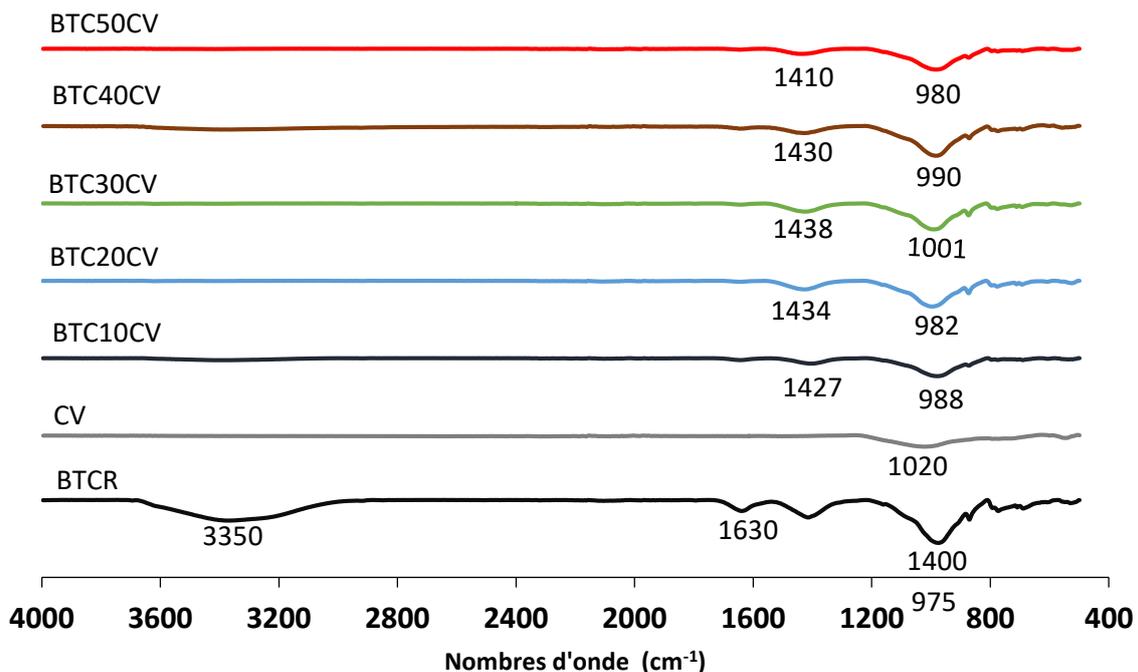


Figure 4. 2. Spectres FTIR des sédiments, cendres volantes et des différents BTC

#### 4.1.3 Diffractogramme des rayons x des échantillons BTC

L'analyse de la composition minérale par diffraction de rayons X des BTCR et BTC stabilisés par géopolymère à base de cendres volantes sont présentés dans la Figure 4. 3. Elle montre les diffractogrammes des BTC stabilisés et non stabilisés à 28 jours de cure. On observe que le sédiment présente de phases cristallines comme de quartz, des minéraux argileux : illite et kaolinite. En comparant la composition des phases minérales

des BTCR et BTC stabilisées par des géopolymères à base de cendres volantes, il est clair qu'il n'y a pas de variations notables entre BTCR et BTC stabilisés en termes cristallographie. Une petite bosse a été particulièrement observée dans les briques stabilisés dû à la formation de gel d'aluminosilicate. Cependant il faut noter que ces gels géopolymères formés (identifiés par FTIR) dans les BTC stabilisées sont amorphes, par conséquent ne sont pas bien identifiés par DRX.

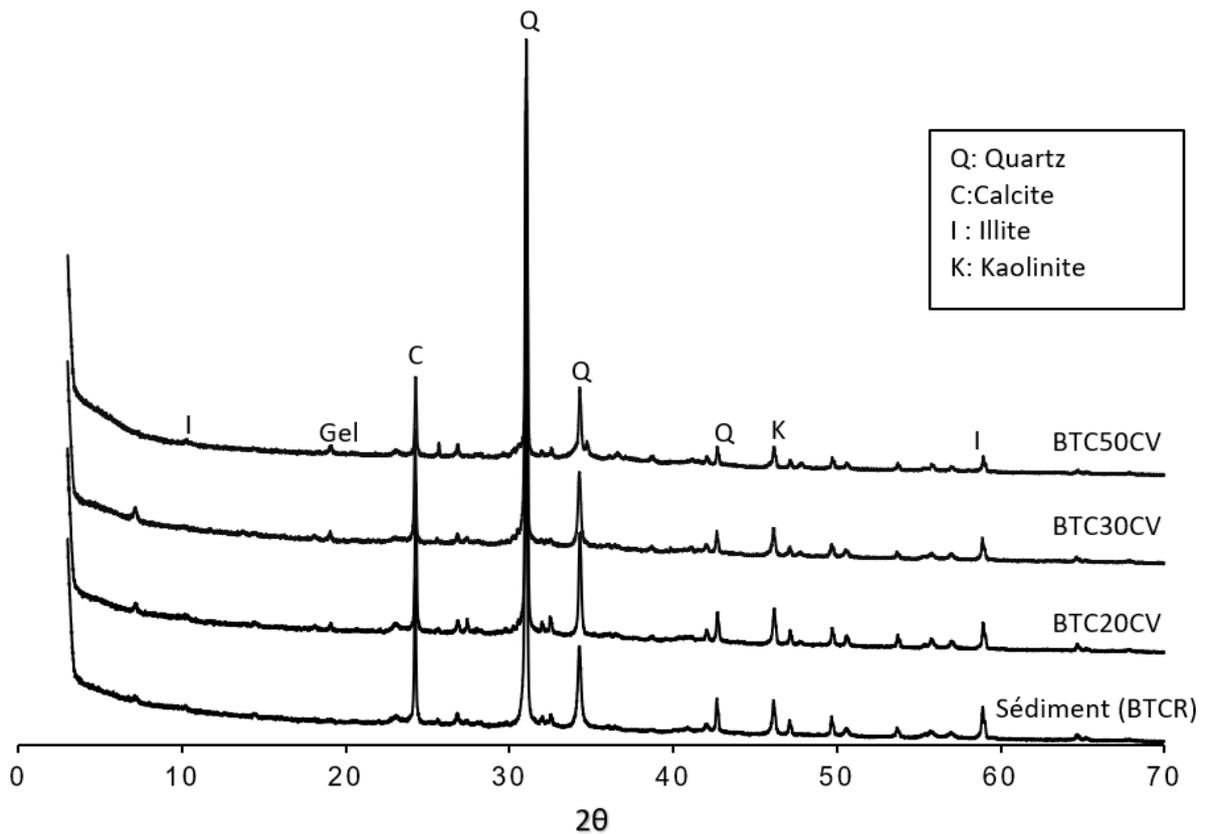


Figure 4. 3.Diffractogrammes des rayons X de BTC

## 4.2 Propriétés physiques

### 4.2.1 Porosité et densité

La porosité influence les performances mécaniques des briques de terre comprimée (BTC)[98]. La Figure 4. 4 présente les résultats de porosité et la densité des BTC confectionnées. La porosité est directement liée à la teneur en cendres volantes. Ainsi, elle diminue linéairement avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes. Ceci pourrait être expliqué par le fait que l'alcali-activation des cendres volantes a provoqué la précipitation de gels liant les particules, d'une part ; d'autre part, la présence de fines

particules de cendres volantes anhydres, confirmée par l'analyse MEB, permettant de remplir les vides inter-granulaires de sédiments de plus grandes dimensions (amélioration de la compacité granulaire). Comme la porosité, la densité apparente des blocs varie entre 1600 et 1850 kg/m<sup>3</sup> et est liée linéairement au taux de cendres volantes. La densité élevée des briques de terre stabilisée peut être considérée comme un inconvénient lorsque les blocs doivent être transportés sur de longues distances. Toutefois, cela n'a que peu d'importance lorsqu'ils sont produits sur le chantier ou à proximité de celui-ci. Par ailleurs les briques de terre comprimées de faible densité présentent un avantage par rapport aux briques de haute densité, car elles sont plus efficaces pour l'isolation thermique.[23], [80], [155].

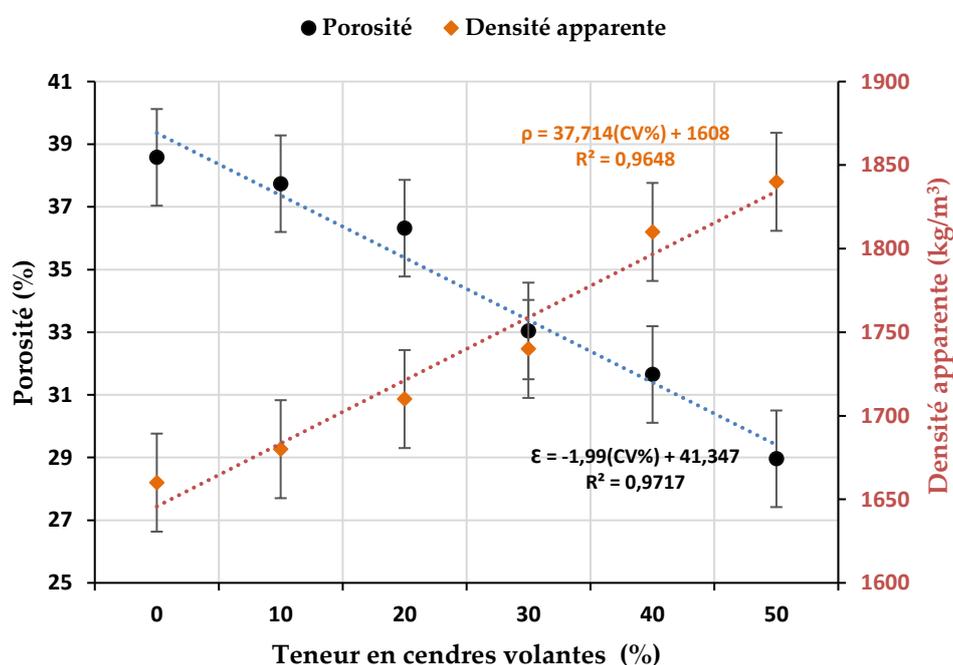


Figure 4. 4.La porosité et la densité apparente des échantillons de BTC en fonction de la teneur en cendres volantes.

#### 4.2.2 Coefficient d'absorption capillaire

La durabilité des briques est fortement influencée par la capacité d'absorption d'eau [156]. En effet, les briques de faibles capacité d'absorption sont plus durables et résistantes aux intempéries [157]. Les résultats du test d'absorption présentés dans la Figure 4. 5 montrent une absorption d'eau comprise entre 18,08 et 8,23 g/cm<sup>2</sup> min<sup>1/2</sup> pour les briques stabilisées. Dans le cas des briques non stabilisées, l'absorption d'eau est de 21,46 g/cm<sup>2</sup> min<sup>1/2</sup>. En général, le coefficient d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en géopolymère [158]. Ceci est observée sur ce qui justifie la

différence de 13% entre la BTCR non stabilisés et la BTC50CV. Ce phénomène confirme la relation présentée dans la Figure 4. 6 qui montre l'influence directe de la porosité sur la capillarité et par conséquent sur la résistance à l'eau.

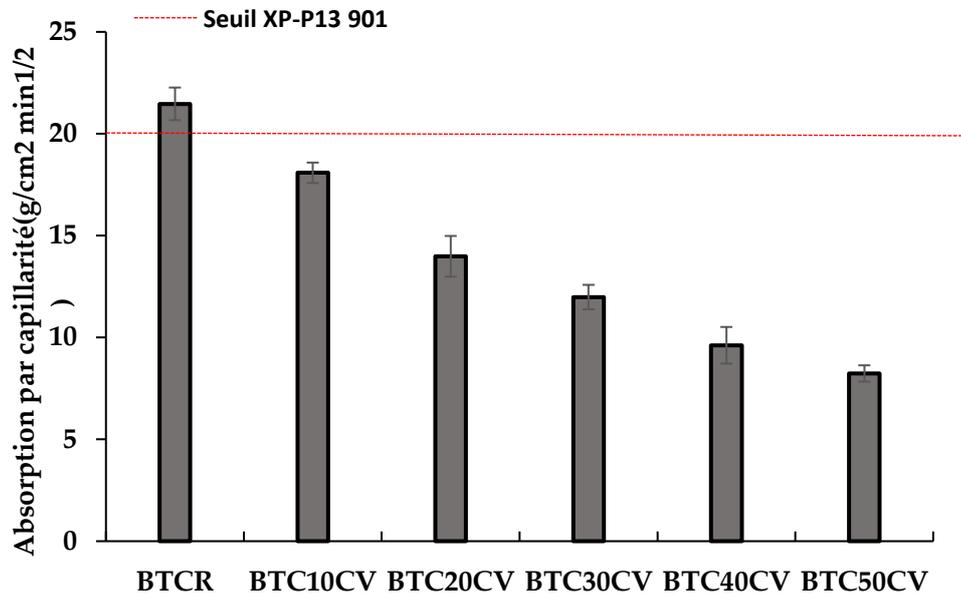


Figure 4. 5.Coefficient d'absorption d'eau par capillarité de différents BTC

En analysant l'évolution des coefficients d'absorption d'eau, la XP P13 901 [21] classe les briques deux catégories en fonction de leur coefficient d'absorption d'eau : donner les catégories selon les applications visées. Toutes les briques stabilisées peuvent être classées comme des « briques faiblement capillaire » inférieures à 20 g/cm<sup>2</sup> min<sup>1/2</sup> . Par conséquent, les briques stabilisées préparées dans cette étude répondent aux critères requis pour l'application à la construction de murs extérieurs.

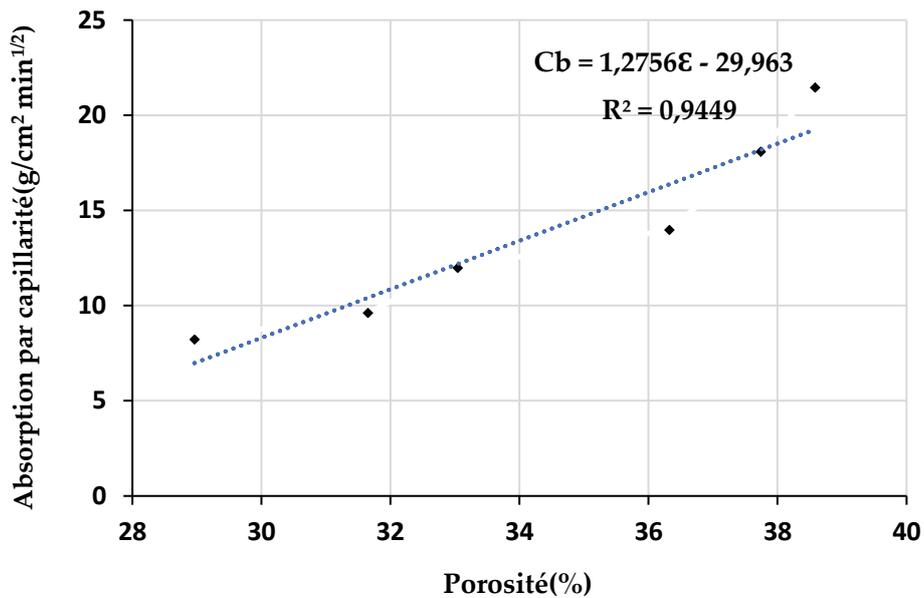


Figure 4.6. Coefficient d'absorption d'eau par capillarité en fonction de la porosité du BTC.

#### 4.2.3 Vitesse des ondes ultrasonores

Les valeurs moyennes de vitesse de propagation (VP) pour les BTC non stabilisées et stabilisées avec différentes teneurs en cendres volantes sont indiquées dans la Figure 4.7 on constate que pour toutes les BTC, la VP augmente avec la teneur en cendres volantes. En effet, les valeurs de la VP des BTC varient entre 850 et 2300 m/s. En outre, les valeurs de VP de BTC10CV, BTC40CV et BTC50CV augmentent de 11%, 46%, 85%, 102% et 126% respectivement, par rapport aux BTC non stabilisées BTCR. La raison de l'augmentation de la VP avec la teneur en cendres volantes est attribuée à la diminution de la porosité avec la formation du gel géopolymère. Ces observations sont en accord avec celles de Toufigh et al[159].

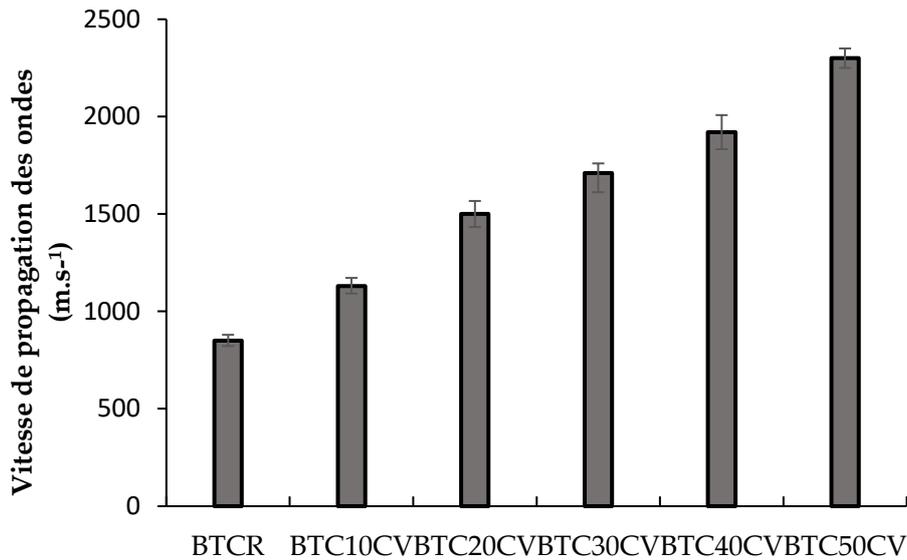


Figure 4. 7.La vitesse de propagation des ondes des BTC.

- Relation entre les propriétés physiques et la VP

Les relations entre les propriétés physiques (densité, porosité ouverte, absorption d'eau) et la VP des BTC avec les teneurs en cendres volantes sont présentées dans cette partie.

La relation entre la porosité et la VP pour les différents BTC est illustrée à la Figure 4. 8. Une forte corrélation linéaire existe avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,97. On peut remarquer que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les BTC dépend de la porosité des échantillons.

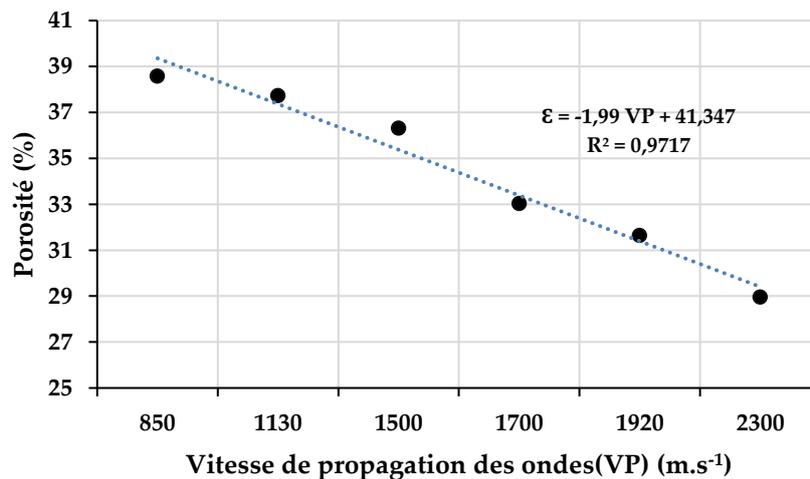


Figure 4. 8.Relation entre la porosité et la VP

Comme on peut le voir sur la Figure 4. 9 pour toutes les BTC, la VP est corrélée linéairement avec la densité du BTC, elle est influencée par la microstructure. En effet, les

ondes ultrasonores se déplacent plus rapidement dans un milieu plus dense que dans un milieu moins dense et poreux. Des tendances similaires concernant la densité du BTC et la VP ont été observées dans la littérature [160].

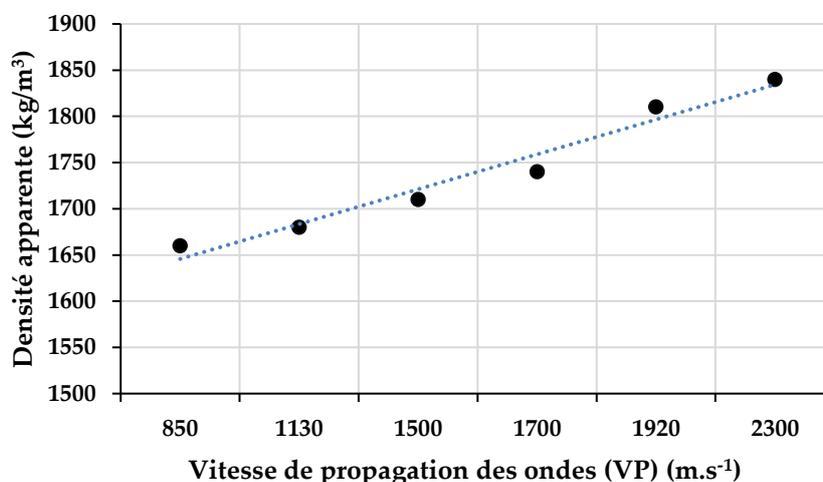


Figure 4. 9. Relation entre la densité et la VP

### 4.3 Propriétés mécaniques

#### 4.3.1 Résistance à la compression à l'état sec et humide

La résistance à la compression des BTC est présentée dans la Figure 4. 10. La résistance à la compression sèche des BTC non stabilisées était la plus faible avec une valeur moyenne de 2,4 MPa par rapport à 11,6 MPa pour la BTC50CV. On constate que la résistance mécanique augmente avec la teneur en cendres volantes. L'amélioration des performances mécaniques est liée à la formation de phases amorphes qui assurent la liaison des particules de sédiments entre elles et rendant les briques plus compactes et plus résistantes. Le liant géopolymère a produit des gels après une réaction entre la solution alcaline NaOH et l'aluminosilicate des cendres volantes. En effet, les cendres volantes se dissolvent dans une solution d'hydroxyde de sodium et libèrent un grand nombre de composés  $\text{SiO}(\text{OH})^{3-}$  et  $\text{Al}(\text{OH})^{4-}$  [7], [154], [161]. En raison de la forte concentration de la solution alcaline (8 mol), les gels produits sont constitués d'un large réseau tridimensionnel d'aluminosilicate qui lie les particules de sédiments. La quantité de gels formés dépend de la quantité de liant (cendres volantes et de la teneur en NaOH). Ceci explique partiellement le fait que les meilleures résistances mécaniques ont été obtenues avec les teneurs les plus élevées en cendres volantes (BTC40CV et BTC50CV). En effet, toutes les BTC stabilisées au moins 20% de cendres volantes ont une résistance

à la compression supérieure à 4MPa recommandée par la norme XP13-901 [21] pour les constructions en terre. Cependant, on a constaté une diminution significative de la résistance à la compression à l'état humide (immersion préalable de 2h) par rapport à la résistance à la compression à l'état sec d'environ 50 %. La résistance à la compression humide du BTC non stabilisé n'a pas pu être déterminée à cause de la désagrégation pendant immersion dans l'eau.

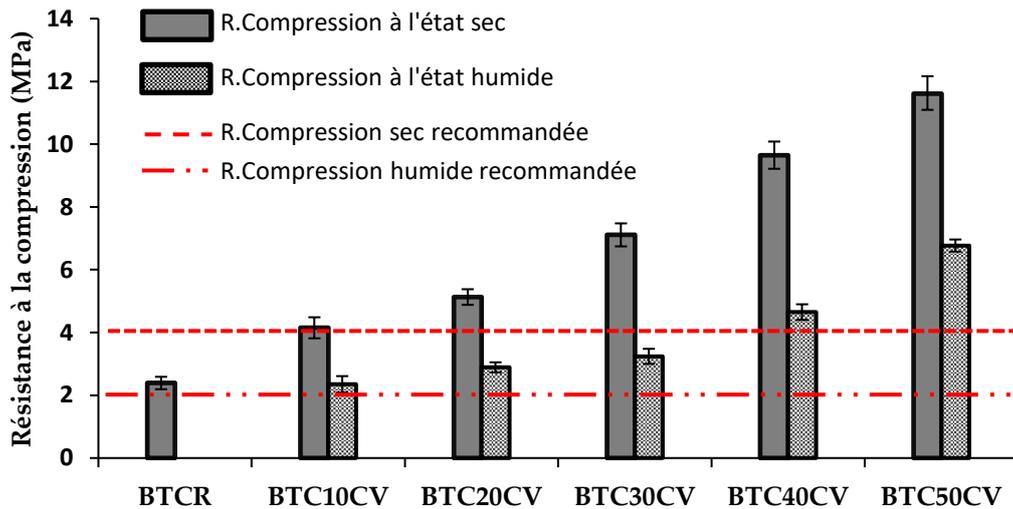


Figure 4. 10.Résistance à la compression à l'état sec et à l'état humide du BTC après 28 jours.

Les normes [20], [21] classent les briques de terre comprimée en deux catégories : les briques de terre comprimée dont la résistance à la compression supérieur 4 MPa pour la Rc sec et 2 MPa pour la Rc humide, utilisées pour les murs porteurs, et celles dont la résistance à la compression est inférieur à 4 et 2 MPa pour les murs non porteurs. Sur la base des résistances à la compression sèche et humide, les BTC stabilisée avec au moins 20 % de cendres volantes conviennent à la construction de murs porteurs et les BTC stabilisée avec 10 % de cendres volantes est applicable pour la construction de murs non porteurs.

#### 4.3.2 Résistance à la traction

En plus de la résistance à la compression, la résistance à la traction des BTC a été caractérisée. Celle-ci est déterminée par un essai de traction indirect par fendage.

L'analyse des résultats présentés dans la Figure 4. 11 indique que la résistance à la traction des BTC est d'environ 10% de la résistance à la compression, ce qui est en accord avec les résultats de Gonzalo et al.[162] où la résistance à la traction varie de 5% à 12% de la résistance à la compression. La résistance en traction la plus élevée a été observée dans les briques BTC50CV avec 1,2 MPa, la résistance à la traction la plus faible étant de 0,4 MPa dans le cas des BTC non stabilisées. L'ajout de cendres volantes augmente progressivement la résistance à la traction des briques, ce qui a également été observé dans les résultats de l'essai de résistance à la compression. Cependant, cette faible résistance est largement due à la facilité avec laquelle les fissures peuvent se propager sous des charges de traction [163].

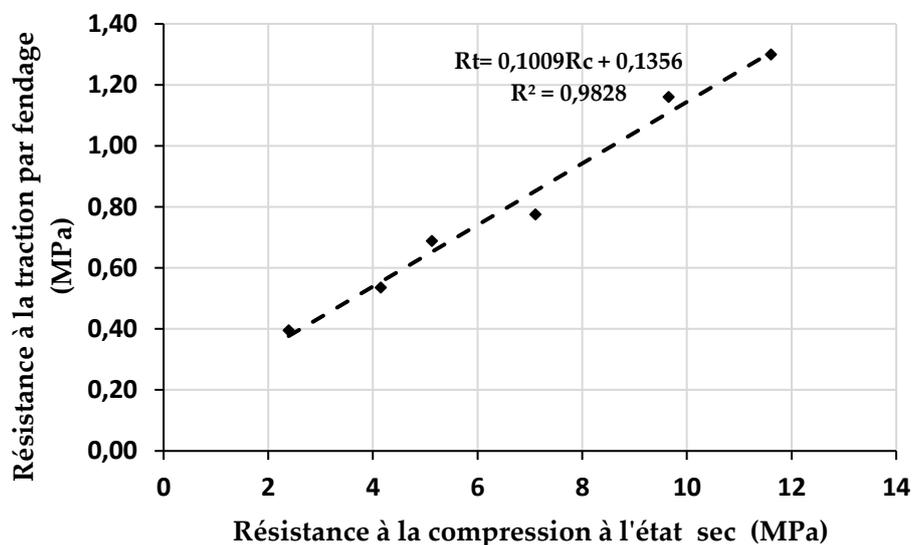


Figure 4. 11.Résistance à la traction du BTC

#### 4.3.3 Relations entre les propriétés mécaniques et physiques

- Relation entre la résistance à la compression et la densité

La relation entre la résistance à la compression et la densité apparente des blocs de terre comprimée joue un rôle important dans la détermination de la qualité des BTC. La Figure 4. 12 montre la relation entre la résistance à la compression et la densité ; pour toutes les BTC, la résistance à la compression augmente linéairement avec la densité.

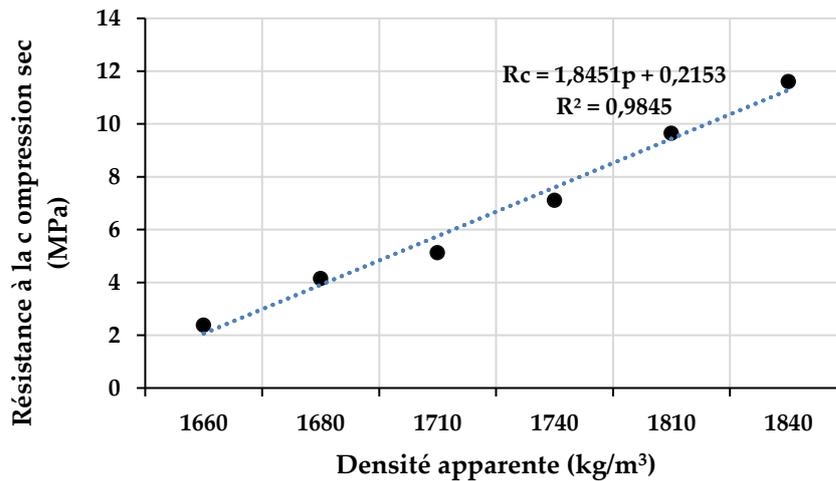


Figure 4. 12.Relation entre la résistance à la compression et la densité.

- Relation entre la résistance à la compression et la VP

La relation entre les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et la VP en fonction de la teneur en cendres volantes est représentée dans cette partie. La Figure 4. 13 montre que pour toutes les BTC, la résistance à la compression augmente linéairement avec la valeur de la vitesse de propagation. Juan et Martin [164] ont rapporté une forte corrélation linéaire entre la résistance à la compression la VP pour des BTC stabilisés avec différents liants. Il est donc clair que le VP peut fournir une estimation fiable de la résistance à la compression des BTC à base de sédiment.

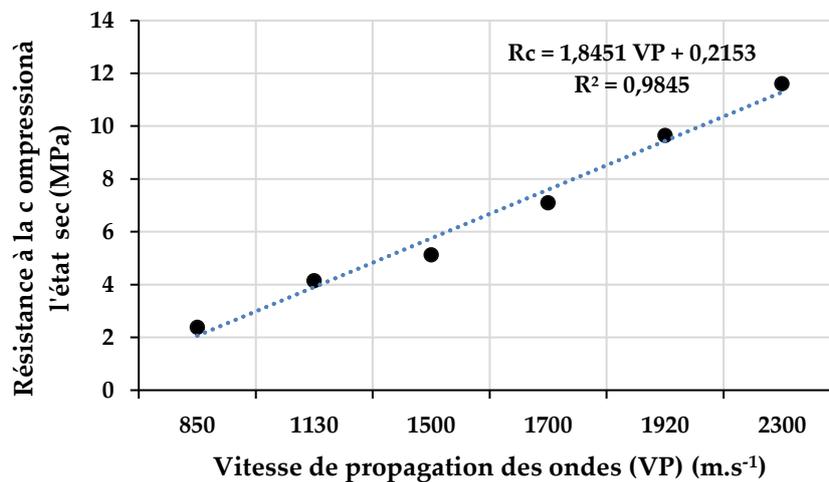


Figure 4. 13.Relation entre la résistance à la compression et la VP.

La résistance à la traction est corrélée à VP. Comme le montre la Figure 4. 14, la résistance à la traction est proportionnelle à VP.

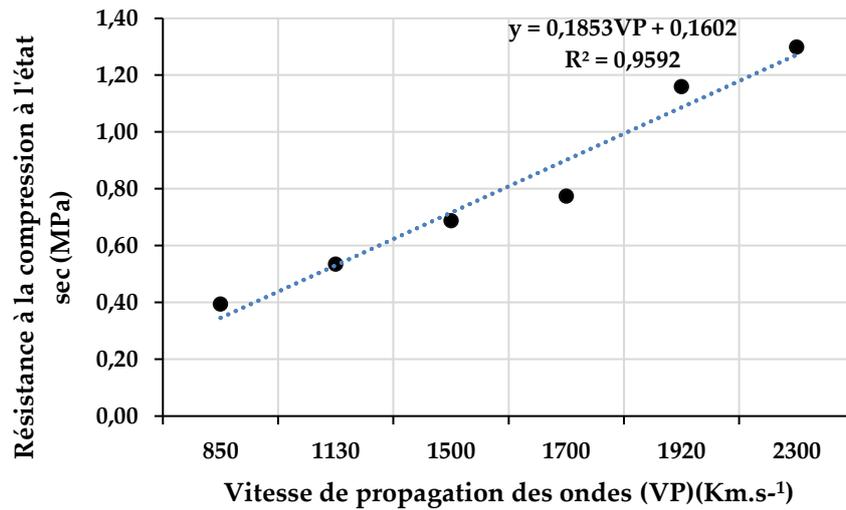


Figure 4. 14. Relation entre la résistance à la traction et la VP

#### 4.4 Propriétés thermiques

La performance thermique des briques de terre comprimée est également importante pour maintenir le confort thermique à l'intérieur des bâtiments. En effet, cette grandeur dépend de certains paramètres [165] dont : la nature des composants du matériau [51], la teneur en eau [166] et la porosité [167]. En outre, la densité apparente est l'un des paramètres principaux qui influence la conductivité thermique des briques [51]. Les résultats présentés dans la Figure 4. 15 confirment la forte dépendance de la conductivité thermique les propriétés physiques du matériau. En effet, l'augmentation de la densité des BTC a conduit à une diminution de la porosité et à une augmentation de la conductivité thermique. Ceci est confirmé par la Figure 4. 16, de nombreuses ont montré que le comportement thermique des briques de terre est fortement lié à la densité apparente [100], [156], [168].

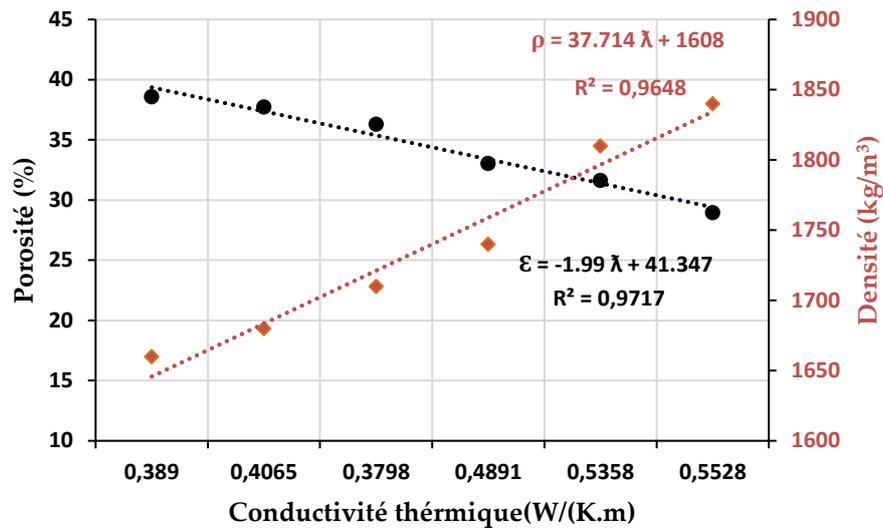


Figure 4. 15. Evolution de la conductivité thermique avec les propriétés physiques

La variation de la conductivité pourrait être liée à une variation de la porosité des matériaux, à la composition intrinsèque de chaque échantillon et à la cohésion du matériau. Ainsi, l'alcali-activation des cendres volantes permet de former des géopolymères qui assurent un renforcement des liaisons entre les constituants du sédiment (sable, limon et argile) et par conséquent, favorise une diminution de la porosité qui a pour conséquence de créer une structure interne continue et homogène. Il en résulte que cette structure dense va être favorable aux transferts de chaleur. Ceci expliquer l'augmentation linéaire de la conductivité thermique. Il faut cependant noter que l'augmentation de la conductivité thermique des briques stabilisées reste dans des proportions proches de celles des briques non stabilisées. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que la conductivité des cendres volantes est similaire à celle des sédiments.

La Figure 4. 16 compare nos valeurs de conductivité avec celles de BTC de la littérature. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par plusieurs chercheurs dans leurs études menées sur des briques de terre stabilisées avec du métakaolin activé [32], du ciment avec une teneur allant de 0 à 15 %. Il faut absolument dire qu'on est mieux en capacité d'isolation. Par ailleurs dans la RE2000, une valeur limite unique à  $1,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  est donnée pour les matériaux terres (pisé, béton de terre stabilisée ou briques de terre comprimée), et est supérieure à toutes nos résultats. Par conséquent, les bâtiments en terre construits par les BTC à base du sédiment aurait les propriétés d'isolation thermique

souhaitées pour offrir un confort thermique aux résidents. Par conséquent, elles sont adaptées aux Bâtiments à Energie Positive (BEPOS) préconisés par la RE2020.

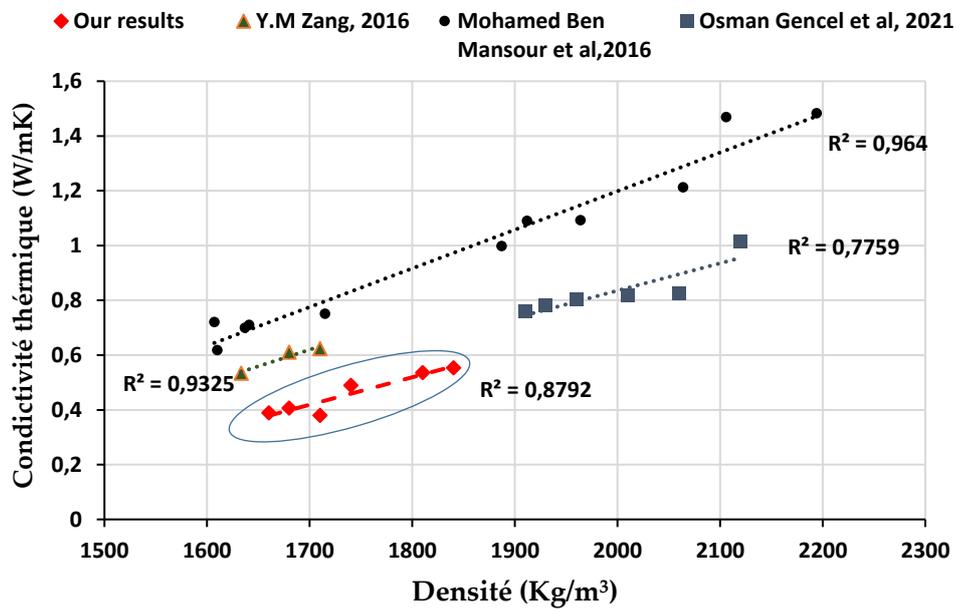


Figure 4. 16.Rélation entre la conductivité thermique et la densité des BTC

Concernant la chaleur spécifique présentée dans la Figure 4. 17, la valeur la plus élevée est obtenue par la brique BTC40CV (1130 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) et la valeur la plus basse est obtenue par la BTC non stabilisée (1010 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).

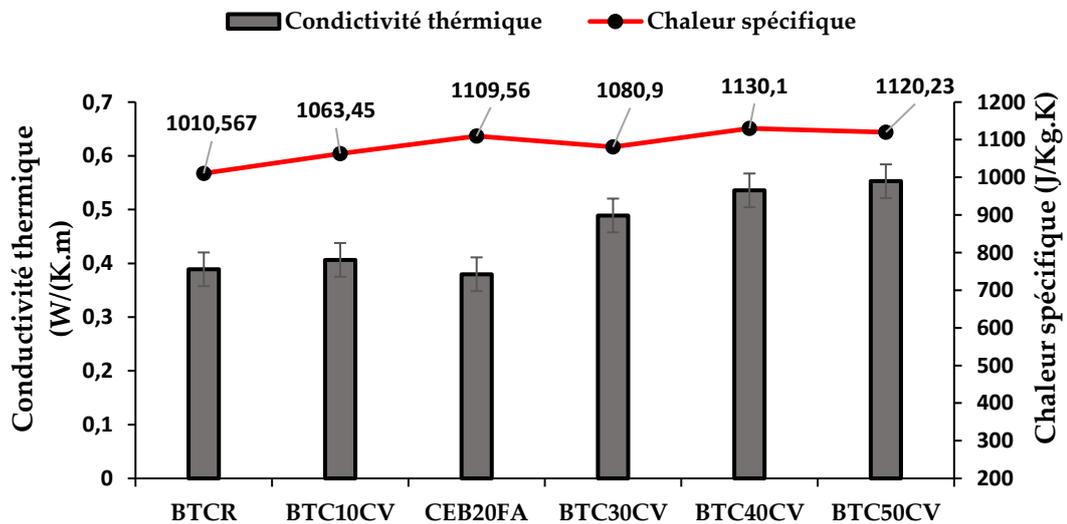


Figure 4. 17.Conductivité thermique et Chaleur spécifique.

## 4.5 Conclusion

Ce chapitre a abordé la caractérisation BTC formulées en termes de propriétés microstructurales, physicomécaniques et hygrothermiques.

Les BTC stabilisées ont montré de bonnes propriétés mécaniques qui augmentent significativement avec le taux de cendres volantes même si l'évaluation des performances de ces échantillons dans des conditions défavorables (résistance à la compression humide) a montré une diminution des résistances à la compression d'environ 50% par rapport aux résistances à la compression à l'état sec. De surcroît, toutes les briques stabilisées au-delà de 20% cendres volantes sont entièrement conformes aux normes actuelles qui fixent une valeur minimale de la résistance à la compression de 4 MPa pour les applications de murs porteurs. L'ajout de cendres volantes modifie la microstructure en diminuant porosité, et par conséquent engendre les performances mécaniques. Par ailleurs, les conductivités thermiques de tous les échantillons sont faibles comparés aux BTC de la littérature, elles se situent de 0,38 à 0,58  $W.m^{-1}.K^{-1}$ . Elles sont adaptées à l'isolation thermique des bâtiments à énergie positive. De plus, les briques stabilisées au-delà de 10% de cendres volantes répondent aux critères indiqués dans la norme relative aux briques faiblement capillaire et sont parfaitement adaptées à des conditions climatiques sévères. Cela nous amène à suggérer l'utilisation de ces briques à base de sédiments pour des applications de structures de maçonnerie porteuses, ce qui mène à une construction plus solide, durable et écologique.

## **Chapitre 5 : Durabilité**

---

## **Chapitre 5: Durabilité**

---

La durabilité est cruciale pour évaluer l'aptitude des matériaux ou des déchets à être utilisés dans des applications de constructions. Dans le cas de l'utilisation de briques de terre comprimée pour des projets de construction, la durabilité est l'une des principales exigences à prendre en compte. Des BTC durables réduisent les coûts d'entretien et l'impact environnemental. Les principaux facteurs impactant la durabilité des BTC sont la sensibilité à l'eau (stabilité hydrique), les cycles de chaleur-froid (stabilité thermique) et le retrait (stabilité volumique). Ces facteurs alternent les propriétés des BTC au fil du temps. Les stabilités hydrique, thermique et volumique des BTC à base de sédiments de dragage ont été étudiées.

### **5.1 Impact environnemental**

La lixiviation des métaux lourds issus des sédiments est le principal impact environnemental des briques à base de sédiments [169]. Pour identifier les impacts environnementaux des BTC, des tests de lixiviation sur différents BTC ont été réalisés selon la norme française NF EN 12457-2 [129]. Les différents mélanges de BTC ont été broyés, tamisés <4mm et ensuite lixiviés avec de l'eau distillée. Le mélange a été agité pendant 24 h à température ambiante. Après filtration, les concentrations des métaux lourds les plus importants (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Mo, Pb, Sb, Se, et Zn) ont été évaluées par ICP. Les résultats sont illustrés dans le Tableau 5 1.

Tableau 5 1. Résultats d'analyse des lixiviats des briques.

<b>Elément</b>	<b>sédiment mg/l</b>	<b>BTC 10CV mg/l</b>	<b>BTC20CV mg/l</b>	<b>BTC30CV mg/l</b>	<b>BTC40CV mg/l</b>	<b>BTC50CV mg/l</b>	<b>Seuils mg/l</b>
<b>Ni</b>	<b>0,1</b>	<b>0,338</b>	<b>0,33</b>	<b>0,022</b>	<b>0,017</b>	<b>0,018</b>	<b>0,4</b>
<b>Cd</b>	<b>0,008</b>	<b>0,008</b>	<b>0,005</b>	<b>0,004</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,04</b>
<b>Cu</b>	<b>0,4</b>	<b>0,237</b>	<b>0,369</b>	<b>0,492</b>	<b>0,276</b>	<b>0,341</b>	<b>2</b>
<b>Hg</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0</b>	<b>0,004</b>	<b>0,001</b>	<b>0,007</b>	<b>0,01</b>
<b>Pb</b>	<b>0,1</b>	<b>0,001</b>	<b>0</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0</b>	<b>0,5</b>
<b>Zn</b>	<b>0,21</b>	<b>0,0188</b>	<b>0,124</b>	<b>0,113</b>	<b>0,081</b>	<b>0,064</b>	<b>4</b>
<b>Cr</b>	<b>0,044</b>	<b>0,044</b>	<b>0,059</b>	<b>0,037</b>	<b>0,029</b>	<b>0,037</b>	<b>0,5</b>

Les résultats indiquent que les concentrations des métaux lourds sont loin en dessous des seuils de lixiviation des déchets inertes prescrits dans la directive française n°. 0289 publiée le 14 décembre 201 [129]. Aucune formulation de BTC n'aurait un impact dangereux sur l'environnement. Au regard de ces résultats, ces briques à base de sédiments pourraient être utilisées pour des applications de construction. La Figure 5 1 montre une baisse des concentrations de métaux lourds avec l'ajout de cendres volantes. Ceci a permis de vérifier que l'ajout de cendres volantes aux sédiments immobilise les contaminants, comme cela a été rapporté dans des études récentes[161].

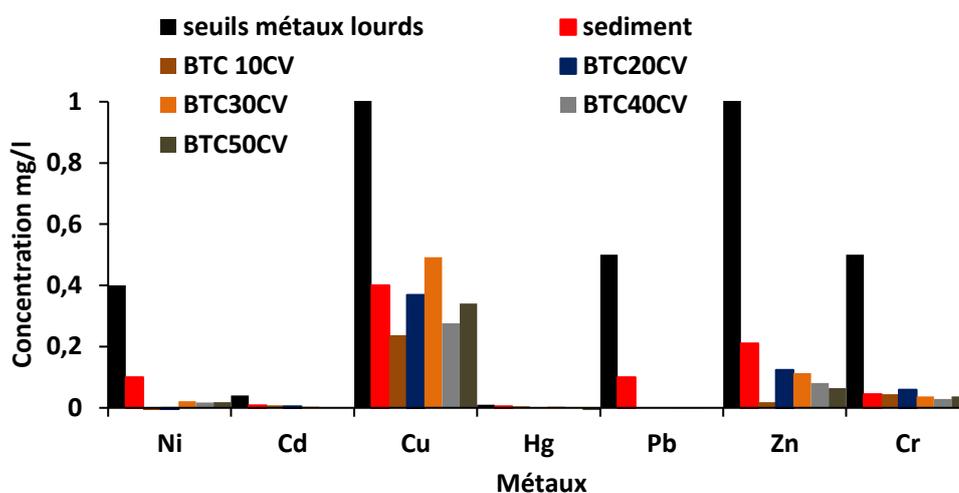


Figure 5 1. Histogramme des concentrations des différents lixiviats

## 5.2 Tenue à l'eau

La durabilité des briques est fortement influencée par la capacité d'absorption d'eau [156]. En effet, les briques de faibles capacité d'absorption sont plus durables et résistantes aux intempéries [157]. Afin d'examiner le comportement hydrique des briques, la Figure 5 2 montre les aspects de différentes briques après une immersion de 24h sous l'eau. Le comportement sous l'eau des échantillons de BTC a été évalué visuellement. Ces résultats donnent une première évaluation de la résistance à l'eau des BTC. Les briques non stabilisées (BTCCR) se sont désintégrées après quatre heures d'immersion dans l'eau contrairement aux briques stabilisées par ajout de cendres volantes. Cependant, on observe que parmi les BTC stabilisées, la coloration de l'eau s'est éclaircie avec la teneur en cendres volantes entre 10% et 50%. L'aspect sombre de l'eau est dû aux particules de cendres volantes non réagies lixiviées (dissolues) dans l'eau. Le lixiviat de la brique non

stabilisée (BTCR) malgré sa dislocation est restée claire car il n'y avait pas de cendres volantes. En revanche l'eau de la BTC10CV était la plus sombre parmi les échantillons, ce qui signifie moins de cohésion par rapport au BTC20CV, BTC40CV et BTC50CV. Ces derniers sont susceptibles de contenir plus de gels géopolymères liant les grains de sédiments, ce qui donne une bonne cohésion et moins de porosité dans les échantillons. Parmi les BTC stabilisées, la BTC10CV, contenant moins de quantité de liant géopolymères (moins du gel et de cohésion), est donc plus sensible à l'eau. Ses anhydres sont lixiviés par l'eau plus facilement par rapport aux autres matrices plus denses.



Figure 5 2. Sensibilité du BTC à l'eau (immersion pendant 24 heures)

### 5.3 Cycles séchage-mouillage

Conformément à la norme ASTM D559-03 [136], des tests cycliques de séchage-mouillage ont été réalisés afin d'évaluer la durabilité. Les résultats de l'essai ont été évalués en termes de résistance à la compression par rapport aux résistances à la compression sec initial, et en termes de perte de masse comparée au poids sec initial. Les échantillons BTC ont subi 6 cycles de 2h d'immersion et 12h de séchage. Cependant, le test n'a pas pu être réalisé pour les BTC non stabilisés (BTCR), qui se sont immédiatement dégradés au contact de l'eau. En revanche, les échantillons BTC stabilisées avec cendres volantes ont présenté un minimum de résistance mécanique. La Figure 5 3 montre que le pourcentage de perte de résistance au fil de cycles de séchage-mouillage variait entre 30 et 70 % selon les dosages de cendres volantes. Cette valeur est de 60% pour une teneur de (20-30) après 2 cycles. Ceci suggère que les BTC devraient être stabilisées avec au moins 20 % de cendres volantes pour maintenir les performances mécaniques à long terme.

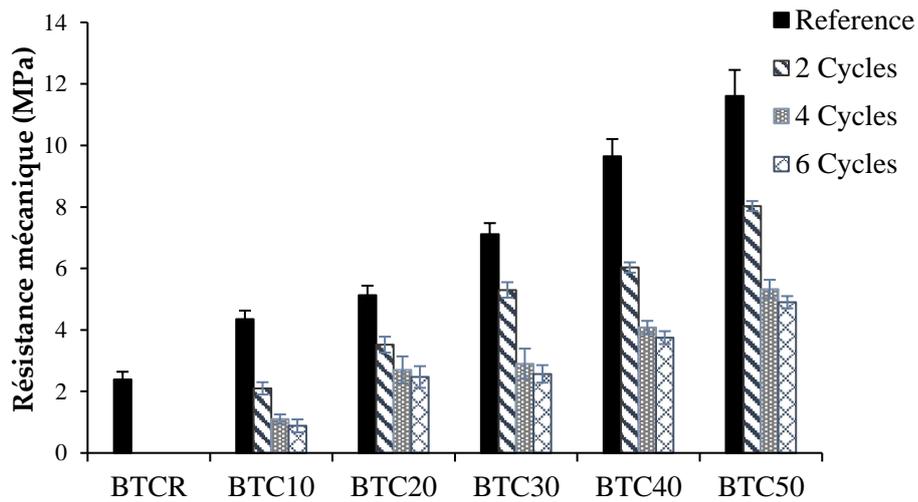


Figure 5 3. Résistance à la compression après les cycles

Il est important de noter que lors des essais d'évaluation séchage-mouillage, tous les échantillons ont montré une perte de masse (Figure 5.4). La prise en compte de cette perte de masse pendant les essais a permis de mieux évaluer la performance des BTC sous l'effet des cycles mouillage-séchage. La perte de masse était due à la lixiviation et au détachement des particules de sol par la pression de l'eau interstitielle après l'immersion. En outre, l'absorption d'eau plus élevée des BTCCR induit plus de gonflement/rétrécissement lors du mouillage-séchage a entraîné une perte de masse plus importante par rapport aux autres BTC stabilisés. Les BTC stabilisées au-delà de 20% de cendres volantes répondent aux critères de durabilité, car la perte de masse de ces BTC est bien inférieure à la perte de masse de 7% autorisée par la norme[136].

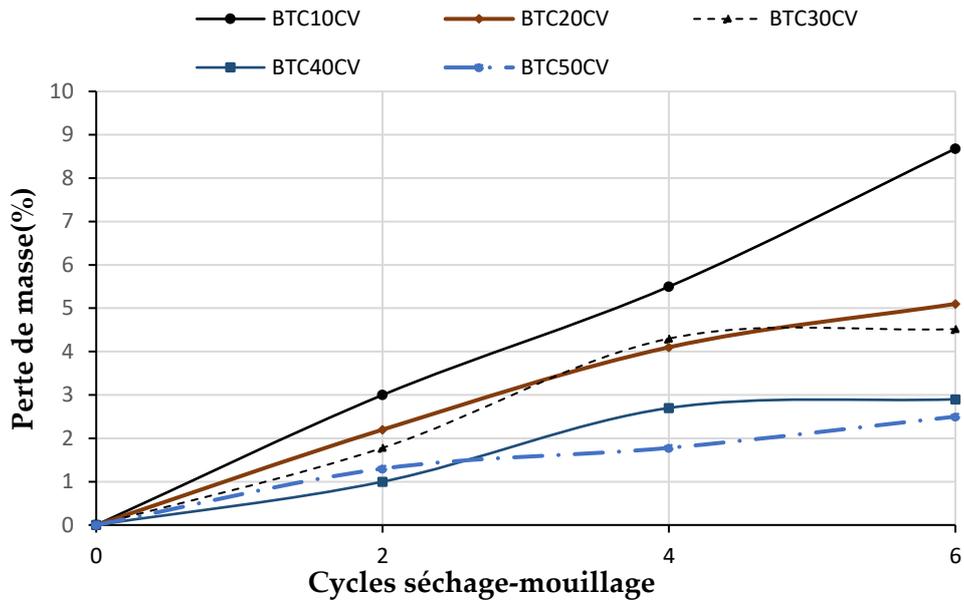


Figure 5 4. Evolution de la perte de masses lors des cycles séchage mouillage

#### 5.4 Retrait séchage

Le retrait des BTC est un paramètre essentiel qui définit son application car un retrait excessif induit des fissures et rend les blocs inadaptés à la construction. La Figure 5 5 montre que la stabilisation par les cendres volantes réduit de manière significative le retrait au séchage des BTC. Avec l'augmentation du dosage de cendres volantes de 0 à 50%, le retrait au séchage des BTC diminue de 67%. Cette baisse du retrait de séchage est majoritairement liée à la baisse de la perte d'eau avec le taux de stabilisation. En effet, le retrait de séchage des BTC provient principalement de contrainte capillaire causée par la perte d'eau des pores capillaires. Par conséquent, au fur et à mesure que l'âge de la cure augmente, le retrait de séchage augmente d'abord de manière approximativement linéaire, puis se stabilise progressivement après 20 jours, l'humidité dans l'échantillon ayant tendance à s'équilibrer avec l'environnement extérieur. En outre, la BTCR se caractérise par une teneur en eau libre importante et, par conséquent, par un retrait plus élevé. Il faut noter aussi que l'augmentation de la résistance mécanique avec le taux de stabilisation améliore la capacité des BTC à résister à la pression capillaire, donc à diminuer le retrait de séchage.

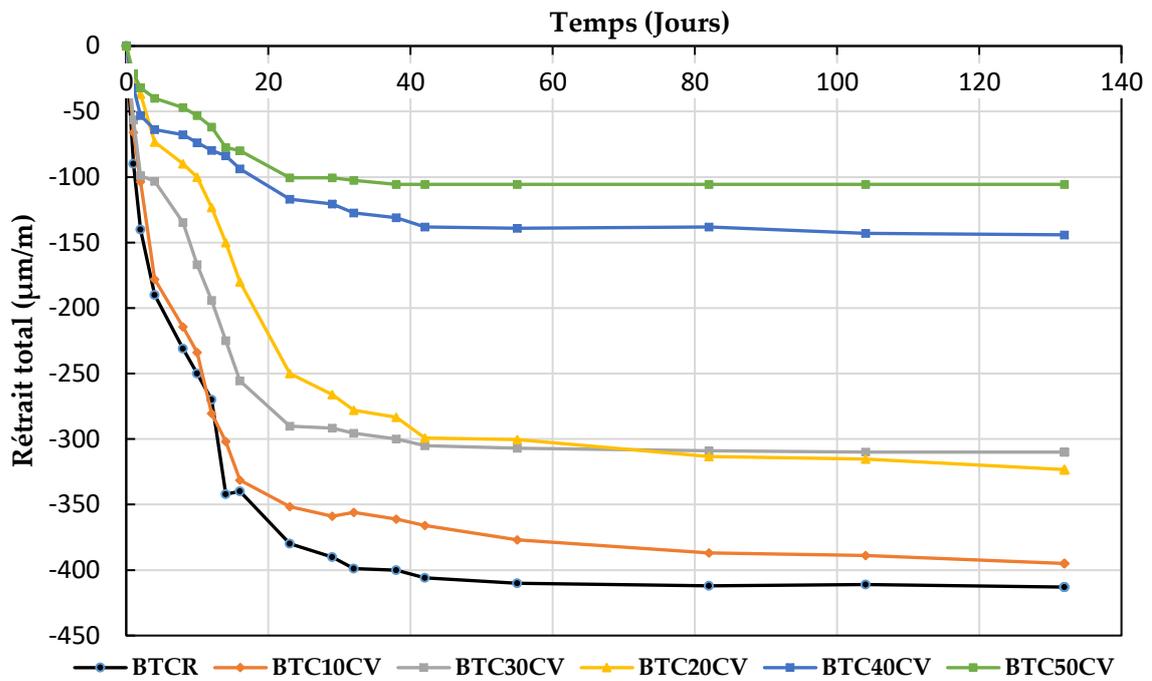


Figure 5 5. Retrait de séchage des BTC

Les courbes montrent que les pertes de masse (Figure 5 6) sont en accord avec l'évolution du retrait, les valeurs sont presque identiques dès le premier jour pour tous les BTC. En effet, toutes les courbes commencent par une partie linéaire dont la pente diminue avec le temps. Dans la zone intermédiaire, les courbes sont fortement non linéaires, ce qui explique une réduction à de faibles valeurs due à l'évaporation. Après 20 jours, les pertes de masse commencent à diminuer très légèrement, elles sont plus faibles pour les BTC stabilisée que pour le BTC de référence BTCR.

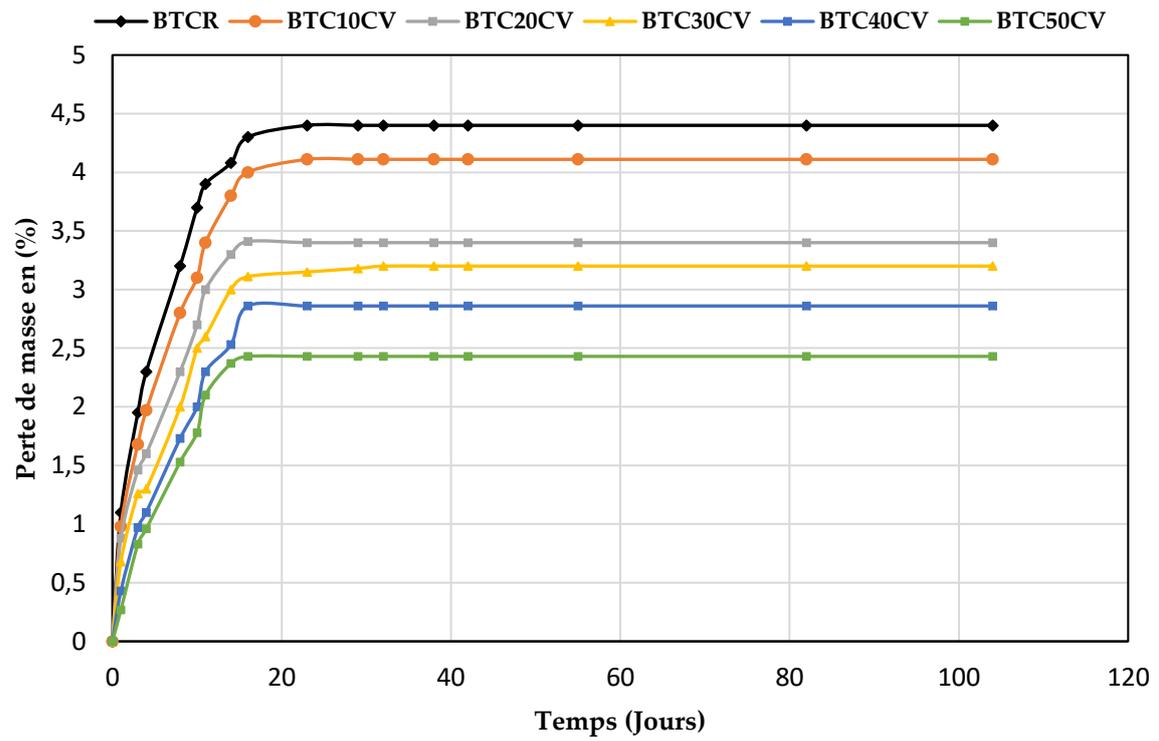


Figure 5 6.Suivi de masse des BTC

## 5.5 Conclusion

Les BTC doivent résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant tout en conservant son aspect esthétique. Les BTC produites ont été soumises à plusieurs tests de durabilité (tenue à l'eau, résistance aux cycles séchage-mouillage, retrait). L'application de ces tests de durabilité aux BTC fabriquées confirme que toutes les BTC stabilisées sont aptes aux constructions en terre, puisqu'elles sont conformes aux spécifications des normes internationales. La stabilisation avec les cendres volantes a augmenté la cohésion des particules des sédiments et la résistance des BTC à l'érosion induite par l'eau. D'après l'essai cyclique de séchage-mouillage, il est observé que l'addition de 20% de cendres volantes satisfait la limite requise de perte de masse cumulée inférieure à 7% après cycles. Un test de compression a été effectué sur les échantillons qui ont pu supporter les cycles successifs de séchage - mouillage et la conservation de la résistance varie de 30 à 70% selon la teneur en cendres volantes.

Les BTC contenant un dosage plus élevé de cendres volantes avait moins de retrait de séchage en raison de ses effets de dessiccation sévère et de résistance à la pression capillaire de retrait. Avec l'augmentation du dosage de 0% à 50%, le retrait au séchage a diminué de 67%. En plus, les tests de lixiviation effectués sur les briques ont montré que les concentrations de métaux lourds dans le lixiviat étaient bien en dessous des limites réglementaires. Toutes les BTC stabilisées au-delà de 20% présentent des propriétés de durabilité et environnementale satisfaisantes pour des applications de murs porteurs dans le bâtiment.

---

## *Conclusion générale et Perspectives*

---

L'étude expérimentale réalisée consistait à évaluer la faisabilité de valoriser les sédiments comme matière première pour la fabrication de briques de terre comprimée stabilisées par un liant géopolymère composé de cendres volantes et l'hydroxyde de sodium. Les BTC à base de sédiments sont stabilisées avec différentes teneurs de cendres volantes (0, 10, 20, 30, 40 et 50%). Les propriétés physiques, mécanique, hydrique, thermique et de durabilité des BTC ont été déterminées. Les résultats permettent d'obtenir les conclusions suivantes :

- La stabilisation a une influence déterminante sur la densité, la porosité, l'absorption d'eau. Avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes de 10% à 50%, la porosité et l'absorption d'eau ont diminué d'environ 26,7% et 60,4% respectivement. Tandis que la densité a augmenté de 9,85%.
- Les BTC stabilisées ont montré de bonnes propriétés mécaniques qui augmentent significativement avec le taux de cendres volantes même si l'évaluation des performances de ces échantillons dans des conditions défavorables (résistance à la compression humide) a montré une diminution des résistances à la compression d'environ 50% par rapport aux résistances à la compression sec. De plus, tous les briques stabilisés au-delà de 20% de cendres volantes sont entièrement conformes aux normes actuelles qui fixent une valeur minimale de la résistance à la compression de 4 MPa.
- La conductivité thermique reste faible pour tous les échantillons, et se situe entre 0,38 et 0,58  $Wm^{-1}K^{-1}$ . De plus, les briques stabilisées aux moins de 10% de cendres volantes dans cette étude répondent aux critères indiqués dans la norme relative aux briques faiblement capillaire et sont parfaitement adaptées à des conditions climatiques sévères.
- Les tests de lixiviation indiquent que les concentrations de métaux lourds dans les lixiviats sont inférieures aux seuils. L'ajout de cendres volantes entraîne une diminution des concentrations de métaux lourds. Ce qui suggère l'utilisation des cendres volantes comme une technologie prometteuse dans le domaine de la dépollution. En fait, les BTC pourraient être considérées comme un produit respectueux de l'environnement.

- Pour étudier les problèmes liés à la durabilité, des essais des tests tels que la tenue à l'eau, cycles de séchage - mouillage et le retrait de séchage ont été effectués, les résultats ont été comparés à ceux de différentes normes [26-28]. L'ajout de cendres volantes peut efficacement limiter le potentiel gonflement des sédiments et entraîne une stabilité significative à l'eau. Les BTC stabilisées avec plus de 20% de cendres volantes répondent aux critères de durabilité lors des cycles de séchage-mouillage, car la perte de masse de ces BTC est bien inférieure à la perte de masse limite de 7% exigée par la norme, et que la résistance après 6 cycles était supérieure à la résistance réglementaire de 1,6 MPa. Les essais montrent une conservation de la résistance mécanique variant de 30 à 70% selon la teneur en cendres volantes. En ce qui concerne les risques de retrait des BTC, les blocs stabilisés ont montré le plus faible retrait. Cette baisse du retrait de séchage est liée à la baisse de la perte d'eau et l'augmentation de la résistance mécanique avec le taux de stabilisation.

Ces résultats amènent à suggérer l'utilisation de ces briques à base de sédiments pour des applications de structures de maçonnerie porteuses, ce qui mène à une construction plus solide, durable et écologique. En perspective, plusieurs aspects peuvent être proposés pour compléter ce travail, en raison de la nature hétérogène des sédiments dragués dans la région, en particulier leur contenu en polluants, en matière organique et en phases minéralogiques primaires (quartz, calcite, argiles, etc.). Il est important de tester les matrices proposées avec différents types de sédiments afin d'étudier l'évolution des paramètres physico-chimiques, mécaniques et thermiques. Afin de renforcer les connaissances sur les BTC à base de sédiments proposés dans ce travail, des études complémentaires sont nécessaires du point de vue de la durabilité. Les indices de durabilité proposés dans ce travail restent relativement classiques mais sont indispensables pour donner une première approche de la durabilité des BTC. Des tests complémentaires peuvent être proposés tels que :

- Réaliser des essais complémentaires microstructuraux (RMN) et de durabilité (gel-dégel).
- Formulation de BTC avec différents types de sédiments.
- Réaliser un prototype de mur en BTC à base de sédiment.
- Effectuer une analyse de cycle de vie des BTC

---

## Références bibliographiques

---

- [1] M. Benzerzour, M. Amar, et N.-E. Abriak, « New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment », *Construction and Building Materials*, vol. 140, p. 432-444, juin 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.142.
- [2] A. el M. Safhi, P. Rivard, A. Yahia, M. Benzerzour, et K. H. Khayat, « Valorization of dredged sediments in self-consolidating concrete: Fresh, hardened, and microstructural properties », *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, p. 121472, août 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121472.
- [3] Olivier PERRIN, « La valorisation à terre des sédiments de dragage | LinkedIn ». <https://www.linkedin.com/pulse/la-valorisation-%C3%A0-terre-des-s%C3%A9diments-de-dragage-olivier-perrin/> (consulté le 10 août 2021).
- [4] Yumpu.com, « Guide pour la gestion durable des déblais de dragage ... - In Vivo », *yumpu.com*. <https://www.yumpu.com/fr/document/view/17376012/guide-pour-la-gestion-durable-des-deblais-de-dragage-in-vivo> (consulté le 1 septembre 2021).
- [5] J. Couvidat, M. Benzaazoua, V. Chatain, et H. Bouzahzah, « Environmental evaluation of dredged sediment submitted to a solidification stabilization process using hydraulic binders », *Environ Sci Pollut Res*, vol. 23, n° 17, p. 17142-17157, sept. 2016, doi: 10.1007/s11356-016-6869-9.
- [6] A. Akcil, C. Erust, S. Ozdemiroglu, V. Fonti, et F. Beolchini, « A review of approaches and techniques used in aquatic contaminated sediments: metal removal and stabilization by chemical and biotechnological processes », *Journal of Cleaner Production*, vol. 86, p. 24-36, janv. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.009.
- [7] S. Lirer, B. Liguori, I. Capasso, A. Flora, et D. Caputo, « Mechanical and chemical properties of composite materials made of dredged sediments in a fly-ash based geopolymer », *Journal of Environmental Management*, vol. 191, p. 1-7, avr. 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.01.001.
- [8] V. Bianchi, G. Masciandaro, B. Ceccanti, S. Doni, et R. Iannelli, « Phytoremediation and Bio-physical Conditioning of Dredged Marine Sediments for Their Re-use in the Environment », *Water Air Soil Pollut*, vol. 210, n° 1-4, p. 187-195, juill. 2010, doi: 10.1007/s11270-009-0240-4.
- [9] C. Caplat, H. Texier, D. Barillier, et C. Lelievre, « Heavy metals mobility in harbour contaminated sediments: The case of Port-en-Bessin », *Marine Pollution Bulletin*, vol. 50, n° 5, p. 504-511, mai 2005, doi: 10.1016/j.marpolbul.2004.08.004.
- [10] M. C. Casado-Martínez, J. L. Buceta, M. J. Belzunce, et T. A. DelValls, « Using sediment quality guidelines for dredged material management in commercial ports from Spain », *Environment International*, vol. 32, n° 3, p. 388-396, avr. 2006, doi: 10.1016/j.envint.2005.09.003.
- [11] J. L. Dalton, K. H. Gardner, T. P. Seager, M. L. Weimer, J. C. M. Spear, et B. J. Magee, « Properties of Portland cement made from contaminated sediments », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 41, n° 3, p. 227-241, juin 2004, doi: 10.1016/j.resconrec.2003.10.003.
- [12] G. Aouad, A. Laboudigue, N. Gineys, et N. E. Abriak, « Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker », *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, n° 6, p. 788-793, juill. 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.008.

- [13] M. Amar, M. Benzerzour, A. E. M. Safhi, et N.-E. Abriak, « Durability of a cementitious matrix based on treated sediments », *Case Studies in Construction Materials*, vol. 8, p. 258-276, juin 2018, doi: 10.1016/j.cscm.2018.01.007.
- [14] M. Liu, « Effects of sintering temperature on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment », *Journal of Alloys and Compounds*, p. 6, 2018.
- [15] K. Hamer et V. Karius, « Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment », *Waste Management*, vol. 22, n° 5, p. 521-530, août 2002, doi: 10.1016/S0956-053X(01)00048-4.
- [16] M. Samara, Z. Lafhaj, et C. Chapiseau, « Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 163, n° 2-3, p. 701-710, avr. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.07.153.
- [17] Y. Xu, C. Yan, B. Xu, X. Ruan, et Z. Wei, « The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick », *Ceramics International*, vol. 40, n° 6, p. 8833-8840, juill. 2014, doi: 10.1016/j.ceramint.2014.01.105.
- [18] B. Serbah, N. Abou-Bekr, S. Bouchemella, J. Eid, et S. Taibi, « Dredged sediments valorisation in compressed earth blocks: Suction and water content effect on their mechanical properties », *Construction and Building Materials*, vol. 158, p. 503-515, janv. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.043.
- [19] R. Achour, N.-E. Abriak, R. Zentar, P. Rivard, et P. Gregoire, « Valorization of unauthorized sea disposal dredged sediments as a road foundation material », *Environmental Technology*, vol. 35, n° 16, p. 1997-2007, août 2014, doi: 10.1080/09593330.2014.889758.
- [20] M. Serlet, « Blocs de terre comprimée. Volume II : Manuel de conception et de construction », *CRAterre*. <https://craterre.hypotheses.org/281> (consulté le 3 septembre 2021).
- [21] « XP P13-901 : Compressed earth blocks for walls and partitions : definitions - Specifications - Test methods - Delivery acceptance conditions 2001. »
- [22] H. Houben et H. Guillaud, *Notice « Earth construction. A comprehensive guide » - BCIN*. 1994. Consulté le: 21 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bcin.ca/bcin/detail.app?id=402376>
- [23] M. C. Jiménez Delgado et I. C. Guerrero, « The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review », *Construction and Building Materials*, vol. 21, n° 2, p. 237-251, févr. 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006.
- [24] J.-C. Morel, A. Pkla, et P. Walker, « Compressive strength testing of compressed earth blocks », *Construction and Building Materials*, vol. 21, n° 2, p. 303-309, févr. 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021.
- [25] X. Bian, Z. Wang, G. Ding, et Y.-P. Cao, « Compressibility of cemented dredged clay at high water content with super-absorbent polymer », *Engineering Geology*, vol. 208, p. 198-205, juin 2016, doi: 10.1016/j.enggeo.2016.04.036.
- [26] J. Wang *et al.*, « Vacuum preloading combined with multiple-flocculant treatment for dredged fill improvement », *Engineering Geology*, vol. 259, p. 105194, sept. 2019, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105194.
- [27] X. Yang et H. Wang, « Strength of Hollow Compressed Stabilized Earth-Block Masonry Prisms », *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, p. e7854721, févr. 2019, doi: 10.1155/2019/7854721.
- [28] P. M. Touré, V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, et D. Azilinson, « Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB) », *Journal of*

- Building Engineering*, vol. 13, p. 266-271, sept. 2017, doi: 10.1016/j.jobte.2017.08.012.
- [29] M. Saidi, A. S. Cherif, B. Zeghmami, et E. Sediki, « Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks », *Construction and Building Materials*, vol. 167, p. 566-577, avr. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063.
- [30] A. Arrigoni, « Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation », *Building and Environment*, p. 10, 2017.
- [31] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, et G. D. Corder, « Costs and carbon emissions for geopolymers in comparison to ordinary portland cement », *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, n° 9-10, p. 1080-1090, juin 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.02.010.
- [32] S. Omar Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, et F. Tsobnang, « Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso », *Construction and Building Materials*, vol. 165, p. 333-345, mars 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051.
- [33] Hossam F, « Potential uses of petroleum-contaminated soil in highway construction ».  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0950061805000024?token=DFBAD0109C348FE6449663974619C8A6AE295C6FEE1958C4483E30E8B7D9697A5B39B727A49274E1025C16DC6E0A9A0C&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221014214028> (consulté le 14 octobre 2022).
- [34] D. Wang, N. E. Abriak, et R. Zentar, « Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash », *Engineering Geology*, vol. 166, p. 90-99, nov. 2013, doi: 10.1016/j.enggeo.2013.09.007.
- [35] J. Couvidat, « Gestion d'un sédiment de dragage marin contaminé: Caractérisation de la réactivité biogéochimique, valorisation en mortier et évaluation environnementale », p. 248.
- [36] « Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement - Detail - Ermes ».  
[https://bibliotheques.mnhn.fr/medias/detailstatic.aspx?INSTANCE=EXPLOITATION&RSC\\_BASE=HORIZON&RSC\\_DOCID=337371](https://bibliotheques.mnhn.fr/medias/detailstatic.aspx?INSTANCE=EXPLOITATION&RSC_BASE=HORIZON&RSC_DOCID=337371) (consulté le 5 juillet 2022).
- [37] B. Anger, F. Theyry, et D. Levacher, « Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une pré-orientation vers des filières de valorisation matière », in *Edition 3, Ferrare, Italie*, 2015, p. 97-102. doi: 10.5150/cmcm.2015.020.
- [38] « Cerema\_Rapport\_SédimMarin\_BD.pdf ».
- [39] « U. de Liège, Eléments de sédimentologie et de pétrologie sédimentaire, (2019) <http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/sedimentologie>. »
- [40] G. Cahet et M. Sibuet, « Activité biologique en domaine profond: transformations biochimiques in situ de composés organiques marqués au carbone-14 à l'interface eau-sédiment par 2000 m de profondeur dans le golfe de Gascogne », *Mar. Biol.*, vol. 90, n° 2, p. 307-315, juin 1986, doi: 10.1007/BF00569143.
- [41] M. Ali, M. Seeger, G. Sterk, et D. Moore, « A unit stream power based sediment transport function for overland flow », *CATENA*, vol. 101, p. 197-204, févr. 2013, doi: 10.1016/j.catena.2012.09.006.
- [42] F. Marot, « Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques », Thèse de doctorat, Le Havre, 1997. Consulté le: 22 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/1997LEHA0009>

- [43] « Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques : Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques - TEL - Thèses en ligne ». <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00749917/> (consulté le 5 juillet 2022).
- [44] E. Remon, « Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution », phdthesis, Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2006. Consulté le: 5 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00362527>
- [45] « Agence de l'Eau Artois-Picardie | Avec vous, partout où l'eau sert la vie ». <https://www.eau-artois-picardie.fr/> (consulté le 22 septembre 2021).
- [46] S. M. Nedrich et G. A. Burton, « Sediment Zn-release during post-drought re-flooding: Assessing environmental risk to *Hyalella azteca* and *Daphnia magna* », *Environmental Pollution*, vol. 230, p. 1116-1124, nov. 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.073.
- [47] « TRAN NGOC THANH.pdf ». Consulté le: 5 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://cdoc.ensm-douai.fr/theses/TRAN%20NGOC%20THANH.pdf>
- [48] M. Ali, M. Seeger, G. Sterk, et D. Moore, « A unit stream power based sediment transport function for overland flow », *CATENA*, vol. 101, p. 197-204, févr. 2013, doi: 10.1016/j.catena.2012.09.006.
- [49] L. Mancioppi, A. Benard, P. Hennebert, et B. Hazebrouck, « Sédiments de dragage : variabilité des sédiments, retour d'expérience sur les pratiques de dragage et sur la valorisation à terre en France », in *Edition 1, Hammamet, Tunisie*, 2009, p. 133-134. doi: 10.5150/cmcm.2009.033-6.
- [50] « Rétrospective des dragages fluviaux en France19-12-18.pdf ».
- [51] L. Zhang, A. Gustavsen, B. P. Jelle, L. Yang, T. Gao, et Y. Wang, « Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks », *Construction and Building Materials*, vol. 151, p. 504-511, oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047.
- [52] C. Alzieu, « Dragages et environnement marin », p. 225.
- [53] M. Garric, M. Amara, M. L. F. Stéphane, M. M. Jean-Charles, M. Cousin, et M. Cachot, « Soutenue le 2 décembre 2013 », p. 278.
- [54] C. Draoogo, « La contamination chimique des espèces halieutiques marines », p. 49.
- [55] A. Pichard, « EXPERTS AYANT PARTICIPÉ A LA RÉDACTION », p. 33, 2005.
- [56] A. E. L'Ifremer, « IFREMER RAPPORT ANNUEL 2019 », p. 66, 2019.
- [57] O. Geffard, « Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés : évaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires », Bordeaux 1, 2001. Consulté le: 5 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1482/>
- [58] « Cyclic potential sweep electropolymerization of aniline: The role of anions in the polymerization mechanism - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022072888802936> (consulté le 5 juillet 2022).
- [59] « Guide pour l'évaluation du risque associé aux rejets d'eaux chlorées dans le milieu aquatique », p. 23.
- [60] « Arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517 et dans les installations de stockage de déchets inertes relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées - Légifrance ». <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000029893828/> (consulté le 14 novembre 2021).

- [61] A. Semcha, « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug », These de doctorat, Reims, 2006. Consulté le: 22 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2006REIMS023>
- [62] P.-Y. Scordia, « Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers », janv. 2008.
- [63] « Sedilab, le centre de ressources sur la valorisation des sédiments », *Sedilab*. <https://www.sedilab.com/> (consulté le 22 septembre 2021).
- [64] A. Mezencevova, N. N. Yeboah, S. E. Burns, L. F. Kahn, et K. E. Kurtis, « Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick », *Journal of Environmental Management*, vol. 113, p. 128-136, déc. 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.030.
- [65] « valorisation des sédiments dans france et linter-déverrouillé.pdf ».
- [66] T. Morton, *Earth masonry: Design and construction guidelines*. Berkshire: IHS BRE Press, 2008.
- [67] N. A. Haffar, « Efficient stabilization with hydraulic binders of local earth for building construction applications », p. 251.
- [68] « Bricks made of coal fly-ash and slag, cured in the open air - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946595000177> (consulté le 5 juillet 2022).
- [69] « Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061805000498> (consulté le 5 juillet 2022).
- [70] « Application of agro and non-agro waste materials for unfired earth blocks construction: A review - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820313519?via%3Dihub> (consulté le 5 juillet 2022).
- [71] A. Laborel-Préneron, J.-E. Aubert, C. Magniont, P. Maillard, et C. Poirier, « Effect of Plant Aggregates on Mechanical Properties of Earth Bricks », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, n° 12, p. 04017244, déc. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002096.
- [72] J. F. C. Turner, « Architecture de terre : histoire, culture et société. », vol. 2, p. 308, 2007.
- [73] B. V. Venkatarama Reddy, « Sustainable materials for low carbon buildings », *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 4, n° 3, p. 175-181, sept. 2009, doi: 10.1093/ijlct/ctp025.
- [74] T. A. Phung, « Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales: la bauge », p. 180.
- [75] L. Courard, « CONSTRUCTION EN TERRE CRUE:DISPOSITIONS QUALITATIVES,CONSTRUCTIVES ET ARCHITECTURALES », p. 227.
- [76] « HOTEL LE DJOLOFF DAKAR - Sénégal - Conctruction en terre crue | GUYOT DAVID | MONTGAILLARD DE SALIES - Haute-Garonne », *Ordre des architectes*. <https://www.architectes-pour-tous.fr/diaporama/46175> (consulté le 5 juillet 2022).
- [77] « dossier\_de\_presse\_terrafibra\_architecture\_25112021\_planches\_bd\_e4c22.pdf ». Consulté le: 5 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.pavillon-arsenal.com/data/expositions\\_fbccd/fiche/11014/dossier\\_de\\_presse\\_terrafibra\\_architecture\\_25112021\\_planches\\_bd\\_e4c22.pdf](https://www.pavillon-arsenal.com/data/expositions_fbccd/fiche/11014/dossier_de_presse_terrafibra_architecture_25112021_planches_bd_e4c22.pdf)
- [78] « A travers le monde », *Art Terre Mayotte*. <https://www.art-terre-mayotte.org/copie-de-a-mayotte> (consulté le 5 juillet 2022).

- [79] « Optimisation of Compressed Earth Blocks (CEBs) using natural origin materials: A systematic literature review - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821028841> (consulté le 5 juillet 2022).
- [80] S. Deboucha et R. Hashim, « A review on bricks and stabilized compressed earth blocks », *Sci. Res. Essays*, p. 8.
- [81] K. A. J. Ouedraogo, « Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux », p. 168.
- [82] A. H. Narayanaswamy, « Mechanical testing procedure for local building materials: rammed earth and laterite building stones », p. 180.
- [83] M. A. Mesbah, J.-C. Morel, et M. Olivier, *Methodologie d'essais de laboratoire pour permettre l'utilisation de matériaux locaux en géotechnique routière*. 1997.
- [84] A. S. Muntohar, « Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 11, p. 4215-4220, nov. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.061.
- [85] H. Houben, H. Guillaud, CRAterre, et Intermediate Technology Publications, *Earth construction: a comprehensive guide*. London: Intermediate Technology Publications, 1994.
- [86] H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali, et J. B. Williams, « Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres », *Construction and Building Materials*, vol. 101, p. 797-809, déc. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069.
- [87] P. Nshimiyimana, A. Messan, et L. Courard, « Physico-Mechanical and Hygro-Thermal Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders », *Materials*, vol. 13, n° 17, Art. n° 17, janv. 2020, doi: 10.3390/ma13173769.
- [88] P. Krivenko, « G. VD, Soil silicates. Gosstroyizdat, Kiev., 154 (1959) », *J. Ceram. Sci. Technol.*, n° 03, 2017, doi: 10.4416/JCST2017-00042.
- [89] « Influence of Solids-to-liquid and Activator Ratios on Calcined Kaolin Cement Powder - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211007036> (consulté le 6 juillet 2022).
- [90] J. W. Phair, J. S. J. Van Deventer, et J. D. Smith, « Mechanism of Polysialation in the Incorporation of Zirconia into Fly Ash-Based Geopolymers », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 39, n° 8, p. 2925-2934, août 2000, doi: 10.1021/ie990929w.
- [91] « curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf ». Consulté le: 6 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf>
- [92] « Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406002081> (consulté le 6 juillet 2022).
- [93] J. Davidovits, « PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS », p. 19, 1994.
- [94] « Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers | Industrial & Engineering Chemistry Research ». <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie980804b> (consulté le 6 juillet 2022).
- [95] « Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review | SpringerLink ». <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-0401-4> (consulté le 6 juillet 2022).

- [96] S. Larbi, A. Khaldi, W. Maherzi, et N.-E. Abriak, « Formulation of Compressed Earth Blocks Stabilized by Glass Waste Activated with NaOH Solution », *Sustainability*, vol. 14, n° 1, p. 102, déc. 2021, doi: 10.3390/su14010102.
- [97] « Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817320317?via%3Dihub> (consulté le 6 juillet 2022).
- [98] « The Porosity of Stabilized Earth Blocks with the Addition Plant Fibers of the Date Palm | Idder | Civil Engineering Journal ». <https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/2023> (consulté le 6 juillet 2022).
- [99] « Analysing the impact of compaction of soil aggregates using X-ray microtomography and water flow simulations - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198715000392?via%3Dihub> (consulté le 6 juillet 2022).
- [100] M. B. Mansour, A. Jelidi, A. S. Cherif, et S. B. Jabrallah, « Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB) », *Construction and Building Materials*, vol. 104, p. 44-51, févr. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024.
- [101] « Influence of compaction pressure on the mechanical and acoustic properties of compacted earth blocks: An inverse multi-parameter acoustic problem - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X17303833?via%3Dihub> (consulté le 6 juillet 2022).
- [102] « Compressed earth block reinforced with coconut fibers and stabilized with aloe vera and lime | Emerald Insight ». <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JEDT-02-2020-0055/full/html> (consulté le 6 juillet 2022).
- [103] « Application of agro and non-agro waste materials for unfired earth blocks construction: A review - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820313519?via%3Dihub> (consulté le 5 juillet 2022).
- [104] E. R. Teixeira *et al.*, « Mechanical and Thermal Performance Characterisation of Compressed Earth Blocks », *Energies*, vol. 13, n° 11, Art. n° 11, janv. 2020, doi: 10.3390/en13112978.
- [105] « Physical characterization of bio-composite CEB stabilized with Argan nut shell and cement - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320341249?via%3Dihub> (consulté le 6 juillet 2022).
- [106] « Tatane: Thermal, mechanical and physical behavior... - Google Scholar ». [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Thermal%2C%20mechanical%20and%20physical%20behavior%20of%20compressed%20earth%20blocks%20loads%20by%20natural%20wastes&publication\\_year=2018&author=T.%20Mohamed&author=A.%20Hajar&author=E.%20Hassan&author=F.%20M%20E%20%99bark](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Thermal%2C%20mechanical%20and%20physical%20behavior%20of%20compressed%20earth%20blocks%20loads%20by%20natural%20wastes&publication_year=2018&author=T.%20Mohamed&author=A.%20Hajar&author=E.%20Hassan&author=F.%20M%20E%20%99bark) (consulté le 6 juillet 2022).
- [107] « Compressive and Flexural Strengths of Cement Stabilized Earth Bricks Reinforced with Treated and Untreated Pineapple Leaves Fibres ». <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=88169> (consulté le 6 juillet 2022).

- [108] « Effect of Alfa fibers on the mechanical and thermal properties of compacted earth bricks - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320356546?via%3Dihub> (consulté le 6 juillet 2022).
- [109] M. S. Islam, T. E. Elahi, A. R. Shahriar, et N. Mumtaz, « Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction », *Construction and Building Materials*, vol. 255, p. 119392, sept. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119392.
- [110] R. Alavéz-Ramírez, P. Montes-García, J. Martínez-Reyes, D. C. Altamirano-Juárez, et Y. Gochi-Ponce, « The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks », *Construction and Building Materials*, vol. 34, p. 296-305, sept. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072.
- [111] « Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814013488?via%3Dihub> (consulté le 6 juillet 2022).
- [112] R. Bahar, M. Benazzoug, et S. Kenai, « Performance of compacted cement-stabilised soil », *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, n° 7, p. 811-820, oct. 2004, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.
- [113] J. E. Aubert, P. Maillard, J. C. Morel, et M. Al Rafii, « Towards a simple compressive strength test for earth bricks? », *Mater Struct*, vol. 49, n° 5, p. 1641-1654, mai 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0601-y.
- [114] H. Van Damme et H. Houben, « Earth concrete. Stabilization revisited », *Cement and Concrete Research*, vol. 114, p. 90-102, déc. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.035.
- [115] « Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814002219> (consulté le 7 novembre 2022).
- [116] « Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates: International Journal of Architectural Heritage: Vol 13, No 4 ». <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15583058.2018.1442891> (consulté le 6 juillet 2022).
- [117] G. Sant, A. Kumar, C. Patapy, G. Le Saout, et K. Scrivener, « The influence of sodium and potassium hydroxide on volume changes in cementitious materials », *Cement and Concrete Research*, vol. 42, n° 11, p. 1447-1455, nov. 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.08.012.
- [118] « Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ». <https://viewerbdc.afnor.org/pdf/viewer/6Xi3dHps30o1?proxy=true> (consulté le 7 octobre 2022).
- [119] A. C. E. Idrissi, « Géopolymérisation et activation alcaline des coulis d'injection: structuration, micromécanique et résistance aux sollicitations physico-chimiques », p. 181.
- [120] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, et J. S. J. van Deventer, « Geopolymer technology: the current state of the art », *J Mater Sci*, vol. 42, n° 9, p. 2917-2933, mai 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [121] M. Jaditager, « Sedimentation and consolidation behaviour of fly ash-based geopolymer stabilised dredged mud », 2018, doi: 10.25903/5D2E5735CCA09.

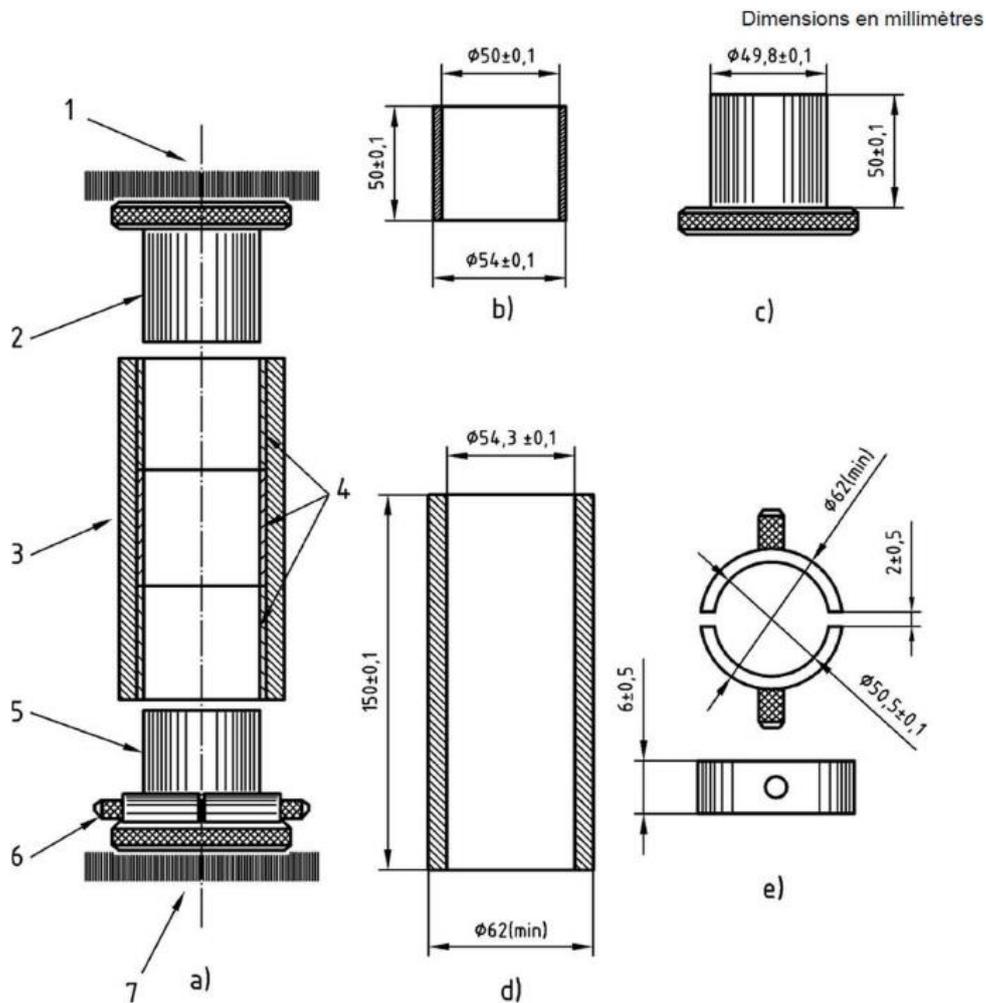
- [122] « Détermination de la teneur en eau pondérale des sols - Méthode par étuvage. » <https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/notice/norme/nf-p94-050/FA020542?rechercheID=7920959&searchIndex=1&activeTab=all> (consulté le 6 juillet 2022).
- [123] « NF ISO 13320-1 Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser 2000. »
- [124] « Capacité d'un sédiment à se substituer à la fraction argileuse de la matière première de l'industrie des liants hydrauliques ».
- [125] « Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau. » [https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/recherche-resultat?rechercheID=7920960&\\_id=1657067675280](https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/recherche-resultat?rechercheID=7920960&_id=1657067675280) (consulté le 6 juillet 2022).
- [126] « NF P94-068 Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache, 1998. »
- [127] « Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau ». [https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/recherche-resultat?rechercheID=7920969&\\_id=1657068845500](https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/recherche-resultat?rechercheID=7920969&_id=1657068845500) (consulté le 6 juillet 2022).
- [128] D. Damidot *et al.*, « Solidification et Valorisation de Sédiments du Port de Dunkerque en Travaux », p. 174.
- [129] « NF-EN-12457-2. Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité), 2002. »
- [130] « NF P 94-100 Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement. »
- [131] « XP P13-901, Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions – Spécifications – Méthodes d'essais – Conditions de réception, 2001. » <https://www.boutique.afnor.org/norme/xp-p13-901/blocs-de-terre-comprimee-pour-murs-et-cloisons-definitions-specifications-methodes-d-essais-conditions-de-reception/article/739391/fa120503> (consulté le 2 septembre 2021).
- [132] « NF 94 422. Roches - Détermination de la résistance à la traction - Méthode indirecte - Essai brésilien ». <https://cobaz.afnor.org/notice/norme/nf-p94-422/FA106665?rechercheID=10335021&searchIndex=1&activeTab=all> (consulté le 8 novembre 2022).
- [133] « NF-EN 1936. Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale ».
- [134] « NF EN 12504-4 Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation des ultrasons ». <https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/notice/norme/nf-en-12504-4/FA195836?rechercheID=9783813&searchIndex=1&activeTab=all> (consulté le 12 octobre 2022).
- [135] Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique, <https://viewerbdc.afnor.org/pdf/viewer/Z0De7oe8ajA1?proxy=true> (consulté le 7 novembre 2022).
- [136] « ASTM D559, 1989, Méthodes d'essai standard pour le mouillage et le séchage des mélanges sol-ciment compactés ». [https://books.google.fr/books?id=5\\_9JCgAAQBAJ&pg=PA339&lpg=PA339&dq=ASTM+D559-89&source=bl&ots=vnrIU-ArWD&sig=ACfU3U07\\_khs0bIQN3pozZGaK5YOyxZ5nAg&hl=en&sa=X&ved=2ahUK](https://books.google.fr/books?id=5_9JCgAAQBAJ&pg=PA339&lpg=PA339&dq=ASTM+D559-89&source=bl&ots=vnrIU-ArWD&sig=ACfU3U07_khs0bIQN3pozZGaK5YOyxZ5nAg&hl=en&sa=X&ved=2ahUK)

- Ewj-  
iKzKhOP4AhUPgRoKHfv5CZEq6AF6BAgWEAM#v=onepage&q=ASTM%20D559-89&f=false (consulté le 6 juillet 2022).
- [137] H. Yu, L. Zheng, J. Yang, et L. Yang, « Stabilised compressed earth bricks made with coastal solonchak », *Construction and Building Materials*, vol. 77, p. 409-418, févr. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.069.
- [138] H. Yuan *et al.*, « Drying shrinkage, durability and microstructure of foamed concrete containing high volume lime mud-fly ash », *Construction and Building Materials*, vol. 327, p. 126990, avr. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126990.
- [139] D. Ciancio et J. Gibbings, « Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples », *Construction and Building Materials*, vol. 28, n° 1, p. 294-304, mars 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.070.
- [140] Y. Liang, « Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres », p. 228.
- [141] National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, et National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2009, p. 22999. doi: 10.17226/22999.
- [142] E. O. Tastan, T. B. Edil, C. H. Benson, et A. H. Aydilek, « Stabilization of Organic Soils with Fly Ash », *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 137, n° 9, p. 819-833, sept. 2011, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000502.
- [143] « Towards sustainable bricks production: An overview - ScienceDirect ». [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818300382?casa\\_token=sGKQuzD-T-QAAAAA:WI6iZ710ffmEM48SICXRIjq-e92LNeKw2S9cksoosNUyWBBFcDcG9rOmGg2a6D7ZW-M1o2eKgw](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818300382?casa_token=sGKQuzD-T-QAAAAA:WI6iZ710ffmEM48SICXRIjq-e92LNeKw2S9cksoosNUyWBBFcDcG9rOmGg2a6D7ZW-M1o2eKgw) (consulté le 26 octobre 2022).
- [144] A. Faure, « Capacité d'un sédiment à se substituer à la fraction argileuse de la matière première de l'industrie des liants hydrauliques », p. 336.
- [145] K. L. Scrivener et A. Nonat, « Hydration of cementitious materials, present and future », *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n° 7, p. 651-665, juill. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.026.
- [146] « Environment-Dependent Distribution of the Sediment nifH-Harboring Microbiota in the Northern South China Sea | Applied and Environmental Microbiology ». <https://journals.asm.org/doi/full/10.1128/AEM.01889-12> (consulté le 26 octobre 2022).
- [147] A. historiques du M. de la T. écologique et solidaire et du M. de la C. des territoires, « Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA) », 29 juin 2020. <http://www.archives.developpement-durable.gouv.fr/service-d-etudes-techniques-des-routes-et-r6888.html> (consulté le 6 juillet 2022).
- [148] G. Li, « Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 6, p. 1043-1049, juin 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.013.
- [149] « Cendres volantes pour béton. Définition, spécifications et critères de conformité ». [https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/recherche-resultat?rechercheID=7920978&\\_id=1657069847155](https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/recherche-resultat?rechercheID=7920978&_id=1657069847155) (consulté le 6 juillet 2022).
- [150] « NF P 94-093, Détermination des références de compactage d'un matériau – Proctor Normal et Proctor Modifié, 1999. »

- [151] D. Khale et R. Chaudhary, « Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review », *J Mater Sci*, vol. 42, n° 3, p. 729-746, févr. 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0401-4.
- [152] K. Zerfu et J. J. Ekaputri, « Review on Alkali-Activated Fly Ash Based Geopolymer Concrete », *Materials Science Forum*, vol. 841, p. 162-169, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.841.162.
- [153] « Influence du liant géopolymère à base de cendres volantes sur le comportement de sédimentation des boues de dragage | Demander un PDF ». [https://www.researchgate.net/publication/315968884\\_Influence\\_of\\_Fly\\_Ash-Based\\_Geopolymer\\_Binder\\_on\\_the\\_Sedimentation\\_Behavior\\_of\\_Dredged\\_Mud](https://www.researchgate.net/publication/315968884_Influence_of_Fly_Ash-Based_Geopolymer_Binder_on_the_Sedimentation_Behavior_of_Dredged_Mud) (consulté le 23 septembre 2021).
- [154] Y. Rifaai, A. Yahia, A. Mostafa, S. Aggoun, et E.-H. Kadri, « Rheology of fly ash-based geopolymer: Effect of NaOH concentration », *Construction and Building Materials*, vol. 223, p. 583-594, oct. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.028.
- [155] A. E. Losini, A. C. Grillet, M. Bellotto, M. Woloszyn, et G. Dotelli, « Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization – a review », *Construction and Building Materials*, vol. 304, p. 124507, oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124507.
- [156] O. Gencil, S. M. S. Kazmi, M. J. Munir, M. Sutcu, E. Erdogmus, et A. Yaras, « Feasibility of using clay-free bricks manufactured from water treatment sludge, glass, and marble wastes: An exploratory study », *Construction and Building Materials*, vol. 298, p. 123843, sept. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123843.
- [157] A. Benlalla, M. Elmoussaouiti, M. Dahhou, et M. Assafi, « Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks », *Applied Clay Science*, vol. 118, p. 171-177, déc. 2015, doi: 10.1016/j.clay.2015.09.012.
- [158] A. G. Mimboe, M. T. Abo, J. N. Y. Djobo, S. Tome, R. C. Kaze, et J. G. N. Deutou, « Lateritic soil based-compressed earth bricks stabilized with phosphate binder », *Journal of Building Engineering*, vol. 31, p. 101465, sept. 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101465.
- [159] V. Toufigh et E. Kianfar, « The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts », *Construction and Building Materials*, vol. 200, p. 616-629, mars 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.050.
- [160] J. Canivell, J. J. Martin-del-Rio, F. J. Alejandro, J. García-Heras, et A. Jimenez-Aguilar, « Considerations on the physical and mechanical properties of lime-stabilized rammed earth walls and their evaluation by ultrasonic pulse velocity testing », *Construction and Building Materials*, vol. 191, p. 826-836, déc. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.207.
- [161] M. Izquierdo, X. Querol, J. Davidovits, D. Antenucci, H. Nugteren, et C. Fernández-Pereira, « Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 166, n° 1, p. 561-566, juill. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.063.
- [162] G. Ruiz, X. Zhang, W. F. Edris, I. Cañas, et L. Garijo, « A comprehensive study of mechanical properties of compressed earth blocks », *Construction and Building Materials*, vol. 176, p. 566-572, juill. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.077.
- [163] R. Medjo Eko, E. D. Offa, T. Yatchoupou Ngatcha, et L. Seba Minsili, « Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks », *Construction and Building Materials*, vol. 35, p. 340-346, oct. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.050.

- [164] J. J. Martín-del-Río, J. Canivell, et R. M. Falcón, « The use of non-destructive testing to evaluate the compressive strength of a lime-stabilised rammed-earth wall: Rebound index and ultrasonic pulse velocity », *Construction and Building Materials*, vol. 242, p. 118060, mai 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118060.
- [165] L. MARMORET, A. BOUGUERRA, K. AL-RIM, et M. QUENEUDEC, « Conductivité thermique d'un béton argileux cellulaire : cas d'un allégement par réaction avec l'aluminium pulvérulent », *Rev. gén. therm*, vol. 34, n° 402, p. 393-400, 1995.
- [166] I. Aboubou, L. Diabaté, et G. Menguy, « Détermination de la conductivité thermique de matériaux locaux de construction à Bamako », *Journal des Sciences Pour l'Ingénieur*, vol. 4, p. 1-6, juill. 2004, doi: 10.4314/jspi.v4i1.30005.
- [167] P. Meukam, A. Noumowe, Y. Jannot, et R. Duval, « Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment », *Mat. Struct.*, vol. 36, n° 7, p. 453-460, août 2003, doi: 10.1007/BF02481525.
- [168] L. Zhang, A. Gustavsen, B. P. Jelle, L. Yang, T. Gao, et Y. Wang, « Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks », *Construction and Building Materials*, vol. 151, p. 504-511, oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047.
- [169] J. A. Cusidó et L. V. Cremades, « Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies », *Waste Management*, vol. 32, n° 6, p. 1202-1208, juin 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2011.12.024.
- [170] « Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement. » [https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/recherche-resultat?rechercheID=7920963&\\_=1657067963057](https://cobaz-afnor-org.bibdocs.u-cergy.fr/recherche-resultat?rechercheID=7920963&_=1657067963057) (consulté le 6 juillet 2022).

## ANNEXES



Annexe. 1. Ensemble de moulage utilisé pour la confection des éprouvettes[170]

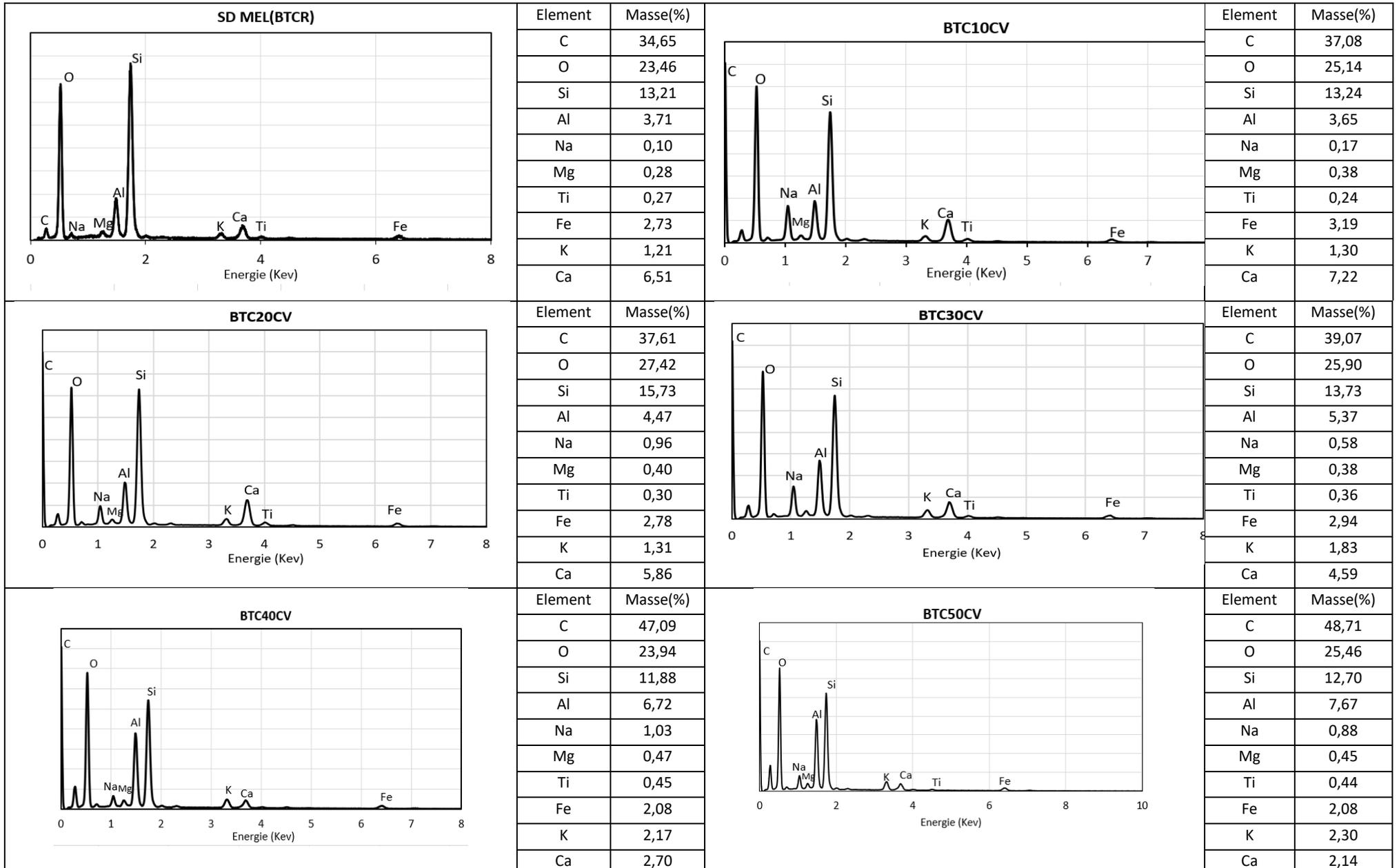
1. Plateau supérieur de la presse
2. Piston supérieur
3. Contre-moule
4. Étuis

5.Piston inférieure

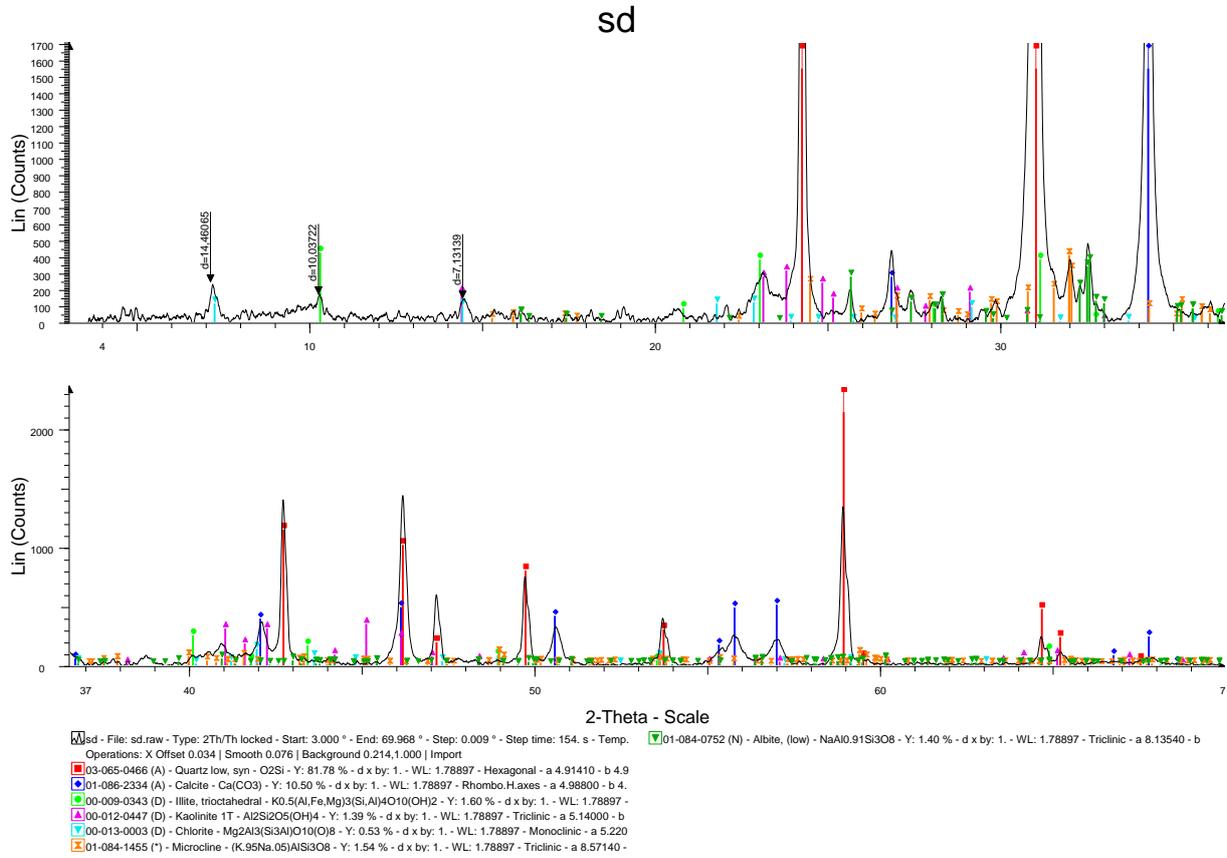
6.Coquilles d'espacement

7.Plateau inférieur de la presse

## Annexe. 2. Les spectrogrammes de spectroscopie à dispersion d'énergie EDX des BTC



### Annexe. 3.Analyse DRX de sédiment MEL



#### R-Values

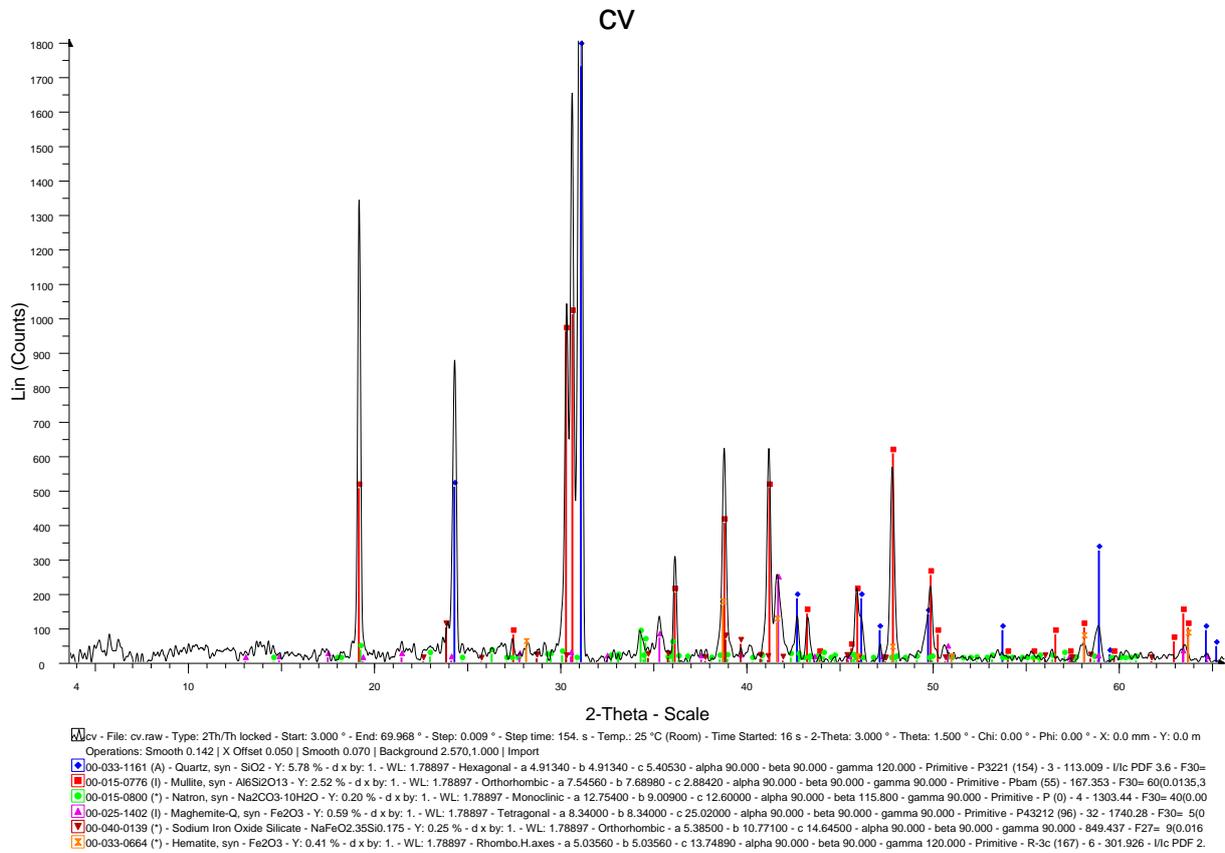
Rexp : 3.24 Rwp : 7.65 Rp : 5.16 GOF : 2.36

Rexp` : 9.09 Rwp` : 21.48 Rp` : 24.17 DW : 0.40

#### Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1 : Quartz	64.320 %
Phase 2 : Calcite	15.007 %
Phase 3 : Illite	2.769 %
Phase 4 : "Microcline intermediate1"	0.607 %
Phase 5 : "Chlorite IIB"	1.428 %
Phase 6 : "Muscovite 2M1"	0.595 %
Phase 7 : Albite	2.577 %
Phase 8 : "Microcline maximum"	5.075 %
Phase 9 : "Kaolinite (BISH)"	7.622 %

## Annexe. 4.Analyse DRX de CV



### R-Values

Rexp : 2.82 Rwp : 3.99 Rp : 2.87 GOF : 1.42

Rexp` : 5.86 Rwp` : 8.30 Rp` : 6.09 DW : 1.01

### Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1 : Quartz	30.334 %
Phase 2 : "Mullite 2:1"	62.514 %
Phase 3 : Maghemite	7.152 %

## Annexe. 5.Analyse DRX de BTC20CV



### R-Values

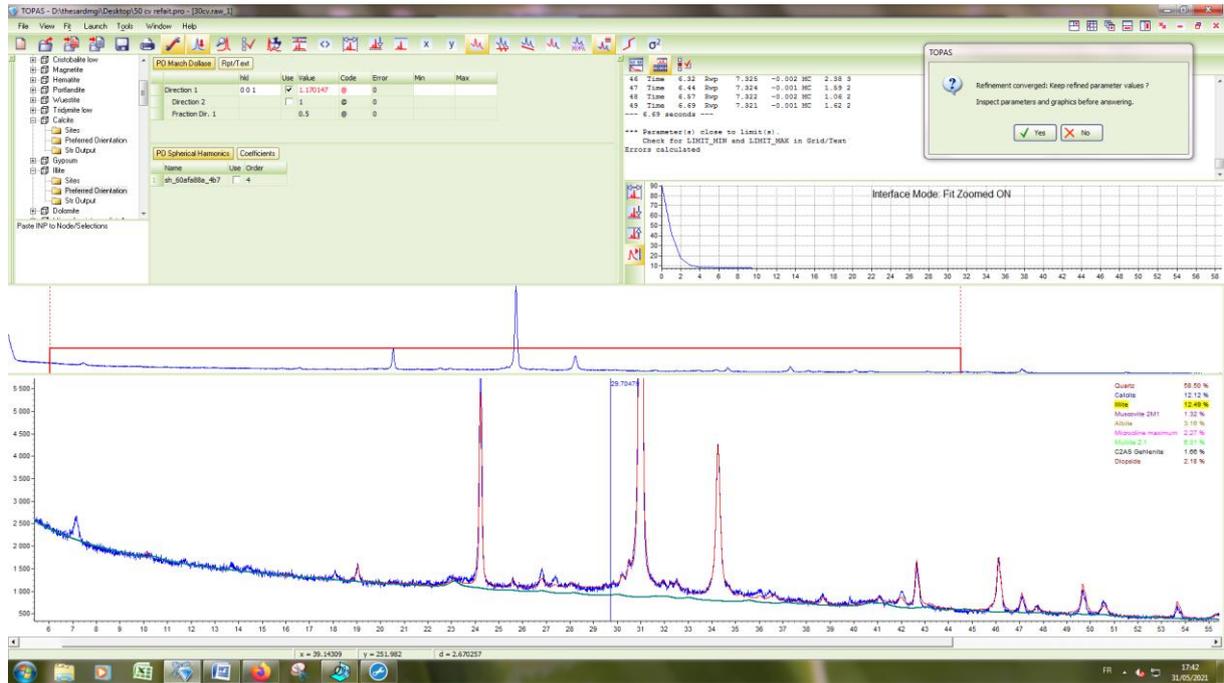
Rexp : 3.12 Rwp : 8.07 Rp : 5.29 GOF : 2.59

Rexp` : 5.80 Rwp` : 15.01 Rp` : 10.44 DW : 0.32

### Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1 : Quartz	58.650 %
Phase 2 : Calcite	13.481 %
Phase 3 : Illite	12.097 %
Phase 4 : "Muscovite 2M1"	1.002 %
Phase 5 : Albite	4.975 %
Phase 6 : "Microcline maximum"	3.397 %
Phase 7 : "Mullite 2:1"	3.392 %
Phase 8 : Diopside	1.598 %
Phase 9 : "C2AS Gehlenite"	1.408 %

## Annexe. 6.Analyse DRX de BTC30CV



### R-Values

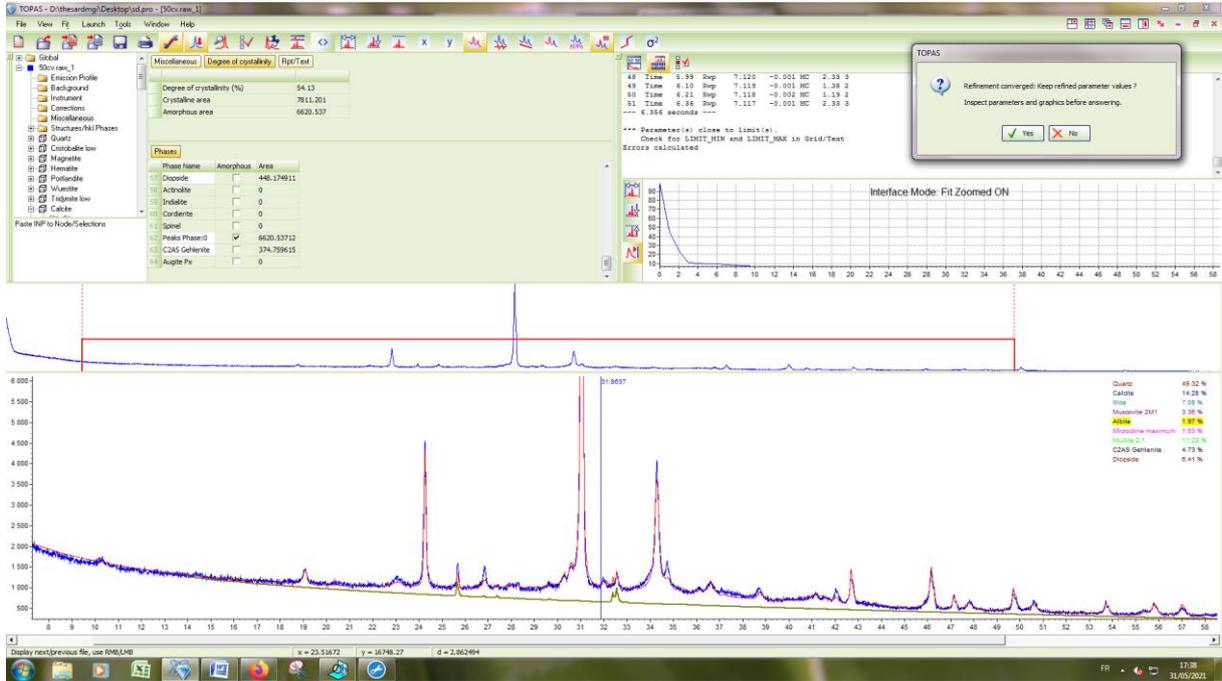
Rexp : 3.12 Rwp : 7.32 Rp : 4.87 GOF : 2.35

Rexp` : 5.63 Rwp` : 13.22 Rp` : 9.18 DW : 0.39

### Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1 : Quartz	58.495 %
Phase 2 : Calcite	12.119 %
Phase 3 : Illite	12.491 %
Phase 4 : "Muscovite 2M1"	1.320 %
Phase 5 : Albite	3.158 %
Phase 6 : "Microcline maximum"	2.272 %
Phase 7 : "Mullite 2:1"	6.309 %
Phase 8 : Diopside	2.178 %
Phase 9 : "C2AS Gehlenite"	1.659 %

## Annexe. 7.Analyse DRX de BTC50CV



### R-Values

Rexp : 3.25 Rwp : 7.12 Rp : 5.21 GOF : 2.19

Rexp` : 4.42 Rwp` : 9.67 Rp` : 7.16 DW : 0.47

### Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1 : Quartz	49.319 %
Phase 2 : Calcite	14.283 %
Phase 3 : Illite	7.083 %
Phase 4 : "Muscovite 2M1"	3.359 %
Phase 5 : Albite	1.968 %
Phase 6 : "Microcline maximum"	1.634 %
Phase 7 : "Mullite 2:1"	11.215 %
Phase 8 : Diopside	6.410 %
Phase 9 : "C2AS Gehlenite"	4.728 %

### Degree of crystallinity (%)

Degree of crystallinity (%)	54.13
Crystalline area	7811.201
Amorphous area	6620.537

Annexe. 8.Comparaison environnementale entre le sédiment MEL et des sédiments de la  
même région

Paramètre	Unité	seuils ISDI	Saint- omer	CU-Arras	Aire-sur- la-lys	MEL	NSL	GPMD
matière sèche	% massique	<30	54.6	26.1	78.51	66.1		
COT	mg/kg MS	30000	18000	40600	18785	73000	8500	57000
pH (KCl)		-	7.6	6.8	8.43	7.4		
température pour mes. pH	°C		19.2	-	21.18	19.9		
<b>LIXIVIATION</b>								
Lixiviation 24h - NF-EN-12457-2								
<b>COMPOSES AROMATIQUES VOLATILS</b>								
benzène	mg/kg MS		<0.05	<0,05	-	<0,05	<0,05	
toluène	mg/kg MS		<0.05	0.08	-	<0,05	1.8	
éthylbenzène	mg/kg MS		<0.05	<0,05	-	<0,05	<0,05	
orthoxyène	mg/kg MS		<0.05	<0,05	-	<0,05	<0,05	
para- et métaxyène	mg/kg MS		<0.05	<0,05	-	<0,05	0.16	
xylènes	mg/kg MS		<0.10	<0,10	-	<0,10	0.16	
<b>BTEX totaux</b>	mg/kg MS	6	<0.25	0.25	0.3	0.25	2	0.38
<b>HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES</b>								
naphtalène	mg/kg MS		0.11	-	0.114	<0,10	0.63	
acénaphtylène	mg/kg MS		0.07	-	0.032	<0,10	0.21	
acénaphtène	mg/kg MS		0.17	-	0.04	<0,10	0.39	
fluorène	mg/kg MS		0.17	0.08	0.081	<0,10	0.43	
phénanthrène	mg/kg MS		0.68	0.29	0.401	0.67	1.4	
anthracène	mg/kg MS		0.15	0.10	0.09	0.13	0.4	
fluoranthène	mg/kg MS		1.4	0.80	0.36	3.7	2.1	
pyrène	mg/kg MS		1	0.53	0.25	3.7	1.4	
benzo(a)anthracène	mg/kg MS		0.62	0.37	0.19	2	1.3	
chrysène	mg/kg MS		0.69	0.46	0.196	2.7	1.3	
benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS		1.1	0.86	0.316	5.1	2.6	
benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS		0.47	0.26	0.1	2.2	1.1	
benzo(a)pyrène	mg/kg MS		0.65	0.49	0.27	2.7	1.4	
dibenzo(ah)anthracène	mg/kg MS		0.16	0.19	0.06	0.53	0.4	
benzo(ghi)pérylène	mg/kg MS		0.53	0.41	0.21	2.9	1.4	
indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg MS		0.54	0.45	0.16	2.8	1.5	
Somme des HAP (10) VROM	mg/kg MS	50	5.8	-	-	-	-	
<b>Somme des HAP (16) - EPA</b>	mg/kg MS	50	8.5	5.5	2.87	20	18	5.5
<b>POLYCHLOROBIPHENYLS (PCB)</b>								
PCB 28	µg/kg MS		7.1	<0,001	0.002	<2	0.0026	
PCB 52	µg/kg MS		5.5	0.0017	0.006	2.8	0.015	
PCB 101	µg/kg MS		6.3	0.0022	0.011	4.6	0.035	
PCB 118	µg/kg MS		7	0.0012	0.011	4.2	0.023	

PCB 138	µg/kg MS		6.7	0.0023	0.009	10	0.062	
PCB 153	µg/kg MS		7.7	0.0036	0.014	12	0.066	
PCB 180	µg/kg MS		4.7	0.0018	0.007	12	0.053	
PCB totaux (7)	µg/kg MS	1	45	0.013	0.05	46	0.26	0.04
<b>HYDROCARBURES TOTAUX</b>								
fraction C10-C12	mg/kg MS		6.6	-	-	<5		
fraction C12-C16	mg/kg MS		30	-	-	6		
fraction C16-C21	mg/kg MS		170	-	-	57		
fraction C21-C40	mg/kg MS		870	-	-	690		
hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg MS	500	1100	1499	286	750	1100	1360
<b>LIXIVIATION</b>								
L/S	ml/g		9.99			9.99		
pH final ap. lix.			7.9	7.62	7.89	7.98	7.4	
température pour mes. pH	°C		19.2		20	20.1		
conductivité (25°C) ap. lix.	µS/cm		516	1238	177.82	404		
<b>ELUAT COT</b>								
COT	mg/kg MS	500	95	82	47	94	94	47
<b>ELUAT METAUX</b>								
antimoine	mg/kg MS	0.06	0.18	-	<0,039	0.14	0.09	0.0664
arsenic	mg/kg MS	0.5	0.07	<0,04	0.34	0.05	<0,05	<0,08
baryum	mg/kg MS	20	0.25	1.04	0.35	0.35	0.43	0.3701
cadmium	mg/kg MS	0.04	<0,004	0.01	0.01	0.004	0.01	<0,008
chrome	mg/kg MS	0.5	<0,01	0.02	0.365	0.012	<0,01	<0,03
cuivre	mg/kg MS	2	<0,05	<0,05	0.37	0.4	0.28	0.1919
mercure	mg/kg MS	0.01	<0,0005	<0,0005	0.11	0.0005	<0,0005	0.004
plomb	mg/kg MS	0.5	<0,1	<0,1	0.61	0.1	<0,1	<0,03
molybdène	mg/kg MS	0.5	0.097	0.05	0.049	0.063	0.11	0.6178
nickel	mg/kg MS	0.4	<0,1	0.02	0.16	0.1	0.13	<0,03
sélénium	mg/kg MS	0.1	<0,06	<0,039	0.022	0.039	0.05	<0,07
zinc	mg/kg MS	4	<0,2	0.09	1.85	0.21	1.2	<0,06
<b>ELUAT COMPOSES INORGANIQUES</b>								
fraction soluble	mg/kg MS	4000	2140	2102	6235	2320	8720	3062
<b>ELUAT PHENOLS</b>								
Indice phénol	mg/kg MS	1	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	0.01
<b>ELUAT DIVERSES ANALYSES CHIMIQUES</b>								
fluorures	mg/kg MS	10	2.7	<2	10.11	2.8	<2	<2,5
chlorures	mg/kg MS	800	30	42	55.46	24	20	14900
sulfate	mg/kg MS	1000	974	930	552.36	554	5350	12580

	Classe 3 Inerte Non Dangereux
	classe 2 Non inerte Non Dangereux
	Classe 1 Dangereux